



Elektrikli Araçlarda Lityum İyon Bataryalar





**Elektrikli Araçlarda
Lityum İyon
Bataryalar**

2024

Elektrikli Araçlarda Lityum İyon Bataryalar

Baş Editör Prof. Dr. Özgül Keleş

Yardımcı Editörler Doç. Dr. Billur Deniz Karahan
Kerim Can Bayar



Prof. Dr. Özgül Keleş



Doç. Dr. B. Deniz Karahan



Kerim Can Bayar

ISBN 978-625-00-7899-0

Basım Tarihi Mayıs, 2024

Kapak Resmi Audi AG'nin Brüksel CO₂ nötr fabrikasındaki batarya üretimi

Yayın Sahibi Otomotiv Teknoloji Platformu (OTEP)

Altunizade, Atilla Sk. No:10, 34676 Üsküdar/İSTANBUL

Telefon (216) 501 53 66

Copyright ©

Bu kitabın çevrim içi versiyonu ile bilimsel yayınlara maksimum erişimi sağlamayı ve dolayısıyla Açık Erişimin gelişimine aktif olarak katkıda bulunmayı hedefliyoruz.

Yayıncı, editörler, hakemler ve yazarlar hatalar, eksiklikler veya iddialar için herhangi bir yasal sorumluluk kabul etmezler ve bu kitapta yayınlanan bilgilerle ilgili olarak açık veya zımni herhangi bir garanti vermezler.



Türkiye Cumhuriyeti'nin bilime, insanlığa değer veren
ve değer katan her cesur bireyine atfedilmiştir.

Bu çalışma, üzerinde çok konuşulan üniversite – sanayi işbirliğinin en güzel örneklerinden biridir. Tedarik ve ana sanayi temsilcileri ile akademiden 200’e yakın kişinin katkı sağladığı bir çalışma grubu ile Cumhuriyetimizin 100. yılında başlattığımız çalışmanın 18 aylık emek ile ortaya çıkardığı bu kaynak eseri ülkemize, sektörümüze ve insanımıza sunmaktan gurur duyuyoruz. Hiçbir karşılık gözetmeden bu esere bilgisiyle, birikimiyle, zamanıyla, emeğiyle katkı veren akıl, bilgi ve gönülden yana zengin tüm paydaşlara teşekkür ederiz.





Önsöz

Otomotiv Teknoloji Platformu (OTEP), "Araştırma ve inovasyon için yatırım teşvikini harekete geçirmek ve teknolojik olarak yenilikçi bir ekonomi ortaya çıkarmak için ulusal, bölgesel ve Avrupa ölçeğindeki faaliyetleri koordine etmek suretiyle katma değer yaratmak" vizyonu doğrultusunda, Otomotivde yaşanan büyük dönüşüm çerçevesinde karşımıza çıkan yeni teknolojiler konusunda çalışmalarını sürdürüyor. OTEP Batarya Çalışma Grubu bünyesinde yapılan geniş katılımlı çalışmalar da en kapsamlı analizlerden birisi olarak öne çıkıyor.

Sürdürülebilir ulaşıma yönelik yolculuk, çağımızın belirleyici zorluklarından birisi. İklim değişikliğinin karmaşıklıklarıyla mücadele ederken ve daha yeşil bir gelecek için çabalarken, elektrikli araçların (EA'lar) rolü bir umut ışığı olarak ortaya çıkıyor. Bu EA'ların işlevselliğinin ve sürdürülebilirliğinin merkezinde ise bataryalar yer alıyor.

Bu çalışma, elektrikli araç bataryalarını çevreleyen karmaşık ekosistemi derinlemesine inceliyor ve tasarımdan geri dönüşüme kadar yaşam döngülerinin izini sürüyor. Kapsamlı araştırmaların, analizlerin ve sürdürülebilir hareketlilik alanındaki bu önemli bileşenin incelikli dinamiklerini anlamaya yönelik tutkulu bir araştırmacının doruk noktasını temsil ediyor.

Bu sayfalarda elektrikli araç bataryalarının tasarımını, üretimini ve geri dönüşümünü etkileyen sayısız faktörü inceleyerek kapsamlı bir araştırmaya girişiyoruz. Malzeme tedariki ve pil üretiminin ilk aşamalarından, kullanımın kritik aşamalarına ve nihai kullanım ömrü sonu değerlendirmelerine kadar her yön titizlikle inceleniyor.

Üstelik bu çalışma, elektrikli araç aküsü teknolojisinin daha geniş etkileri ve sonuçları hakkında içgörüler sunarak salt analizin ötesine geçmeye çalışmaktadır. İnovasyon, politika ve çevre yönetiminin kesişim noktalarını düşünerek, hızla gelişen bu ortamın sunduğu zorluklarla ve fırsatlarla yüzleşiyoruz.

Preface

Automotive Technology Platform (OTEP), in line with its vision of "Creating added value by coordinating activities on a national, regional and European scale in order to mobilize investment incentives for research and innovation and create a technologically innovative economy", continues working on new technologies that emerge within the framework of the great transformation in Automotive. The studies with wide participation carried out within the OTEP Battery Workgroup also stand out as one of the most comprehensive analyses.

The journey towards sustainable transportation is one of the defining challenges of our time. As we navigate the complexities of climate change and strive for a greener future, the role of electric vehicles (EVs) emerges as a beacon of hope. Central to the functionality and viability of these EVs are their batteries.

This study delves deep into the intricate ecosystem surrounding electric vehicle batteries, tracing their lifecycle from conception to recycling. It represents a culmination of extensive research, analysis, and a fervent commitment to understanding the nuanced dynamics of this pivotal component in the realm of sustainable mobility.

Throughout these pages, we embark on a comprehensive exploration, dissecting the myriad factors influencing the design, production, and recycling of electric vehicle batteries. From the initial stages of material sourcing and battery manufacturing to the critical phases of utilization and eventual end-of-life considerations, each facet is meticulously examined.

Moreover, this study endeavors to transcend mere analysis, offering insights into the broader implications and ramifications of electric vehicle battery technology. We confront the challenges and opportunities presented by this rapidly evolving



Bu çalışmanın çeşitli sektörlerdeki paydaşlar için hem bilimsel bir katkı hem de pratik bir kaynak olarak hizmet etmesini içtenlikle umuyoruz. İster bilinçli stratejiler arayan politika yapımcılar, ister pazar dinamiklerini yönlendiren sektör profesyonelleri, ister bilginin sınırlarını zorlayan araştırmacılar olsun, bu çalışmanın daha sürdürülebilir ve eşitlikçi bir geleceğe giden yolları aydınlatmaya önyak olmasını diliyoruz.

Son olarak, başta Çalışma Grubu Başkanımız Sayın Prof. Dr. Özgül Keleş ve editörlerimiz Doç. Dr. B. Deniz Karahan ve Kerim Can Bayar olmak üzere; rehberlik, işbirliği veya ilham yoluyla bu çabaya katkıda bulunan tüm paydaşlarımıza şükranlarımızı sunuyoruz. Ortak çabalarımızın bizi, elektrikli araçların ve bataryalarının yalnızca ilerlemenin simgeleri olarak değil, aynı zamanda gerçek anlamda sürdürülebilir bir yarının temel direkleri olarak durduğu bir dünyaya doğru itmesini diliyoruz.

Saygılarımızla,

Otomotiv Teknoloji Platformu

landscape, contemplating the intersections of innovation, policy, and environmental stewardship.

It is our sincere hope that this study serves as both a scholarly contribution and a practical resource for stakeholders across various sectors. Whether policymakers seeking informed strategies, industry professionals navigating market dynamics, or researchers pushing the boundaries of knowledge, may this work illuminate pathways towards a more sustainable and equitable future.

In closing, we would like to thank our Workgroup Chairman Prof. Dr. Özgül Keleş, and our editors Assoc. Dr. B. Deniz Karahan and Kerim Can Bayar, and would like to extend our gratitude to all those who have contributed to this endeavor, whether through guidance, collaboration, or inspiration. May our collective efforts propel us towards a world where electric vehicles and their batteries stand not only as symbols of progress, but as pillars of a truly sustainable tomorrow.

With our kind Regards,

Automotive Technology Platform



Editörden

Hayal etmek insana verilmiş en büyük lütuflardan biri ve hayatın motivasyonudur.

Okuyacağınız bu kitap bir grup insanın hayalinin gerçeğe dönüştüğünün göstergesi olmuştur, gerçekleşecek bir çok farklı hayal için de ilham kaynağı ve yol haritası olacaktır. Aynı hayalde buluşan güzel insanların aylar süren emekleri ile oluşan bu kitap; daha nice güzel insanların Türkiye Cumhuriyeti'nin geleceği için biraraya gelip, ülkemizin ilelebet kazanacağı nice başarıların oluşmasında öncü olacaktır.

Covid sonrası dönemde çevrenin, canlılığın ve sürdürülebilirliği öneminin artmasıyla tüm dünyada ve ülkemizde batarya teknolojisi hızla yaygınlaşmış, batarya teknolojisine duyulan endüstriyel ve akademik ilgi gelişmiştir.

2022 yılında hazırlanmaya başlanan bu kitap sayesinde lityum iyon batarya özelinde, var olan değerlerimizin başında insan olduğu bilinci ile, bilginin, teknolojinin ve ekonominin döngüselliğini hedef alarak lityum iyon batarya üretimindeki tüm tedarik zinciri ve ekosistemi gözeterek ülkemizde ilk defa detaylı durum analizi ve haritalama yapılması, öz-öneriler sunarak gelecek için yeni alt çalışma gruplarının önünün açılması sağlanmıştır. İyi ki ülkemizde hayal kuran, azimli, çalışkan, gönlünü bilime ve bilginin paylaştıkça çoğalacağına inanarak yeşerten böyle güzel insanlar var. Okuyacağınız bu kitap değişen dünya gereksinimlerine cevap vermek ve batarya konusunda ülkemizin önünü açarak ilgili paydaşlara destek olmak amacıyla Türkiye Cumhuriyeti'nin tüm coğrafılarından katılan 91 kişinin emeği ile hazırlanmıştır.

Bu kitap; 19 Mayıs 1919'daki cesur, özgür, dayanışmacı, yapıcı ve yaratıcı ruhun hep içimizde olduğunun bir göstergesidir. Bu eserde akademisyenlerin, endüstri ve sivil toplum örgütlerindeki mezunlarımızın, öğrencilerimizin ve iş insanlarının emeği vardır. Bu kitap batarya konusunda ülkemizin ne kadar güçlü bir bilgi alt yapısına sahip olduğumuzun göstergesidir. Kitapta yer alan akademisyenlerin herbiri alanlarında oldukça yetkin ve sayısız öğrenci yetiştirmiş ve yayınları ile dünya literatürüne destek olarak kendilerini dünya çapında kanıtlamışlardır. Öğrencilerimiz ise merak ve istekle çalışmalarına devam etmekte daha çok öğrenmek ve daha iyisini yapmak için azimle çalışmaktadır. Sanayicimiz ise dünyadaki eğilimleri takip etmekte, kaliteli ürünü sürdürülebilir bakış açısıyla kitlesel miktarda başarıyla piyasaya sağlamaktadır. Sivil toplum örgütleri de tüm paydaşlarını bilgilendirerek yeni oluşumların önünü açmakta, fırsatların endüstriyel farkındalığa dönüşmesinde kilit rol oynamaktadır.

Bu kitap, fırsat verildiğinde, akademisyenlerimiz, öğrencilerimiz, sanayimizde bulunan profesyonellerimizin ve iş insanlarının birlikte çalışarak neleri başarabildiğinin göstergesidir. Bu kitabın varolmasına sebep olan tüm akademisyenlerimize, öğrencilerimize, sanayide, sivil toplum örgütlerindeki profesyonellere ve iş insanlarına sabırları, emekleri, anlayışları ve çalışkanlıkları için çok ama çok teşekkür ediyorum.

Bu kitabı hazırlanmasında bize destek veren OTEP, TAYSAD (Taşıt Araçları Tedarik Sanayicileri Derneği) ve OSD (Otomotiv Sanayii Derneği) yetkililerine verdikleri fırsat için teşekkür ederiz. Özellikle OTEP Platformu direktörü Sayın Ernur Mutlu'ya, TAYSAD Yönetim Kurulu Başkan Yardımcısı Sayın Berke Ercan'a ve OTEP teknik uzmanı Elif Niğdelioğlu'na kitap oluşum süresince gösterdikleri inanç, samimi heyecan ve destek için canı gönülden teşekkür ederim.

OTEP batarya çalışma grubuna başkan adayı olarak önererek ülkemizin dört bir yanında iyiliğe inanan ve hayata değer katmaya gönüllü batarya çalışma grubu üyeleri ile hayalimin gerçekleşmesine vesile olduğu için Sayın Prof. Dr. Özgen Akalın'a çok teşekkür ederim. Kitabın yazımı esnasında editörlüğü yaparken birlikte çalıştığım ve kendisi ile gurur duyduğum ve "iyi ki var" deyimine sonuna kadar layık olan Doç. Dr. Billur Deniz Karahan'a yürekten teşekkür ediyorum. Bu kitabın yazımı sırasında tanıdığım ve insanın zenginliğinin insan kazanmak olduğu inancımı perçinleyen Sayın Kerim Can Bayar'a gösterdiği titizlik ve çalışkanlık için çok ama çok teşekkür ediyorum.

19 Mayıs 2024'te yayınlanmış olan bu kitap ile bu anlamlı günde Gazi Mustafa Kemal Atatürk'ü ve bu vatan için hayatını kaybetmiş şehit atalarımızı, canını ve bedenini riske atmış gazilerimizi sevgi ve saygı ile anıyoruz. Bu eser ile güzel vatanımızın evlatları olarak onlara layık olabilmeyi umut ediyor ve gençlerimize, gelecek nesillerimize bilimin en aydınlık yol olmasını temenni ediyoruz.

Saygılarımla,

*İnsanın en büyük inovasyonu,
insanlığını keşfetmek olmalıdır.*

Prof. Dr. Özgül Keleş



Yönetici Özeti

Değerli Okuyucularımız,

İnsanlık kendi isteklerini hayata geçirmek için dünya kaynaklarını, zenginlikleri kullanmış ve kullanırken çoğunlukla o isteklerin sonucunda insan ve canlıların yaşam kaynağı olan dünyamızı kirleteceğini düşünmemiştir. Şu an tehlike bir nefes kadar uzak. Hava, su, doğa kirlendi ve bu durum tüm bitki, hayvan ve insan yaşamını etkileyip, yaşam döngüsünü riske atıyor.

Bu kitap, iklimde oluşan ve yaşamı negatif etkileyen değişimlerin durdurulmasına ve iyileştirilmesine yönelik olarak ortaya çıkarılan ulaşım sektöründeki dönüşümün hikayesini elektrikli araçlar ve lityum iyon bataryaların teknoloji yolculuğunu anlatıyor.

Kitapta lityum iyon batarya ekosistemindeki tüm aktörlerin görüşlerine yer verilerek, ekosistemin sürdürülebilirliğinde önemli olan değer ve tedarik zinciri dünyadaki ve ülkemizdeki mevcut durum analizleri ile birlikte ele alınmıştır. İçerikte kritik madenlerin rezervleri-zenginleştirilme prosesleri, lityum iyon batarya bileşenleri- üretim prosesleri, geri kazanım- dönüşüm, yaşam döngüsü analizleri, elektrikli araç dünyası, şarj istasyonları-şebeke yönetimi ve lityum sonrası gelecek incelenmiştir.

Kitabın giriş bölümünde lityum iyon bataryaların çalışma mekanizması, tarihsel dönüm noktaları, kaçırılan fırsatlar ve lityum iyon bataryaların teknolojik gelişiminde önemli gördüğümüz ülke stratejilerinden bahsedilmiştir.

Li iyon piller yapısında bulunan lityum iyonlarının iki elektrot arasında hareket etmesi sebebiyle tekrar şarj edilebilir özelliktedir. Pilin kullanımı sırasında lityum iyonları anottan katoda geçerler, şarj esnasında ise dışardaki bir güç kaynağından hücreye elektron verilir ve katotta oluşan reaksiyonlar ile lityum iyonları anoda geçerler.

Volta ile başlayan batarya yolculuğuna lityumun yolculuğa katılması 1970'lerde Exxon firmasında görev alan bilim insanlarının 2000'li yıllarda petrol üretiminin zirve seviyelere ulaşip sonra durağanlaşacağı öngörüsü sonucu aldıkları aksiyonla gerçekleşmiştir. Bu öngörü ışığında Exxon şirket yöneticileri farklı enerji kaynaklarını araştırmayı stratejik hedef olarak belirlemiştir. 1972'de Exxon'da çalışmaya başlayan M. Stanley Whittingham araştırmalarına 2,4 V'luk lityum iyon bataryayı (LIB) üretmiştir. Exxon bu buluşunu önce İsviçreli kol saati firması olan Ebauches'e ardından Asya, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki (ABD) üç

Executive Summary

Dear Readers,

Humanity has used world's resources and richness relentlessly and thoughtlessly polluting our habitat. Today, danger is just a breath away. We have polluted air, water and eventually the lives of plant, animal and human at risk.

This book is about a transformation story of transportation sector triggered by climate change. It covers the technological journey of electric vehicles and lithium-ion batteries.

Inside, considering the situation in our country and in the world, the views of all actors are included and discussed for a sustainable value and supply chain. In the content, reserves of critical minerals-enrichment processes, lithium-ion battery components production processes, recovery conversion, life cycle analyses, electric vehicles, charging stations-grid management and beyond lithium are examined.

In the introduction part of the book, the working mechanism of lithium-ion batteries, historical milestones, missed opportunities and country strategies are given.

Li ion batteries are rechargeable because the lithium ions move between two electrodes. During the use of the battery, lithium ions pass from the anode to the cathode and current flows through the circuit thanks to the electrons. During charging, electrons are supplied to the cell from an external power source and lithium ions pass to the anode through reactions occur at the cathode.

Lithium's participation in the battery journey started with Volta. Then, 1970s, in light of foresight at Exxon that "oil production would reach peak levels and then stagnate in 2000s", Exxon company managers have decided to search for different energy sources. M. Stanley Whittingham, who started working at Exxon in 1972, produced the 2.4 V lithium-ion battery (LIB). Exxon licensed this invention first to Ebauches, a Swedish watch company and three companies in Asia, Europe and the United States (USA), then decided not to invest further in this technology. In the continuation of this journey, different battery chemistries were developed and one of them was

firmaya lisanslamış sonra da bu teknolojiye daha fazla yatırım yapmama kararı almıştır. Bu yolculuğun devamında, farklı pil kimyaları geliştirilmiştir. Bunlardan biri 1980'li yıllarda LiCoO₂ olup biraz geç de olsa Akira Yoshino, John Goodenough ve M. Stanley Whittingham bilim ve insanlık dünyası adına paha biçilmez olan 2019 Kimya Nobel ödülünü kazanmışlardır. Günümüzde pek çok taşınır, taşınmaz cihaza güç sağlayan lityum iyon pillerin uygulama alanlarından biri de elektrikli araçlardır.

Elektrik enerjisi ile hareket kabiliyetine sahip araçlara elektrikli taşıt, elektrik ile hareket eden otomobillere ise Elektrikli Araç/Otomobil, (EA) adı verilir. Bataryalı elektrikli araç (BEA) tamamen elektrikli, şarj edilebilir pillere sahip olan ve içten yanmalı motoru olmayan araçlardır. Elektrikli araçlar, gazlı/benzinli araçlara göre % 90 daha az hareketli parçaya sahiptirler. Elektrikli araçların hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoruyla çalışan tasarımları Fişli/Soketli Hibrit Elektrikli Araç (FHEA) olarak bilinir. Diğer bir elektrikli araç türü ise hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoruyla çalışan ve bataryanın tüm enerjisini rejeneratif frenlemeden kazanan Hibrit Elektrikli (HEA) araçlardır.

Birinci bölümde lityum iyon hücresinde bulunan lityum (Li), grafit, nikel (Ni), mangan (Mn), demir (Fe), kobalt (Co), alüminyum (Al), bakır (Cu) ve fosfat 'ın (PO₄⁻³) kritik madenlerinin dünya ve ülkemizdeki rezervleri, bu rezervlerden elde edilebilecek ürünlerin bataryada kullanılabilecek kalitede olup olmayacakları ve zenginleştirme yöntemleri incelenmiştir. Türkiye'nin madencilik ve cevher hazırlama faaliyetlerindeki potansiyeli göz önüne alındığında, yerli batarya üretimi için stratejik bir avantaj sağlayabilecek önemli kaynaklara sahip olduğu söylenebilir. Bu kaynakların etkin bir şekilde kullanılması ve yerli üretim kapasitesinin artırılması, ülkenin batarya teknolojilerindeki rekabetini güçlendirir ve enerji bağımsızlığına katkı sağlayabilir. Bir ülkenin maden rezervlerine sahip olması, o ülkenin zenginliğinin bir göstergesidir. Ancak, bu potansiyelin katma değeri yüksek teknolojiler için doğru işletilmesi ve kullanılması gereklidir.

İkinci bölüm'de lityum iyon bataryalarda yer alan anot aktif malzemeler incelenmiştir. Bataryaların performansını belirleyen ve alt bileşeni olan anotlar, hafif ve yüksek enerji yoğunluklu bataryaların üretiminde önemlidir. İdeal bir anot malzemesinin lityum/ lityum iyona göre düşük potansiyele, yüksek özgül kapasiteye, yüksek yapısal kararlılığa, iyi elektronik ve iyonik iletkenliğe sahip olması beklenmektedir. Li iyon pil tarihinde kullanılan ilk anot lityum metali olmuştur. Ancak bu malzemedeki güvenli olmaması sebebiyle vazgeçilmiştir ve yerini karbon esaslı malzemeler almıştır. Günümüzde ticari olarak en yaygın kullanılan anot, grafitir. Son yıllarda silisyum yüksek kapasitesi nedeniyle ilgi çekse de henüz ticari olarak sadece silisyum esaslı anot kullanımı gerçekleşmemiştir. Silisyumun avantajlarını anot tasarımına

LiCoO₂ in 1980s, and Akira Yoshino, John Goodenough and M. Stanley Whittingham won the 2019 Chemistry Nobel Prize. Nowadays, Li ion batteries have many application areas one of which is electric vehicles.

Vehicles move with electric energy are called Electric Vehicles (EV). Battery electric vehicles (BEV) are fully electric, have rechargeable batteries and do not have an internal combustion engine. Electric vehicles have 90% fewer moving parts than gasoline vehicles. A fully electric vehicle consists of battery packages, electric motor, inverter, powertrain and charger. Electric vehicles having both an internal combustion engine and an electric motor, known as Plug-in Hybrid Electric Vehicle, (PHEV). Hybrid Electric Vehicle (HEV), works with both an internal combustion engine, an electric motor and gains all the energy of the battery from regenerative braking.

In the first chapter, reserves of critical minerals for lithium ion batteries (lithium (Li), graphite, nickel (Ni), manganese (Mn), iron (Fe), cobalt (Co), aluminum (Al), copper (Cu) and phosphate (PO₄⁻³)) in the world and in our country and their battery grade enrichment management have been examined. Considering Turkey's potential in mining and ore processing activities, significant resources provide a strategic advantage for domestic battery production. Using these resources effectively and increasing domestic production capacity can increase the country's competitiveness in battery technologies. Country's mineral reserves are indicators of country's wealth. However, this potential must be properly exploited and used for high value-added technologies.

In the second chapter, anode active materials in Li ion batteries were examined. Anodes, are sub-components that determine the performance of batteries, are important in the production of light and high energy density batteries. An ideal anode material is expected to have low potential, high specific capacity, high structural stability, good electronic and ionic conductivity compared to lithium/lithium ion. The first anode was lithium metal, but this material was abandoned due to safety issues and was replaced by carbon-based materials. The most commonly used anode commercially today is graphite. Although silicon has attracted attention in recent years for its high capacity, but due to its structural limitation during intercalation fully silicon anodes have not been used commercially yet. Silicon-graphite composite anodes have been commercialized to incorporate the advantages of silicon into the anode design and minimize its disadvantages.



katip dezavantajlarını minimum seviyeye indirmek için silisyum-grafit kompozit anotlar ticarileştirilmiştir.

Üçüncü bölüm'de Li iyon hücrelerde yaygın olarak kullanılan katot aktif malzemeler ele alınmıştır. Katot aktif malzemeler pil performansı açısından oldukça kritik ve batarya kapasitesinin sınırlayıcı bileşenlerdir. Henüz anot olarak kullanılan grafitin ağırlıkça sergilediği kapasiteye ulaşan katot malzeme geliştirilememiştir. Katot aktif malzemeler üç değişik kristal yapıda sınıflandırılabilir. LiMO_2 (M=Co, Ni, Mn, Al gibi) bileşimi tabakalı yapıda olup pilin çalışması sırasında Li iyonlarına geçiş metal oksit tabakaları arasında iki boyutta hareket etme imkanı sağlamaktadır. Öte yandan, tabakalı katot aktif malzemelerin tabakalar arası bağların zayıf olması nedeniyle çevrimsel kararlılıkları düşüktür. Son yıllarda, NMC (Nikel, Manganez ve Kobalt içeren) alternatif olarak yüksek kapasitelerinden ötürü tercih edilse de yüksek nikel oranı güvenlik açısından risk oluştururken artan spesifik enerji ihtiyacı ve dünya genelinde kobaltın etik olmayan üretim koşulları, kısıtlı coğrafyada tedarik edilebilmesi ve yüksek üretim maliyeti nedeniyle daha yüksek Ni ve daha düşük ve Co içmeyen yeni bileşikler (NMC 811, NMC955, NCA, NMA vb.) araştırılmaktadır. Spinel yapıdaki LiMn_2O_4 bileşiminin en önemli avantajı, Mn elementinin Co elementinden çok daha ucuz olmasıdır ve bu yapı lityum difüzyonuna üç boyutlu imkan tanır. LiMn_2O_4 yüksek akımlarda iyi şarj/deşarj performansı, elektrokimyasal tersinirlik, ısıl kararlılık ve düşük maliyet gibi özellikleri ile ön plana çıkmasına karşın, tabakalı katot elektrot aktif malzemelere göre düşük pratik kapasiteye ve kapasite korunumuna sahiptir ve bu durum ticari uygulama için önemli bir engel oluşturmaktadır. Olivin tipi kristal yapıya sahip olan LiFePO_4 (LFP) kimyasında Li iyon difüzyonunu bir boyutta sağlanmaktadır. Bu yapı, oksijenin güçlü kovalent bağlar ile fosfor atomuna bağlanması nedeniyle düşük elektronik iletkenliğe sahiptir ancak tabakalı ve spinel yapıda katot elektrot aktif malzemelere göre daha yüksek termal kararlılığa ve daha güvenli yapıya sahiptir.

Dördüncü bölüm'de Li iyon hücrelerinde olmazsa olmaz bir diğer bileşeni olan seperatörler anlatılmıştır. Seperatör, anot ve katot arasında fiziksel bir bariyer görevi görürken aynı zamanda iyonların serbestçe hareket etmesine olanak tanır. Bu ince, gözenekli yapı, çevrim testi sırasında oluşabilecek kısa devreleri önleyerek pilin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar. Seperatörün termal ve kimyasal stabilitesi, pilin genel güvenliği ve performansı için hayati önem taşır. Seperatörler temel olarak mikro gözenekli (mikroporoz), dokunmamış film (non-woven), katı elektrolit seperatörler (jel-polimer elektrolitler) ve kompozit seperatörler olarak ayrılırlar. Ticari olarak kullanılan seperatörler genellikle polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi polimerlerden yapılmaktadır. Bu malzemelerin düşük maliyeti, kolay ve yüksek hacimli üretim prosesleri (ıslak ya da kuru) ve iyi mekanik dayanımları onları yaygın bir tercih haline getirmiştir. Buna karşılık düşük gözeneklilikleri, düşük ıslanabilirlikleri ve düşük erime sıcaklıkları kullanım

In the third chapter, cathode active materials commonly used in Li ion cells are discussed. Cathode active materials are critical components for battery performance and limiting battery capacity. A cathode material that reaches the weight capacity exhibited by the graphite used as an anode has not yet been developed. Cathode active materials can be classified into three different crystal structures. The composition of LiMO_2 (M=Co, Ni, Mn, Al) has a layered structure and allows Li ions to move in two dimensions between the transition metal oxide layers during battery operation. On the other hand, layered cathode active materials have low cyclic stability due to weak interlayer bonds. In recent years, NMC (containing Nickel, Manganese and Cobalt) has been preferred as an alternative. Although, it has high capacity, this chemistry has to be further developed due to the safety risk of high nickel content plus unethical production conditions of cobalt worldwide, its availability in limited geography and high production costs. New chemistries (NMC, NCA, NMA, etc) containing higher Ni and lower or no Co are being investigated. The most important advantage of the LiMn_2O_4 composition in the spinel structure is Mn being much cheaper than Co, and this structure allows lithium diffusion in three dimensions. Although LiMn_2O_4 stands out with its features such as good charge/discharge performance at high currents, electrochemical reversibility, thermal stability and low cost, its low practical capacity and capacity retention compared to layered cathode electrode active materials constitute a significant obstacle for commercial applications. LiFePO_4 (LFP) chemistry has an olivine type crystal structure, provides Li ion diffusion in one dimension. This structure has low electronic conductivity due to strong covalent bonding between oxygen and phosphorus, higher thermal stability and a safer structure than layered and spinel structures.

In the fourth chapter, separators, another important component of Li ion cells, are explained. The separator acts as a physical and electrical barrier between the anode and cathode while allowing ions to move freely. This thin, porous structure ensures safe battery operation by preventing short circuits during cycles. The thermal and chemical stability of the separator is vital to the overall safety and performance. Separators are basically divided into microporous (microporous), non-woven film (non-woven), solid electrolyte separators (gel-polymer electrolytes) and composite separators. Commercially used separators are generally made of polymers such as polyethylene (PE) and polypropylene (PP). The low cost of these materials, easy and large-volume production processes (wet or

koşullarını sınırlamaktadır. Pil dünyasının artan enerji yoğunluğu gereksinimleri ve güvenlik standartları, yüksek sıcaklık direncine sahip, ıslatılabilirlik özellikleri geliştirilmiş ve daha yüksek mekanik dayanıklılık sunan kompozit seperatörlerin ihtiyacını artırmıştır.

Kitabın beşinci bölümünde Li iyon pillerin temel işleyişinde hayati bir rol oynayan elektrolitler yer almıştır. Bu özel sıvılar, şarj sırasında, lityum iyonlarının katottan anoda deşarjda ise tersi akışı sağlayan ortam görevi üstlenir. Elektrolitler organik sıvı (OSE), jel (JPE) ve katı (KHE) elektrolitler olarak sınıflandırılırlar. Ticari olarak kullanılan pillerin çoğunda sıvı elektrolit bulunur. Bu elektrolitte lityum heksafluorofosfat (LiPF_6) gibi bir lityum tuzu, etilen karbonat (EC) ve dimetil karbonat (DMC) karışımı gibi organik çözücülerde çözünür. Bu tür elektrolitler yüksek iyonik iletkenlik ve nispeten düşük maliyet gibi avantajlara sahip olsa da, yanıcılık ve koroziftirler. Lityum metali su ile hızla reaksiyona girip yanan bir metal olduğu için lityum tuzunun çözücüsü organik olmak zorundadır.

Altıncı bölüm, lityum iyon hücresinde anot ve katot aktif malzemelerden anot ve katot elektrot üretimini sağlayan polimerik bağlayıcıları ele almaktadır. Polimerik bağlayıcılar, elektrotların üretimi sırasında toz halindeki anot aktif malzemelerin bakır folyo veya yine toz halindeki katot aktif malzemelerin alüminyum folyo üzerine yayılıp kaplanmasını sağlamak için kullanılırlar. Bağlayıcılar toz partiküller arasında bağlayıcı yani tutkal görevi görürler. Aktif malzemeler ile bağlayıcılar bir araya geldiğinde viskoz bir çamur oluşur. Bu çamur içerisine elektrik iletkenliğini artırmak için iletkenlik sağlayıcı aktif karbon gibi tozlar katılır. Bağlayıcıların diğer bir özelliği de bu çamurun içerisine katılan anot/katot aktif malzeme ve iletkenlik yapıcı malzemelerin çamur içerisinde homojen dağılmasına yardımcı olmak ve çamurun viskozitesini koruyarak folyo üzerine homojen kalınlıkta kaplanıp folyo ile olan ara yüzeydeki yapışmayı sağlamaktır.

İlk altı bölümde lityum iyon hücredeki temel malzemeler tanıtılırken 7 ve 8. bölümde bu malzemelerin nasıl bir araya getirilip hücrenin üretildiğini, sonra hücrelerin bir araya getirilerek modülleri ve modüllerin bir araya getirilip batarya paketlerinin üretildiği anlatılmıştır.

Hücreden pakete batarya ve alt bileşenleri adını verdiğimiz 7. bölümde, öncelikle hücre, modül ve batarya paketi tasarımlarından bahsedilmiş, bu tasarımlarda yer alan malzemelerin ülkemizde üretilebilirliği incelenmiş sonunda ise pazar yapısından bahsedilmiştir. Türkiye’de üretilmekte olan ve üretilmesi planlanan Li iyon bataryalarda batarya yönetim sistemleri, kablolar vb. bileşenler yerli olarak tedarik edilebilmektedir. Li iyon hücrelerde ise henüz yerli bir bileşen bulunmamakla birlikte bu konudaki çalışmalar hızla devam etmektedir. Geliştirilecek ve seri üretimi yapılacak hücre bileşenlerinin yurtiçi satış miktarı düşük olsa bile bu ürünlerin stratejik ve yüksek ihracat potansiyeli bulunduğu bulunmaktadır. Li iyon pillerde kullanılan tüm alt bileşenleri

dry) and good mechanical strength have made them a common choice. On the other hand, their low porosity, low wettability and low melting temperatures limit their usage. Increasing energy density requirements and safety standards of the battery have also increased the need for composite separators having high temperature resistance, improved wettability and higher mechanical strength.

Chapter 5 of the book covers electrolytes. These special liquids act as a medium that allows lithium ions to flow from cathode to anode during charging and vice versa during discharge. Electrolytes are classified into organic liquid (LE), gel (JPE), and solid (KHE). Most commercially used batteries contain liquid electrolytes. In the electrolyte, a lithium salt (lithium hexafluorophosphate, LiPF_6) dissolves in organic solvents such as a mixture of ethylene carbonate (EC) and dimethyl carbonate (DMC). Since lithium metal reacts rapidly with water and burns, the solvent of the lithium salt must be organic. Although such electrolytes have advantages such as high ionic conductivity and relatively low cost, they also have high flammability and environmental risks.

Chapter 6 discusses polymeric binders are used to laminate anode active powder materials on copper foil or cathode active powder materials on aluminum foil for electrode production. Binders act as a glue. It forms a viscous slurry with conductive powders such as activated carbon. The other functions of binders are first to provide a well distribution of anode/cathode active and conductive powders on the foils ensuring homogenous thickness and adhesion on the foils.

In the first 6 chapters, basic components in Li ion cell are introduced. In the following 7th and 8th chapters how these materials are brought together to produce cells, modules, and battery packs.

In the 7th chapter, cell, module and battery pack designs are introduced and production potentials of the designs in our country is investigated. Finally, the battery market structure is discussed. Battery management systems, cables, etc. in Li ion batteries are being produced in Türkiye. Although there is no domestic main component (anode, cathode, separator, electrolyte, etc) producer in our country, initiatives are available. However, development of local producers and market in the country is important.

In the 8th chapter, cell-to-pack production technologies are examined. The production and quality control processes of cell, module and battery pack are explained. As the production and use of electric vehicles become widespread worldwide, cell production facility investments are also increasing worldwide. Added to cell manufacturing companies,



ve bu alt bileşenlerin hammaddelerinin yerli olarak üreten firmaların bir araya getirilerek dışa bağımlılığın azaltılması, ülkemizin kaynaklarının korunması, değerlendirilmesi ve geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Sekizinci bölümde ise hücreden pakete üretim teknolojileri incelenmiş hücre, modül ve batarya paketinin üretimi ve kalite kontrol süreçleri anlatılmıştır. Elektrikli araçların üretimi ve kullanımı dünya çapında yaygınlaştıkça dünya genelinde hücre üretim tesis yatırımları da artmaktadır. Hücre üreticisi şirketler dışında ülkemizde pek çok şirket modül ve batarya paket tasarım ve üreticisi olarak batarya ekosisteminde yerini almaktadır. Bu şirketler elektrikli araçlarla birlikte sabit (grid) ve diğer araç ve sistemlere yeni modül ve batarya paket çözümleri geliştirmektedirler. Batarya depolama sistemlerinin geliştirilmesi ve üretimi bu nedenle önemli ekonomik potansiyele sahip, gelecek vaat eden bir endüstri dalıdır. Son yıllarda elektrikli araç üreticilerinin modül ve paket üretimini kendi işletmelerinde gerçekleştirme motivasyonunda oldukları da gözlenmektedir.

Dokuzuncu bölümde bataryanın güvenilirliğini tesis için temel olarak elektrikli araç bataryasına uygulanacak testlerin neler olduğu, bu testlerin gerçekleştirilmesi için nasıl bir altyapıya ihtiyaç duyduğumuz ve bu altyapı ve standart yöntemlerin uygulandığı laboratuvarların akreditasyonu için süreçler irdelenmiştir. Batarya bileşenleri olan piller ve bunların bağlantıları, kullanım ömürleri boyunca farklı zorluklarla karşılaşacaklar ve sonuç olarak bozulacaklardır. Bu durum güvenlik koşullarını tehlikeye atabilir. Gerek batarya gerekse elektrikli araç üreticilerinin müşterinin en üst düzey beklediği güvenliği ve performansı üretilen batarya ve araçta sağladığını göstermesi şarttır. Hücreler ve batarya paketleri olumsuz koşullar veya olağandışı yükler altında ne kadar süre istenilen performansı göstereceklerini belirlemek, olası arızayı öngörmek ve/veya tanımlanan sınırlar içinde hücre performansını incelemek için elektrik, mekanik ve ısıl zorlamalar altında gerçek yaşamı simüle eden çok sayıda teste tabi tutulurlar.

Onuncu bölümde batarya geri dönüşüm prosesleri, dünyada ve ülkemizde var olan geri dönüşüm tesisleri, kapasiteleri ve gelecek senaryoları hakkında bilgi verilmiştir. Hammadde temini başta olmak üzere geri kazanım-dönüşüm sürecinde yaşanan teknik, bilimsel veya ekonomik zorluklar, Avrupa Birliği ülkelerinin uygulamış olduğu hammadde stratejileri, geri dönüşüm sürecine ait kısıtlar ve fırsatlar irdelenmiştir. Bu bölümde ayrıca, batarya kodlama ve batarya pasaportu hakkında genel bir çerçeve sunulmuştur.

Onbirinci bölümde elektrikli araç bataryalarının yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yaşam döngüsü aşamaları, sistem sınırları, fonksiyonel birimler ile ilgili yasal dayanaklar ve kısıtlar irdelenmiştir. Küresel iklim değişikliğinin etkilerinin giderek yaygın hale gelmesiyle yenilenebilir enerji kullanımına imkan tanıyan alternatiflerden biri olan elektrikli araçlarda bataryanın kullanım ömrü tamamlandıktan sonra

module and battery pack designer and manufacturer are growing. Plus, in recent years, it has been observed that electric vehicle manufacturers are motivated to produce modules and packages in their own enterprises. These companies are offering new module and battery pack solutions. The development and production of battery storage systems is therefore a promising industry with significant economic potential.

In the 9th chapter, the tests to be applied to the electric vehicle battery to establish the reliability of the battery, what kind of infrastructure we need to carry out these tests, and the processes for the accreditation of laboratories where this infrastructure and standard methods are applied. Batteries and their components will encounter different challenges throughout their lifetime and will eventually fail. This may compromise safety. Cells and battery packs are subjected to numerous tests that simulate real life extreme conditions. It is essential for both battery and electric vehicle manufacturers to demonstrate the highest level of safety and performance.

In the 10th chapter, battery recycling processes, existing recycling facilities in the world and in our country, their capacities and future scenarios are given. The technical, scientific or economic difficulties experienced in the recovery-recycling process, especially in the supply of raw materials, the raw material strategies implemented by the European Union countries, the constraints and opportunities of the recycling process are examined. This section also provides a general framework about battery coding and battery passport.

In the 11th chapter, the life cycle assessment (LCA) of electric vehicle batteries is examined by considering the life cycle steps, system boundaries, legal bases and restrictions regarding functional units. As the effects of global climate change become increasingly widespread, the battery in electric vehicles needs to be replaced after a certain lifespan. The battery used is either sent directly for recycling/disposal or continues to serve for secondary use. Therefore, it is important to examine and evaluate the environmental impacts of electric vehicle batteries.

The 12th chapter is an answer to the question of what is happening in the electric vehicle world. Automotive industry's views, strategies and future predictions on this new transformation are compiled. Thanks to the initiatives in our country, electric vehicle production has been realized. With the production of electric vehicles, the ecosystem supporting this production has begun to form and various supports continue for the continuity of the ecosystem. What needs to be done in order for this ecosystem to develop and



değiştirilmesi gerekmektedir. Değiştirilen batarya ya doğrudan geri dönüşüme/bertarafa gönderilmekte ya da ikincil kullanım olarak hizmet etmeye devam etmektedir. Dolayısıyla elektrikli araç bataryalarının çevresel etkilerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Onikinci bölüm, elektrikli araç dünyasında neler oluyor sorusuna yanıt niteliğinde olup, otomotiv endüstrisinin bu yeni dönüşüme bakışları, stratejileri ve gelecek öngörülerini derlenmiştir. Ülkemizde devlet tarafından desteklenen girişim sayesinde, elektrikli araç üretimi gerçekleştirilmiş ve bu pazarda varlık gösterilmiştir. Elektrikli araç üretimi ile birlikte, bu üretimi destekleyen ekosistem oluşmaya başlamış ve ekosistemin sürekliliği için çeşitli destekler devam etmektedir. Bu ekosistemin gelişerek sürdürülebilir hale gelmesi ile ülkenin pazardaki hakimiyetinin güçlenmesi ve ülkemizin yeni teknolojilerin kullanıcısı olmaktan çıkıp, tasarımcısı ve üreticisi olması yönünde güçlenmesi için yapılması gerekenler tartışılmıştır.

Onüçüncü bölümde batarya şarj istasyonları ve altyapısının elektrikli araçların yaygınlaşmasındaki rolü değerlendirilmiş, ülkemiz ve dünyadaki şarj altyapısı, şarj süresi, araç fiyatlandırma ve menzil ölçüğü değerlendirilmiştir. Şarj altyapısına verilen önem dikkate alınarak elektrikli araç şarj istasyonları ve altyapısı, şarj istasyonlarının elektrikli araç kullanımının yaygınlaşmasındaki rolü ve elektrik şebekesi ile etkileşimlerinde ortaya çıkan zorluklar ve fırsatlar incelenmiştir.

Ondördüncü bölümde lityum sonrası bataryalarda hangi malzeme ve üretim teknolojilerine yönelik araştırma geliştirme çalışmalarının yapıldığını, bu teknolojilerin hangi seviyede var oldukları ele alınmıştır.

Son söz bölümünde ise özellikle ülkemizin elektrikli araçlarda lityum iyon batarya ve diğer batarya teknolojilerinde ve hatta diğer ileri teknoloji gerektiren alanlarda söz sahibi olması için neler yapılması gerektiğinin bir değerlendirmesi sunulmuştur. Bu değerlendirme de güçlü ve zayıf yönlerimiz, tehditlerimiz ve fırsatlarımız sıralanmıştır.

İnancımız o'dur ki, hangi teknoloji olursa olsun değer zincirinin her noktasında "bilgelige aşık olan insan" yer almalıdır. Bizler bu kitabın yazarları olarak bu aşka verdiğimiz değeri ortaya koyduğumuzu düşünüyor ve bu yolda birlikte yürüyecek aşıkları bu topluluğa üye olmaya ve böyle sivil insiyatiflere katkı sunmaya davet ediyoruz.

Saygılarımızla,

OTEP Batarya Çalışma Grubu

become sustainable, to strengthen the country's dominance in the market, and to strengthen our country from being a user of new technologies to being a designer and producer, has been discussed.

In the 13th chapter, the role of battery charging stations and infrastructure is evaluated. And the charging infrastructure in our country and in the world is evaluated in terms of charging time, vehicle pricing and range. Considering the importance given to charging infrastructure, the challenges arising its interaction with the electricity grid are also examined.

In the 14th chapter, materials and production technologies for beyond lithium batteries are summarized.

At last, an evaluation is made using SWOT analyses (strengths, weaknesses, opportunities and threats) considering Li ion batteries and other battery technologies.

Human who has love for wisdom is precious for any value chain. We, as the authors of this book, believe that we have demonstrated the value we place on this love, and we invite all lovers who would like to walk on this path together.

Best of our regards,

OTEP Batarya Çalışma Grubu



İçindekiler

GİRİŞ	1
BÖLÜM 1. MADEN REZERVLERİ VE ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	17
BÖLÜM 2. ANOT MALZEMELERİ	85
BÖLÜM 3. KATOT MALZEMELERİ	103
BÖLÜM 4. SEPERATÖR MALZEMELERİ	129
BÖLÜM 5. ELEKTROLİTLER	151
BÖLÜM 6. POLİMERİK BAĞLAYICILAR	175
BÖLÜM 7. HÜCRE DEN PAKETE: BATARYA VE ALT BİLEŞENLERİ	187
BÖLÜM 8. HÜCRE DEN PAKETE: BATARYA ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ	231
BÖLÜM 9. BATARYA GÜVENLİĞİ, TEST VE SERTİFİKASYON	271
BÖLÜM 10. BATARYA İZLENEBİLİRLİK VE GERİ DÖNÜŞÜM	287
BÖLÜM 11. BATARYALARIN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ	303
BÖLÜM 12. SEKTÖREL BAKIŞ: ELEKTRİKLİ ARAÇLAR DÜNYASI	325
BÖLÜM 13. SEKTÖREL BAKIŞ: ŞARJ İSTASYONLARI VE ŞEBEKE YÖNETİMİ	347
BÖLÜM 14. GELECEĞE BAKIŞ: LİTYUM İYON SONRASI	387
SON SÖZ	407
YAZARLARIMIZ	411
KISALTMALAR LİSTESİ	423



LİTYUM İYON BATARYALARIN İNOVASYON YOLCULUĞU

Ö. Keleş¹[+], B.D. Karahan¹[+], K.C. Bayar² [+]

ÖZET

Elektrikli araçlar benzinli veya dizel araçlardan daha mı az yakıyor? Elektrikli araç alsak mı? Nasıl çalışıyor bunlar? Alacaksak, hangisini alsak? Lityum iyon bataryalı olanlar hangileri acaba? Menzili ne kadar acaba? Nerede şarj edeceğim? Şarj süresi ne kadar? Telefonlar gibi patlarlar mı? Tehlikesi var mı? Alsak batarya bitince ne yapacağız? Hatta sorularımız biraz daha derinleşip, bizim üniversitelerimiz, enstitülerimiz, laboratuvarlarımız ve endüstrimiz neler yapıyor? Biz bu bataryayı üretebilir miyiz? Biz bu konularda öncü olabilir miyiz? Öncü olmak için kimler, neler yapılmalı?...

Bu sorular son günlerde pek çok insanın aklında, pek çok haberde, sosyal medyadaki iletişimlerde, kamuoyunda soruluyor ve konu ediliyor. Dahası biraz daha teknoloji irdelenmek istendiğinde ülkemizde ve dünyadaki cevherler, metaller, batarya ve araç üreticileri, araçlar sorgulanıp sağlıklı verilere dayanmayan yorumlar yapılabiliyor.

Otomotiv Teknoloji Platformu (OTEP) Batarya Çalışma Grubu temel kamu kuruluşlarında, üniversitelerde, sanayide ve sivil toplum örgütlerinde batarya teknolojisi hakkında bilgi ve uzmanlık sahibi olan gönüllü üyelerin ülkemizde konuyla ilgili paydaşları aydınlatmak ve temiz bir bilgi sunarak gelecek çalışmalara zemin oluşturacak alt yapıyı oluşturmak için bir araya gelmesiyle oluşmuştur. Bu güzel insanların bir arada bulunması ile kısa sürede ortaya koydukları en önemli çıktı okuyacağınız bu kitaptır. Bu kitapta, madencilikten, malzeme kimyasına, batarya üretim ve test teknolojilerinden geri dönüşüme kadar birçok bilgi farklı çerçevelerden analiz edilerek hazırlanmıştır. Bu kitabın amacı ulaşılabilir kaynaklardan elde edilen bilginin, tecrübeli uzmanların incelemelerinden geçtikten sonra görüşlerinin en açık ve yalın bir dille ilgili paydaşın bilgisine sunulmasıdır. Böylece orta vade de hem batarya üzerine araştırma yapan uzman ve ilgililerin kamuoyu tarafından tanınırlığı sağlanacak, hem de camianın birbiri içerisinde tanışıklığı artarak daha organize ve büyük batarya araştırma ve çalışma gruplarının oluşumunun önü açılacaktır. Bu kitap ile ana dilimizde yazılmış batarya konusunda hızla gelişen kaynakçaya destek verilecek, gelecek nesillerin batarya teknolojisi hakkında bilgilenmesi sağlanarak uzun vadede ülkemizin entelektüel sermayesinin gelişmesi için fırsat oluşturulacaktır.

Bir ürünün oluşumunda kavramsal tasarımın başlangıcı ve gelişiminin oldukça önemli olduğu bilinciyle kitabın bu bölümünde ilk olarak lityum iyon bataryanın (Li iyon batarya, LIB) bilim ve teknoloji tarihi ele alınmıştır. Daha sonra bu ürünün bilim dünyasındaki araştırma geliştirme çalışmaları ve elektrikli araç teknolojisinin gelişiminde ülkelerin rolleri ve stratejileri değerlendirilmiş son olarak da Li iyon batarya ve elektrikli araç teknolojilerindeki darboğaz ve bu darboğazlardan çıkış yolları değerlendirilmiştir.

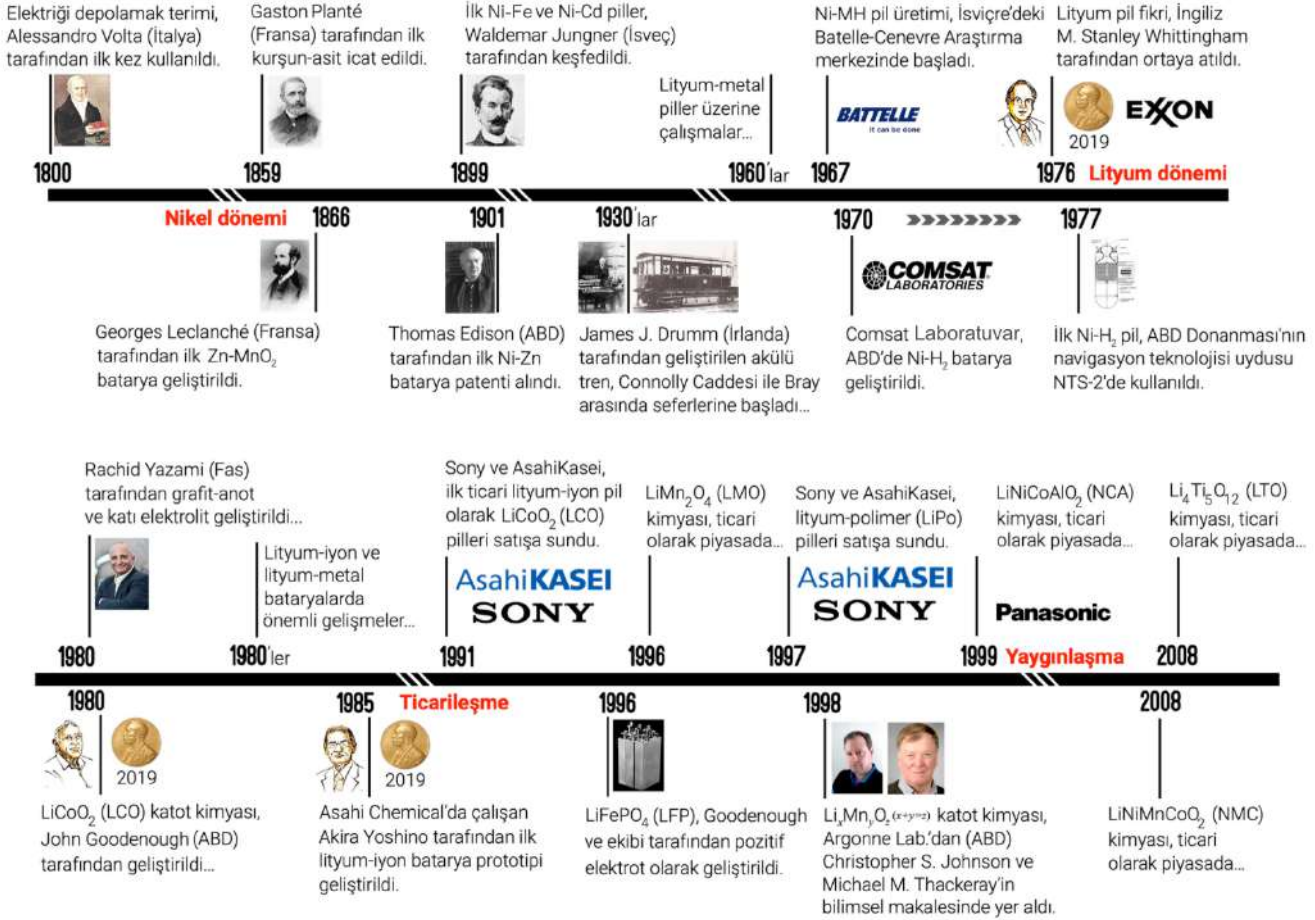
[+] ozgulkeles@itu.edu.tr, bdkarahan@itu.edu.tr, can.bayar@everinovasyon.com.tr

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye.

2 EVER İnovasyon ve Teknoloji AŞ, Sarıyer, 34450 İstanbul, Türkiye.

Li iyon Bataryanın (LİB) İnovasyonunda Mihenk Taşları (Int. Kyn. 1)

Volta ile başlayan batarya yolculuğuna lityumun yolculuğa katılması 1960'da OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries) teşkilatının kurulması ve ardından 1970'lerde Exxon firmasında görev alan bilim insanlarının 2000'li yıllarda petrol üretiminin zirve seviyelere ulaşip sonra durağanlaşacağı öngörüsü ile aldıkları aksiyonlarla gerçekleşmiştir. Bu öngörü ışığında 1970'li yıllarda Exxon şirket yöneticileri, farklı enerji kaynaklarını araştırmayı stratejik hedef olarak belirlemiştir. 1972'de Exxon'da çalışmaya başlayan M. Stanley Whittingham araştırmalarına başlamış ve TiS_2 katot ve lityum anottan oluşan ilk 2,4 V'luk lityum iyon bataryayı (LİB) üretmiştir. Exxon bu buluşunu önce İsviçreli kol saati firması olan Ebauches SA'ya ardından Asya, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki (ABD) üç firmaya lisanslamış sonra da bu teknolojiye daha fazla yatırım yapmama kararı almıştır (Bknz. Şekil 1).



Şekil 1. Batarya teknolojilerinin iki yüzyıllık tarihinde mihenk taşları.

Tarihteki ikinci önemli adım 1980'li yıllarda John Goodenough ve Koichi Mizushima'nın birlikte LiCoO₂ katot içeren 4V'luk LİB tasarımı ile gerçekleşmiştir. Sonrasında ise Asahi Chemical'da çalışan Akira Yoshino başlattığı araştırmalarında karbon malzemesini anot olarak Goodenough ve Whittingham'ın katotlarına karşı kullanarak LİB'nin daha güvenli hale gelmesini başarmıştır. Asahi Chemical'da yönetici konumundaki Isao Kuribayashi'nin rolü de oldukça önemlidir. Kuribayashi, bataryanın imalatı ile ilgili araştırmaları esnasında savaş uçakları, füze siloları ve kuyu içi sondaj kuleleri için batarya üreten Boston'da yerleşik Battery Engineering isimli küçük bir firmayı bulmuş ve firmadaki doktoralı bilim insanları ve firma kurucusu Nikola Marincic ile tanışıp ilk silindirik hücrenin imalatının gerçekleşmesini sağlamıştır. Her ne kadar Kuribayashi iki hafta içinde 30.000 \$ vererek 200 adet silindirik hücre ile ülkesine dönsün de Asahi Chemical yöneticileri henüz tam olarak bilinmeyen bir işin içine girmek istememişler ve büyük bir fırsatı kaçırmışlardır.

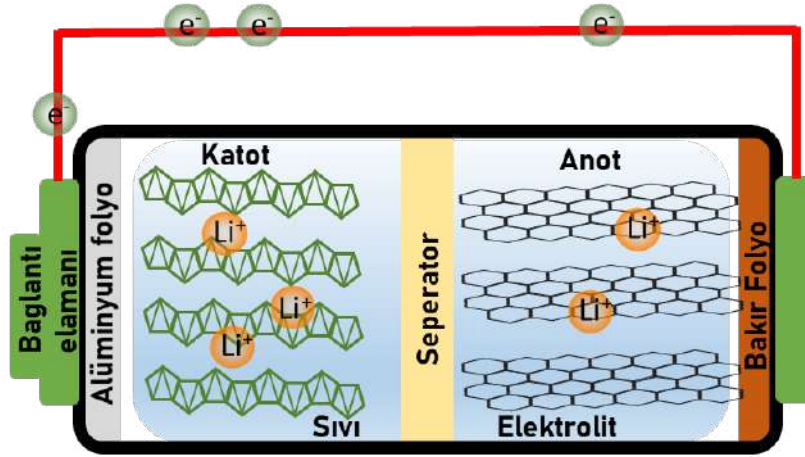
Bu duruma rağmen Kuribayashi vazgeçmemiş ve 1987 yılında Sony şirketinin kamera üretim bölümünü ziyaret edip onlara elindeki silindirik hücreyi göstermiştir. Sony yetkilileri kendi pazarlarındaki ihtiyacı bildikleri için bu yeniliğe gereken değeri vermişlerdir. Onlar için çok büyük fırsatları aralayacak olan bu yeniden şarj edilebilir pili Sony 2 yıl içerisinde pilot ölçekten ticari ürüne dönüştürüp, Goodenough'ın patentini finanse eden Harwell'deki Atomic Energy

Research Establishment (AERE) ile anlaşarak, 1991 yılında, bugün lityum iyon (Li iyon) olarak bilinen tekrar şarj edilebilir bataryaları pazara sunmuşlardır.

Bu inovasyon yolculuğunda, patent süresi doluncaya kadar Sony ve AERE milyar dolarlar kazanırken maalesef buluşçuları ve Asahi Chemical hiçbir maddi kazanç sağlayamamış ve bazı şirketler de bu fırsatı kaçırmışlardır. Bu yolculuğun devamında, biraz geçte olsa Akira Yoshino, John Goodenough ve M. Stanley Whittingham bilim ve insanlık dünyası adına paha biçilmez olan 2019 Kimya Nobel ödülünü kazanmışlardır. Kameralarda başlayan bu yolculuk şimdi hemen hemen her taşınabilir cihazda ve elektrikli araçlarla devam etmektedir.

Li iyon Hücre ve Batarya Bileşenleri ve Çalışma Mekanizması

Batarya elektrikli cihazlara güç sağlamak için kullanılan harici bağlantılara sahip bir veya daha fazla elektrokimyasal hücreden oluşan bir araçtır. Bu hücrelerin içerisinde anot, katot, elektrolit, seperatör bileşen olarak yer alır. Anot ve katotlar geleneksel üretim yöntemi olan laminasyon teknolojisi ile üretilir. Anot için anot aktif malzeme, iletken malzeme, bağlayıcı ve solventten oluşan çamur bakır folyo üzerine film şeklinde sıyırılarak kaplanır ve kurutulur. Katot için ise katot aktif malzeme, iletken malzeme, bağlayıcı ve solventten oluşan çamur karışımı alüminyum folyo üzerine kaplanır. Bir Li iyon pil hücresi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Li iyon pil hücresi.

Li iyon piller yapısında bulunan lityum iyonlarının iki elektrot arasında hareket etmesi sebebiyle tekrar şarj edilebilir özelliktedir. Pilin kullanımı sırasında lityum iyonları anottan katoda geçerler, yani elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu elektronlar çıkar ve devreden akım geçer. Şarj esnasında ise dışardaki bir güç kaynağından hücreye elektron verilir ve katotta oluşan reaksiyonlar ile lityum iyonları anoda geçerler. Anot aktif malzeme olarak genellikle ticari olarak grafit, katot aktif malzeme olarak lityum içeren metal oksit ve fosfat esaslı bileşikler (LiFePO_4 , LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiMnO_2 , LiMn_2O_4 , LiNiMnCoO_x (NMC)) kullanılır.

Li iyon pillerin keşfinden bu yana pek çok malzeme geliştirildiğinden nesillerle ifade edilen anot-katot malzeme kombinasyonları oluşmuştur. Tablo 1’de verilen Li iyon pil kimya dünyası bundan sonra ne olacağına bakmak için iyi bir başlangıç noktası niteliğindedir. 0 noktası başlangıç noktası olup, bu kimya, Sony'nin 1991’de ilk lityum şarj edilebilir hücre olarak geliştirdiği ve Goodenough, Whittingham ve Yoshino'nun 2019 yılı Kimya Nobel ödülü kazandığı ilk ticarileşmiş formülü içermektedir. Hali hazırda Li iyon pil kimyası olarak elektrikli araçlarda YE-NMC (High Energy Nickel, Manganese Cobalt, Yüksek Enerjili Nikel Mangan Kobalt) olarak bilinen 3a ve 3b nesil kullanım bulmakla birlikte bazı firmalar güvenlik ve bulunabilirlik açısından tasarımlarında 1. nesil kimyaları da kullanmaktadır. Günümüzde Li iyon hücrede hedef özellikle kobalt ve nikel azaltmak (NMC 955, Ni9 Mn 0,5 Co 0,5 ağırlık oranları) ve hatta kobaltsız kimyalara doğru yönelmek olduğundan, 2030’dan sonra 4. nesil bir kimya oluşumundan önce bir 3c neslinin ortaya çıkabileceği öngörülmektedir.

Günümüzde en yaygın olarak hücrede anot ve katot aktif malzemelerin akım toplayıcıları ile buluşmaları için elektrotların hazırlanması laminasyon tekniği ile sağlanmaktadır. Bu teknikte anot veya katot aktif toz malzemeler, iletkenlik sağlayıcı aktif karbon toz, akışkanlık sağlayıcı solvent ve bağlayıcı polimer ile karıştırılarak çamur oluşturulur, ardından çamur metalik folyo üzerine yayılarak kurutulur ve haddelenir. Bir başka deyişle grafit içeren çamur bakır folyo üzerine, seçilen katot aktif malzeme (LiFePO_4 , LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiMnO_2 , LiMn_2O_4 , LiNiMnCoO_x (NMC) gibi) içeren çamur ise alüminyum



folyo üzerine kaplanır. Bu sayede hücrede elektron transferi, yani akımın taşınması sağlanır. Şekil 3’de bir Li iyon bataryada genel olarak yer alan malzemeler ve bunların basit üretim akış şemaları verilmiştir.

Tablo 1. Nesillerle ifade edilen Li iyon batarya kimyaları (Int. Kyn. 2).

Nesil	Hücre Kimyası	
	Katot	Anot
5. Nesil	Li ₂ O ₂ , LiO ₂ (lityum hava)	
4. Nesil	Li-S	Katı hal + Lityum
3b. Nesil	YE-NMC, HVS (yüksek voltaj spinel)	Karbon + Silisyum
3a. Nesil	NMC622→NMC811	Karbon + Silisyum (%5-10)
2b. Nesil	NMC532 → NMC622	%100 Karbon
2a. Nesil	NMC111	%100 Karbon
1. Nesil	LFP, NCA	%100 Karbon
0. Nesil	LCO	Grafit

Hücreler farklı şekilsel özelliklerde üretilebilirler: düğme, silindirik, prizmatik ve kese tipi. Silindirik, prizmatik ve kese tipi hücreler seri ve paralel bağlanarak biraya getirilip ısı, kuvvet ve vibrasyon gibi dış etkenlerden korunacak şekilde bir kılıfa konulduklarında batarya modülleri oluşur. Bu modüller seri ve/veya paralel bağlanarak ve kontrol, koruma ve enerji yönetim sistemleri ile entegre edilerek batarya paketleri oluşur. Batarya paketleri enerji yönetimini sağlamak üzere sensörler ve elektronik kartlara, bataryalar çalıştığında oluşan ısının uzaklaştırılmasına yönelik soğutma sistemine, bunları yönetecek yazılıma, enerjinin iletimi için kablolar, baralar ve oluşan tüm sistemi çevreden gelebilecek olası tehlikelerden korumak (darbelerden, titreşimden vd.) için dayanıklı bir kılıfa sahiplerdir.

Bu hücrelerin üretiminde giga fabrikaların kullanımı uzun vadede üretim ekonomisi için avantaj sağlamaktadır. 2023 itibarıyla giga fabrikalarda üretilen hücrelerin pazardaki değeri 120 milyar \$’ı bulmaktadır. Hücre üretim maliyeti batarya üretiminde ciddi bir paya sahiptir. Aynı zamanda hücre üretimi bataryaya ait karbon ayak izinde de oldukça ciddi bir etki yapar. Bu sebeple gerek elektrot aktif malzeme kimyalarının seçimi, üretimi gerekse de batarya üretimi sırasında kullanılan makine ve prosesler dikkatle seçilmelidir. Günümüzde kuru elektrot üretimi, lazerle kesme/kurutma, otomasyonun elektrot üretimine entegrasyonu gibi maliyeti düşürme, verimi ve kaliteyi artırma adına yapılan çalışmalar da mevcuttur.

Elektrikli Araç Nedir?

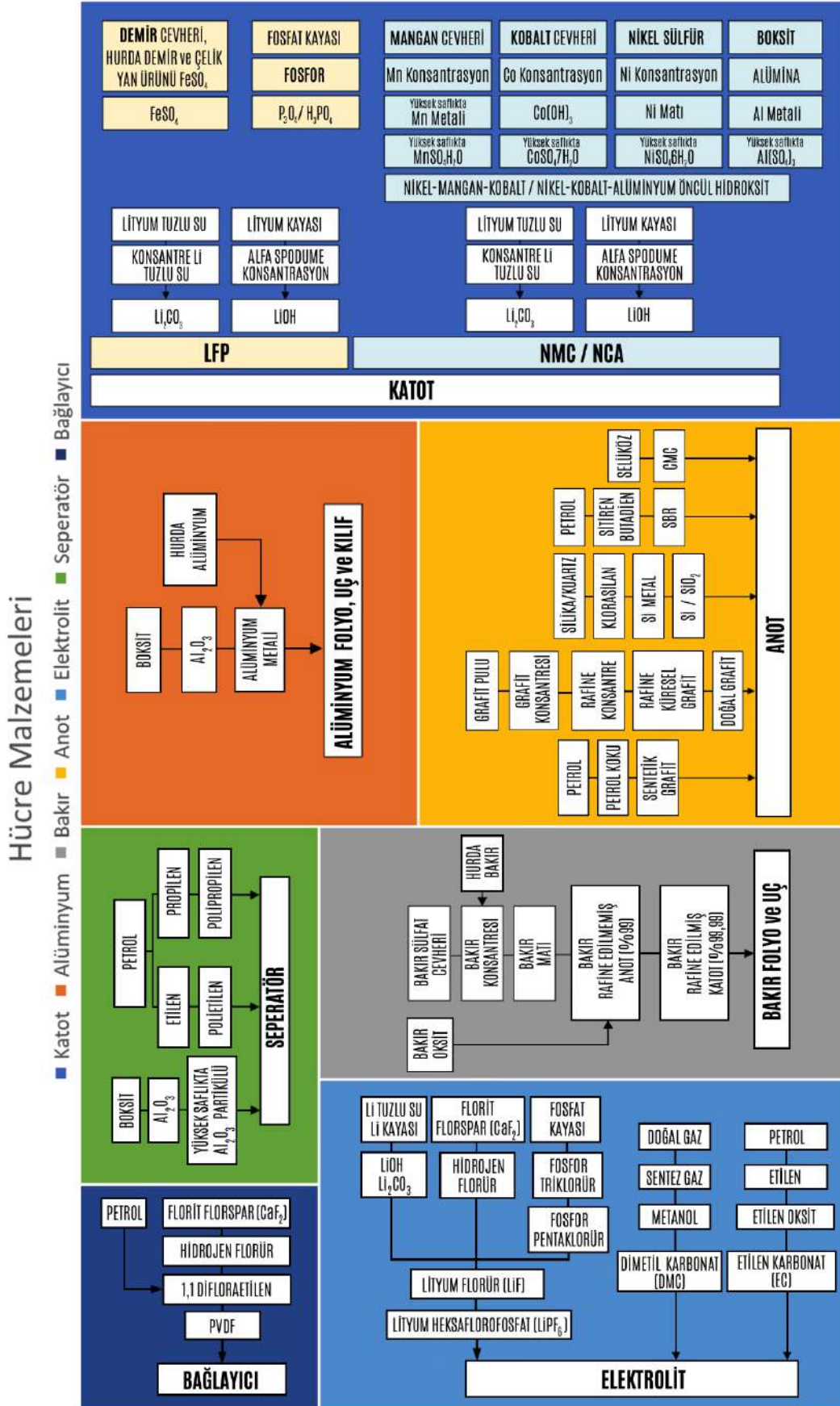
Elektrik enerjisi ile hareket kabiliyetine sahip araçlara elektrikli taşıt, elektrik ile hareket eden otomobillere ise Elektrikli Araç, EA, (Electric vehicle, EV) adı verilir. Bazı yayınlarda elektrikli araç kavramı elektrikli otobüs, kamyon, mobilet, motorsiklet, deniz araçları içerse de, temel olarak elektrikli araçlar, kısmen veya tamamen elektrikle çalışan otomobillerdir. Elektrikli araç, elektrik enerjisini bir batarya paketindeki pillerden alan, tahrik yani aracın harekete geçmesi için bir veya birden fazla elektrik motoru içeren ve motordan veya harici bir kaynaktan şarj edilebilen araç olarak tanımlanabilir.

Elektrikli araç, elektrikle çalışan ve içten yanmalı motor içeren geleneksel otomobillere göre daha az sayıda hareketli parçaya sahip olması nedeniyle minimum bakım giderine sahip olan ve kullanımı sırasında çok az ya da hiç fosil yakıtı (benzin veya dizel) ihtiyaç duymaması nedeniyle kullanım boyutu ile ekolojik açıdan faydalı olan bir araçtır.

Bazı elektrikli araçlarda kurşun asit veya nikel metal hidrit piller kullanılırken, Li iyon piller genellikle elektrikli araçlar için standart olarak kabul edilir, çünkü bunlar daha uzun bir ömre sahiptirler. Yalnızca aylık %0,5 ile %3’lük kendi kendine deşarj olma oranıyla da enerjiyi koruma konusunda oldukça iyidirler.

Elektrikli araçlar, gazlı/benzinli araçlara göre % 90 daha az hareketli parçaya sahiptirler. Bir elektrikli aracın çalışır durumda kalmasını sağlayan bileşenler;

- Elektrik motoru/motor: Tekerlekleri döndürmek için gerekli torku sağlar. Doğru Akım (Direct Current, DC) veya Alternatif Akım (Alternating Current, AC) ile çalışırlar; ancak AC motorlar daha yaygındır.
- İnvörtör/sürücü: Doğru akımı alternatif akıma dönüştürür.



Şekil 3. Li iyon batarya malzemeleri ve üretim akışları.

- Aktarma organları: Elektrikli araçlar gücü motordan tekerleklere aktaran aktarma organı sabit bir vites kutusuna sahiptir.
- Batarya: Elektrikli araca güç sağlamak için gereken elektriği depolayan sistemdir. Depolanan miktar ne kadar çok olursa, elektrikli aracın menzili de o kadar yüksek olur.
- Şarj Aleti: Pilinizi şarj etmek için gerekli taşınabilir/taşınmaz Enerji Depolama Sistemi'dir (EDS) yani güç kaynağıdır.

Elektrikli Araç (EA- Electric Vehicle, EV) Çeşitleri

Genel olarak her türlü araç, elektrikli güç aktarma organlarıyla donatılabilir. Bunlar, elektrifikasyonun araçlar için neler başarabileceğinin üç önemli örneğidir.

Hibrit Elektrikli Araç, HEA (Hybrid Electric Vehicle, HEV)

HEA'lar hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoruyla çalışır. Batarya, tüm enerjisini rejeneratif (frenleme sırasında kaybedilen enerjiyi kazanıp hızlanma sırasında kullanmak) frenlemeden kazanır ve içten yanmalı motora yardımcı olur. Bu frenleme enerjisi genellikle standart bir içten yanmalı motorlu aracın fren balatalarında ve rotorlarında ısı olarak boşa harcanmaktadır. Normal hibritler şebekeye bağlanarak şarj edilemez.

Gerek bu raporda gerekse literatürde; elektrikli aracın tanımı yapılırken elektrik şebekesiyle bağlantısı göz önüne alınarak; BEA ve FHEA araçların toplamından bahsedilmektedir. HEA'ları elektrikli araç geçiş sürecindeki bir kilometre taşı olarak görmekteyiz, bu sebeple raporda özelleştirilmiş bir değerlendirme yapılmayacaktır.

Fişli/Soketli Hibrit Elektrikli Araç, FHEA (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)

Fişli hibrit elektrikli araçlar hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoruyla çalışır. Geleneksel hibritler gibi, rejeneratif frenleme yoluyla pillerini şarj edebilmektedirler. FHEA'lar, HEA'lara kıyasla büyük bir bataryaya sahip olmaları ve şebekeye bağlanarak yeniden şarj edilebilmeleri açısından sıradan hibritlerden farklılık göstermektedir. Normal hibritler, benzinli motor devreye girmeden önce 3-5 kilometre gidebilirken, FHEA'lar, benzinli motor devreye girmeden önce 25-80 km yol kat edebilmektedirler. Tamamen elektrikli menzil azaldığında, FHEA'lar aynı zamanda geleneksel hibritler gibi davranıp, tek bir depo benzinle yüzlerce kilometre yol kat edebilmektedirler (Int. Kyn. 3).

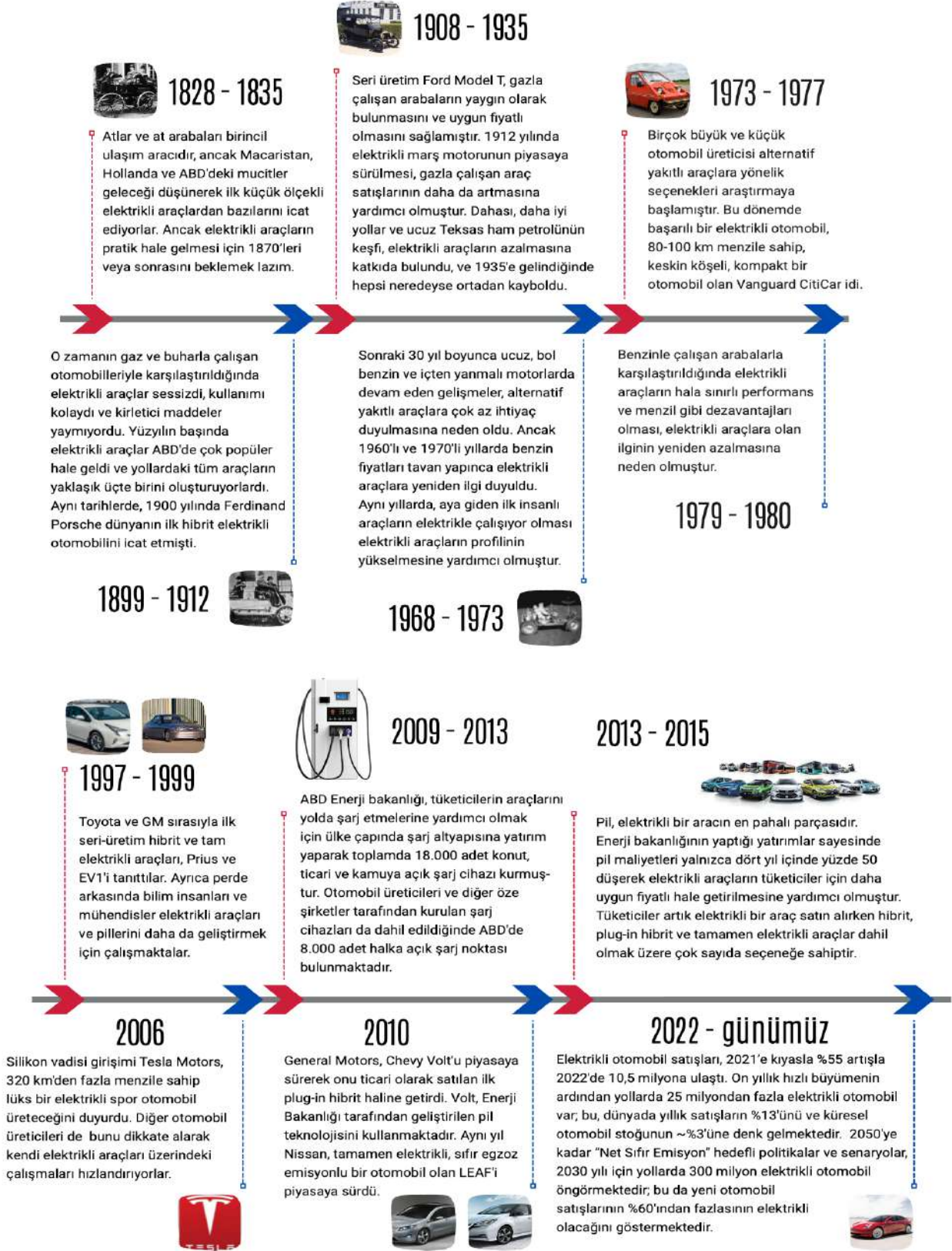
Bataryalı Elektrikli Araç, BEA (Battery Electric Vehicle , BEV)

BEA'lar, tamamen elektrikli, şarj edilebilir pillere sahip olan ve içten yanmalı motoru olmayan araçlardır. Şebekeden şarj edilen batarya paketi aracın tüm enerjisini sağlamaktadır. BEA'lar, tipik benzinle çalışan araçlar gibi kullanım sırasında tehlikeli egzoz emisyonları veya hava kirliliği tehdidi oluşturmadıkları için sıfır emisyonlu araçlardır.

Li iyon Batarya İçeren Elektrikli Araçların İnovasyonunda Mihenk Taşları

Günümüzde piyasalarda bulunan Li iyon bataryalar hali hazırda kendini kanıtlamış olmaları, elektrikli araçların fosil yakıtla çalışan içten yanmalı araçlara alternatif olabileceğini göstermektedir.

Li iyon bataryanın araçlarda kullanım serüveni incelendiğinde kullanımlarının öncelikle fosil yakıt ile birlikte çalışan hibrit veya fişli hibrit modellerde gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 4). İlk olarak 2009 yılında Hyundai, Elentra PLI hibrit modelinde lityum polimer batarya (sıvı elektrolit yerine polimer elektrolit kullanılan Li iyon batarya) kullanmıştır (Int. Kyn. 4). Daha sonra Mercedes Benz S400 Blue Hybrid modelinde sıvı elektrolit içeren Li iyon batarya kullanılmaya başlanmıştır (Int. Kyn. 5). Honda 2010 ve Toyota ise 2011 yılında Li iyon bataryayı hibrit modellerinde kullanmışlardır. İlk fişli hibrit araç modeli olan, General Motors tarafından üretilen Chevrolet Volt modelinde US DOE (Department of Energy, Amerikan Enerji Bakanlığı) tarafından desteklenen Argonne National Laboratuvarlarında geliştirilen LiB kimyası kullanılmıştır (Int. Kyn. 6). Li iyon bataryanın arabalardaki içten yanmalı motorları devre dışı bıraktığı ilk model 2008 yılında Tesla Motors tarafından üretilen Roadster olmuş ve bundan sonra başta Tesla Motors olmakla birlikte hemen hemen her içten yanmalı araç üreticisi araç filolarına elektrikli araçları dahil etmeye başlamıştır (Int. Kyn. 7). 2015 yılında üretilen bataryaların çoğunluğu ev aletlerinde kullanılırken, yalnızca % 40'ı binek araçlarında kullanılmıştır. 2022 yılında ise üretilen bataryaların % 68'i binek araçlarda kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 4. Elektrikli araçların iki yüzyıllık gelişimi.

Li iyon Bataryanın İnovasyon Yolculuğunda Ülke Stratejileri

Elektrikli araç inovasyonunda 100 yıl önce sahip olunan motivasyon 2000'li yıllarda ortaya çıkabilecek petrol rezervlerindeki olası kıtlık iken, bugün iklim değişikliğine bağlı olarak yaşanabilecek felaketlere karşı önlem alma çabası ağır basan motivasyonu oluşturmaktadır. Bu kısıta bağlı yapılan analizlerde fosil yakıt kullanan araçlara alternatif olarak elektrikli araçların vadettiği sıfır emisyon, araçlarda kullanılan enerji depolama teknolojileri üzerinde yapılan araştırma-geliştirme çalışmalarının artmasına neden olmuştur. Elektrikli araçlarda enerji depolama için kullanılan alternatif teknolojiler içerisinde Li iyon piller, sahip oldukları yüksek enerji yoğunlukları, çevrim ömürleri ve raf ömürleri ile dikkat çekmişlerdir. Li iyon batarya konusunda önde olan ülkeler, Japonya, Çin, Güney Kore, Amerika Birleşik Devletleri'dir. Son yıllarda Avrupa Birliği'nde oyun alanına girmek için stratejik hamleler yapmaya başlamıştır. Stratejiler ve taktikler, ülkelerin gelişmişliklerinde önemli rol oynadığı bilinmektedir. Bugün gelinen noktada bazı devletlerin Li iyon batarya, elektrikli araç teknolojisi ve pazarındaki üstünlükleri yıllar önce çıktıkları yolu belirleyen inovatif strateji ve taktiklerinin bir sonucudur.

Japonya Devlet Stratejileri

Japon devleti elektrikli araç stratejilerini hibrit teknolojilerini hedefleyerek kurgulamışlardır. Japonya Ticaret ve Sanayi Bakanlığı (MITI) 1976 yılında kurşun asit akü içeren elektrikli araç pazarının genişlemesini hedeflediğini belirten 10 yıllık program yayınlamıştır (Patchell, 1998). 1992 yılında, Lityum Pil Enerji Depolama Teknolojisi Araştırma Derneği (LIBES), 'Dağınık Pil Enerji Depolama Teknolojisi' üzerine araştırma ve geliştirme çalışmaları yürütmeye başlamıştır. Bu ulusal proje, Endüstriyel Bilim ve Teknoloji Ajansı (AIST) ve Uluslararası Ticaret ve Sanayi Bakanlığı'nın (MITI) 'Yeni Güneş Işığı' ('New Sun-Shine') Programı ile ilişkili olarak kurgulanmış, Yeni Enerji ve Endüstriyel Teknoloji Geliştirme Örgütü (NEDO) ile yapılan sözleşmeye dayalı olarak yürütülmüştür. Yaklaşık 14 milyar Yen bütçeli on yıllık bu Ar-Ge projesi hem lityum ikincil pillerin Ar-Ge'sini hem de lityum pil uygulama teknolojisinin sistemi hakkında bilgi edinmeyi hedeflemiştir. Bu proje ile Shin Kobe Electric Machinery'nin ürettiği batarya 2001'de Nissan Hipermini'de kullanılmıştır (Ahman, 2006).

MITI'nin elektrikli araçlarla ilgili yapmış oldukları stratejik hedeflerin gerçekleşmesi, ekosistemin oluşması ve sürekliliğinin sağlanması için kendine bağlı olan Yeni Enerji ve Endüstriyel Teknoloji Geliştirme Organizasyonu (NEDO), Japon Elektrikli Araç Birliği (JEVA) ve Japon Otomotiv Araştırma Enstitüsü (JARI) ile birlikte hareket etmektedir. NEDO, "yeni enerji"nin geliştirilmesine yönelik araştırma ve pazar desteği için parayı doğrudan veya dolaylı olarak JARI aracılığıyla şirketlere ve üniversitelere aktarmakla yükümlüdür. JEVA ise araçların yaygınlaşması için sunulan pazar desteği konusunda yapılan çalışmaları yürütmektedir (Ahman, 2006). Japonya'da kurulu olan ve dünyadaki ilk 10 batarya üreticisi arasına giren şirketler; Envision AESC, Mitsubishi/GS Yuasa, Hitachi, Panasonic ve Toshiba'dır. Günümüzde Japon devletinin elektrikli araç konusundaki stratejileri, 2001 yılında MITI'den METI'ye (Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı) dönüşen bakanlık tarafından oluşturulmaktadır (Int. Kyn. 8).

Çin Halk Cumhuriyeti Devlet Stratejileri

2000'li yılların başında Çin Halk Cumhuriyeti'nde (Çin) ulusal elektrikli araç markası olmadığı bilinen bir gerçektir. Bu yıllarda Çin devleti Japonya'nın hibrit araç teknolojilerindeki üstünlüğünü görmüş ve devlet stratejilerini tamamiyle batarya ile çalışan araç teknolojilerinin geliştirilmesi ile yeni bir pazar oluşturmak üzerine kurmuşlardır. Bu sayede Çin'in karşı karşıya kaldığı hava kirliliğinin önüne geçilebilecek ve petrol bağımlılığı ortadan kaldırılabilir.

Bu stratejik karar sonrası, Ulusal Kalkınma ve Reform Komisyonu (The National Development and Reform Commission, NDRC) tarafından 2001 yılında yayınlanan Beş Yıllık planda Elektrikli Araç teknolojisi ile ilgili bilimsel araştırma projelerinin önceliklendirilmesine karar verilmiş, 2006 yılında devlet tarafından elektrikli araç programı başlatılmıştır. Daha sonra 2007'de Audi Almanya'da 10 yıl otomobil mühendisi olarak çalışmış ve elektrikli araçlara inanan Wan Gang, Çin'in Bilim ve Teknoloji bakanı olarak göreve başlamıştır. Çin devletinin bu stratejiye yönelik taktikleri diğer dünya ülkelerinden farklı olmuştur. Öncelikle 500'den fazla elektrikli aracın yollarda 15 milyon km test edilmesi sağlanmış, sonrasında 2008 yılında Çin olimpiyatlarında 595 elektrikli araç ile 3,714 milyon km test gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada başka bir zekice taktik ile iç pazar oluşumunun önünü açmak ve hem iç hem dış dünyaya güvenilir ürün ve marka bilinci oluşturmak için 2009 yılında 10 büyük şehirde '1.000 araç' programını devreye sokarak devlet araç filolarında elektrikli araçların kullanımını desteklemişlerdir. Aynı yıl taksitler bireysel araçlar için de finansal sübvansiyonlara başlanmıştır ve 2012 yılının sonunda 27.400 araç 25 şehirde kullanılabilir hale gelmiştir. 2009'da 500 adet elektrikli araç satılmış, ama şirketler kendi modellerini geliştirmek için çalışmalarına devam etmişlerdir. 2009-2022 arasında devlet sübvansiyonlar ve vergi muafiyetlerine 29 milyar \$ harcamıştır. Uygulanan strateji ve çabalar sonucu vermiş olup 6.000.000 elektrikli araç 2022 yılında satılmıştır (Int. Kyn. 9).



Dünyadaki ilk 10 batarya üreticisi arasında bulunan BYD (Build Your Dream), CATL (Contemporary Amperex Technology Co., Limited) ve CALB (China Aviation Lithium Battery., Ltd) ilk defa Çin topraklarında kurulmuştur. BYD şirketi 1995 yılında 20 kişi ve \$300.000 sermaye ile kurulmuş olup elektrikli araç sektörüne de girmiş ve bugün değeri 91,8 milyar \$'a ulaşmıştır (Masiero vd., 2016).

Çin'de elektrikli otomobillerin toplam yerli otomobil satışları içindeki payı, 2018 ile 2020 yılları arasında % 6'nın altınd iken, 2021'de % 16'ya, 2022'de % 29'a ulaşmıştır. Çin 2022 yılında, 2025 yılı ulusal hedefi olan % 20 satış payına üç yıl öncesinden ulaşmıştır. Var olan tüm göstergeler gelecek yıllarda Çin'in yerli ve global ölçekteki elektrikli araç piyasasında daha fazla büyümeyi hedeflediğine işaret etmektedir. Bu kapsamda Çin, karbon zirvesine yönelik ulusal eylem planını desteklemek için 2030 yılına kadar "önemli hava kirliliği kontrol bölgeleri" olarak adlandırılan bölgelerde elektrikli araç satış payının % 50'ye ve 2030 yılına kadar ülke genelinde % 40'a ulaşmasını hedeflemektedir. Son pazar eğilimleri devam ederse Çin'in 2030 hedeflerine de zamanından önce ulaşabileceği ön görülmektedir (Int. Kyn. 10).

Çin teknolojik yatırımlarının erken dönemde tamamlanmış olması 2030 itibarıyla oluşacak arz-talep dengesinde daha dengeli bir durumun elde edileceğine işaret etmektedir. 2022 itibarıyla özellikle Çin'de elektrikli araç üretimi, talebin önüne geçmiş ve Çin'deki araç üreticileri, ABD ve Avrupa başta olmak üzere farklı kıtalardaki pazarlara girmiştir. Çift karbon hedefi ('dual-carbon target') doğrultusunda 2 Kasım 2020'de "Yeni Enerji Araç Sektörü Geliştirme Planı (2021-2035)" uygulamaya konulmuştur. Bu plan, azaltılmış emisyonlarla sürdürülebilir bir otomotiv geleceğine ulaşmayı amaçlayan ulusal bir stratejinin ana hatlarını çizmektedir. 21 Haziran 2023'te Çin, dört yıla yayılan 520 milyar RMB (72,3 milyar ABD Doları) tutarında önemli bir vergi teşvik paketini açıklamış, bu sayede elektrikli araçlar ve çevre dostu araçlar için vergi indirimleri sunarak kullanımları teşvik edilmiştir. Özellikle, 2024 ve 2025'te satın alınan yeni enerji araçlar (YEA) (New Energy Vehicle, NEV) için satın alma vergisinden tam muafiyet sağlayarak araç başına 30.000 RMB'ye (4.170 ABD Doları) kadar tasarruf sağlanmıştır. 2026'dan 2027'ye kadar muafiyet yarıya indirilecek ve 15.000 RMB (2.078 ABD Doları) ile sınırlandırılacağı açıklanmıştır. Bu girişimin amacı, özellikle durgun araç satışları ışığında otomotiv endüstrisindeki büyümeyi teşvik etmektir. Birçok bölgede yerel girişimler de başlatılmıştır. Örneğin; Shenzhen 2023 yılında "Yeni Enerji Taşıtlar Endüstrisi Tedarik Zincirinin Yüksek Kaliteli Gelişimine Mali Destek Yönergeleri"ni yayınlamıştır. Bu teklif, YEA girişimlerini desteklemek için sınır ötesi finansal hizmetleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Benzer şekilde Şangay, bölgelerinde endüstrisinin büyümesini desteklemek için "Yeni Enerjili Araç Endüstrisinin Gelişiminin Hızlandırılmasına İlişkin Uygulama Planı (2021-2025)" yayınlamıştır.

Çin yabancı yatırımcıların elektrikli araç endüstrisine yatırım yapmaları konusunda özel bir kısıtlama uygulamamaktadır. Yani, yabancı yatırımcılar Çin'de elektrikli araç parçaları, piller, şarj cihazları ve ilgili endüstriler gibi elektrikli araç tedarik zincirinin belirli alanlarında tamamen yabancı mülkiyetli işletmeler (WFOE'ler) kurabilirler. Örneğin Tesla'nın Şangay'daki Gigafactory'deki başarısı, Çin'in elektrikli araç pazarında artan yabancı rekabetinin etkisini örneklemektedir. WFOE temelde teknolojik transferi ve yeniliği teşvik etmek amacıyla kurgulanmıştır. Ancak Çin'li yerli şirketlerin yükselişi ve küresel tedarik zinciri yapısında jeopolitik faktörlerden kaynaklanan zorluklar nedeniyle, yabancı şirketlerin pazara girme konusunda çekimser ve kontrollü davrandıkları gözlemlenmektedir. Yabancı şirketlerin benimseyebileceği bir diğer yaklaşım da Çinli firmalarla ortak girişimler kurmaktır. Ortak girişimler üretim, teknoloji geliştirme ve dağıtım gibi birçok alanda işbirliğine dayanır. Bu, belirli projeler için ittifaklar kurmayı, araştırma ve geliştirme çabalarını paylaşmayı veya yeni iş fırsatlarını ortaklaşa keşfetmeyi sağlayacaktır. Yatırımcılar ayrıca Çin'de elektrikli araçların geliştirilmesini ve üretimini kolaylaştırmak için Çinli ortaklarla teknoloji transfer anlaşmaları yapabilecek, teknolojik uzmanlığı, patentleri veya lisans anlaşmalarını paylaşabileceklerdir (Int. Kyn. 11).

Güney Kore Devlet Stratejileri

Güney Kore'de Çin'e benzer olarak teknolojik yatırımlarına erken dönemde başlamıştır. İlk otomobilini 1955 yılında üretmiştir. 1960'da Otomobil Sanayini Koruma Yasası (Automobile Industry Protection Law), 1973'de Ağır ve Kimyasal Sanayi planı kapsamı ve 1974'de Otomobil Sanayi Uzun Dönem Promosyon planı (Automobile Industry Long-term Promotion Plan, Mayıs 1974) ile otomobil sanayi devlet tarafından sürekli desteklenmiştir. Bu kapsamda insan kaynağı yetiştirmek üzere Japonya dahil yurt dışındaki otomobil şirketlerine araştırmacılar gönderilmiş, Ar-Ge'ye destek verilmiş, vergi indirimleri ve ihracat için destek sağlanmıştır. 1995 yılında 2,5 milyon iç üretimi ile dünyadaki 5. otomobil üreticisi olan Güney Kore, 2000 yılında gelişen yeni otomobil teknolojilerinin entegrasyonuna yönelik olarak elektrikli araçlar için 2004 yılında Çevre Dostu Araç Geliştirme Tedarik Promosyon Yasasını (Law on Environment Friendly Vehicle Development and Supply Promotion) çıkarmışlardır (Int. Kyn. 12 ve 13).

Devlet Politika Koordinasyon Ofisi (The Office of Government Policy Coordination, OGPC); Sanayi, Ticaret ve Enerji Bakanlığı (MOTIE, Ministry of Trade, Industry and Energy), Çevre Bakanlığı (MoE, Ministry of Environment) ve Toprak, Alt yapı ve Ulaşım Bakanlığı (MOLIT, Ministry of Land, Infrastructure and Transport) birlikte çalışarak elektrikli araç

konusunda ülkenin atılım gerçekleştirmesini sağlamaya yönelik uygun düzenlemeleri yapmışlardır. Bunun yanı sıra 1990'lı yıllarda İleri Ulusal Program (HAN, Highly Advanced National Program) olarak adlandırılan ve Ar-Ge programını da kapsayan 18 projeden biri de elektrikli araçlar için oluşturulmuştur. Devlet sunduğu desteklerinin sürekliliğini 2011 yılında sadece elektrikli araçlar için yeni projelerin yapılanmasına imkan tanıyarak göstermiş ve bu projede enstitü, özel ve kamu kuruluşlarına özel hedefler vermiş ve sonuçları izlemiştir. 2014 yılında Güney Kore elektrikli araçların da içinde olduğu enerji ile ilgili endüstrilere Gayri Safi Milli Hasılaya karşılık en çok Ar-Ge harcaması yapan ülke olmuştur (Kim vd, 2021).

Bu projeler sayesinde dünyadaki ilk 10 batarya şirketi arasına giren şirketler; LG Energy Solutions, Samsung SDI ve Almanya ve Güney Kore ortaklığında SK Continental E-Motion gelmektedir. Hyundai ve Kia elektrikli araçlar da önde gelen otomobil üreticilerindedir.

Amerika Birleşik Devletleri Stratejileri

Her ne kadar elektrikli aracın kim veya hangi ülke tarafından ilk kez keşfedildiği bilinmese de ilk başarılı elektrikli araç 1890 yılında Amerika'da William Morrison tarafından üretilmiş ve 1900'lü yıllarda 60 araçlık elektrikli taksi filosu New York caddelerinde kullanılmıştır. Sonraki yıllarda Porche ve Ford farklı elektrikli araç modelleri geliştirse de 1935'li yıllarda petrol fiyatları, döneme ait yol koşulları ve şarj etme zorlukları nedeniyle elektrikli araçlara ilgi ortadan kalkmıştır. 1976 yılındaki petrol ambargosu tekrar ilginin elektrikli araç üzerine yoğunlaşmasına sebep olmuş ve Amerikan Kongresi Elektrik ve Hibrit Araç Araştırma, Geliştirme ve Gösterim Yasası ile Enerji Bakanlığı'na elektrikli ve hibrit araçlarda araştırma geliştirmeleri destekleme yetkisi vermiştir. 1976 yılında verilen bu yetkiye ilave olarak 2009 yılında Amerikan Kurtarma ve Yeniden Yatırım Yasası (ARRA; P.L. 111-5) ile elektrikli araçlar için yerli bir Li iyon batarya tedarik zinciri geliştirmek üzere federal düzeyde 2,4 milyar \$ mali destek sağlanmıştır (Int. Kyn. 14).

2006 yılında Tesla tek şarj ile 200 mil (321 km) gidecek lüks spor elektrikli araç üreteceğini belirtmiş ve 2010 yılında devletten 465 milyon \$ kredi almış ve krediyi zamanından 9 yıl önce ödemiştir. Tesla'yı Chevy Volt ve Nissan Leaf izlemiştir. Amerika yollarında elektrikli araçlar çoğalmaya başladığında şarj istasyonlarında yetersizlikler oluşunca "Kurtarma Yasası" sayesinde verilen desteklerle ulusal çapta şarj istasyonu alt yapısı oluşturulmaya başlanmıştır. 2012 yılında "Elektrikli Araçların Her yerde Büyük Meydan Okuması" ile en iyi mühendisler, bilim ve iş insanları bir araya getirilmiştir. Bu kapsamda tedarik zincirini güçlendirmek ve elektrikli araç bataryaların gelişiminin önündeki en büyük bilimsel ve teknik engellerin üstesinden gelmek için milyonlarca dolarlık fon ayırmıştır. Li iyon batarya ile ilgili pek çok teknolojik yenilik Enerji Bakanlığı (DOE, Department of Energy) desteği ile ABD'de gerçekleştirilmektedir (Int. Kyn. 15).

2015 yılında elektrikli araçların devlet stratejik oluşumlarından biri olarak kabul edilmesinin ardından 2016 yılında yabancı batarya yatırımcıların teşvikle gerçekleştirdikleri yatırımlar 2030 itibarıyla oluşacak arz-talep dengesinde önemli rol oynayacaktır.

Avrupa Birliği Stratejileri

Dünyadaki iklim değişimi ile ilgili yapılan tüm araştırmalar iklim değişiminde ulaşım araçlarından yayılan emisyonun rolünü kanıtlamıştır. Avrupa Birliği 2009 yılında yayınladığı regülasyon (Regulation (EC) No 443/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009) ile özellikle ulaşım araç üreticilerini yeni teknolojilere yönelik stratejiler oluşturmaya teşvik etmişlerdir. Yeni teknoloji arayışları içerisindeki bir seçenek olan elektrikli araçlar Avrupa Birliği üye devletlerinin de stratejilerinde ve yol haritalarında yer almıştır. 2009 regülasyonu ardından pek çok regülasyon ve yasa elektrikli araç ve ekosisteminin oluşumunu ve sürdürülebilirliğini desteklemek hedefine uyumlu olarak yayınlanmıştır. 2019 yılında AB Yeşil Mutabakatı ve karbon nötr hedefine ulaşılması için devletlerin oluşturmuş oldukları hemen hemen her stratejik planda elektrikli araçların ülkelerde üretimi ve yaygınlaştırılmasına yönelik aksiyonlar yer almaktadır (Altenburg, 2015). Bu çerçevede Fransa ve Almanya daha detaylı analiz edilmiştir.

Fransa Devleti Stratejileri

Fransa 19. yüzyılda otomobilin keşfi sonrasında üretime başlayan ilk devletlerdendir. En büyük markaları Renault, PSA Peugeot ve Citroen'dir. Her ne kadar 2000'li yıllarda otomotiv sektöründe yaşanan finansal problemler ve dünyadaki rekabet Fransız otomotiv üreticilerini zora soksa da 2007 yılında çıkarılan "Grenelle de l'environnement" yasası ve 2009 yılında çıkarılan "Low Carbon Vehicle Plan" karbon ayak izi düşürme çalışmalarının önünü açmıştır.

Araçlara ait karbondioksit emisyonunu da içeren güvenlik kontrolleri 2000'li yılların başından beri Fransa'da gerçekleştirilmektedir. Bu çerçevede Renault, PSA, Peugeot, Citroën markaları 2005 yılından itibaren Avrupa Birliği'nde sattıkları araçların emisyonunu 150 g-km⁻¹'in altında tutarak düşük karbon salımlı araç teknolojisinin gelişimini desteklemişlerdir (Int. Kyn.16).

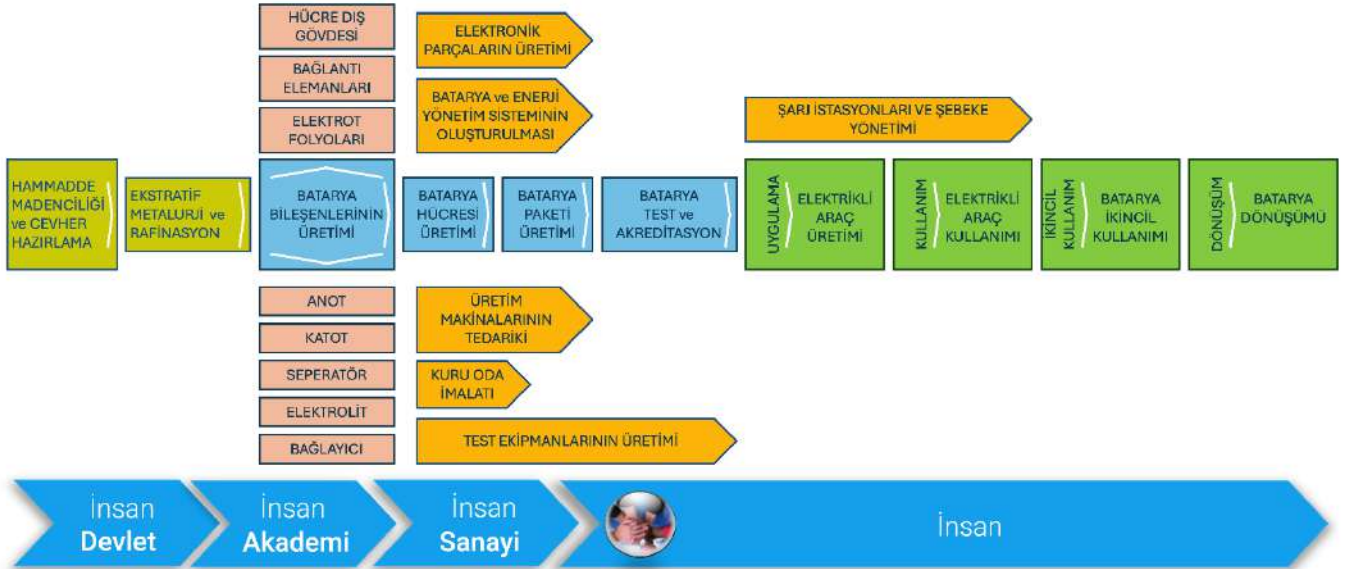
Enerji koruma ve yenilenebilir enerji politikalarını oluşturmaktan sorumlu ulusal organ ADEME (Fransa Enerji ve Çevre Yönetimi Ajansı) aracılığıyla ise uygulamalı araştırma çalışmalarında kolektif bilinç yaratılmıştır. Bu sayede Fransa pazara seri olarak elektrikli araç modeli sağlayan ilk Avrupa ülkesi olmuştur (Altenburg vd., 2015).

Almanya Devleti Stratejileri

Almanya otomobil üretimi konusunda dünyada ilk beşte yer almaktadır. Otomotiv Ar-Ge çalışmalarında Daimler, BMW ve Volkswagen Grup en çok bilinen markalar arasında olmalarına rağmen; Alman üreticileri Japonya, Fransa ve Amerikalı rakiplerinden çok sonra, 2014 yılında, elektrikli araç pazarına yeni modeller sunmuşlardır. Alman devleti, Avrupa Komisyonun 2012-2015 yılları arasında aşamalı olarak binek otomobillere yönelik emisyon hedefleri sonrasında 2009 yılında “Elektromobilité Gelişim Planı”nı oluşturmuştur. Bu plandaki özel şartlardan biri elektrikli araçların şarjı için gerekli enerjinin yenilenebilir enerjiden eldesi hususunda olmuştur. Bir yıl sonra ise “Nationale Platform Elektromobilitaet, NPE” kamu-özel sektör ittifakı ise teknolojiyi koordine etmek için kurulmuştur. Almanya’da devlet ve üreticiler elektrikli araç ve batarya konusunda diğer ülkelerle rekabette geri kalmamak için araştırma merkezleri ve sanayisi ile güçlü oldukları alanlarda (batarya kimyası, batarya yönetim sistemi, seperatör) hızla aradaki farkı kapatmaya çalışırken aynı zamanda zayıf olunan alanlarda uluslararası batarya üretim ve paketleme firmaları ile stratejik ortaklıklar yapmaya başlamıştır.

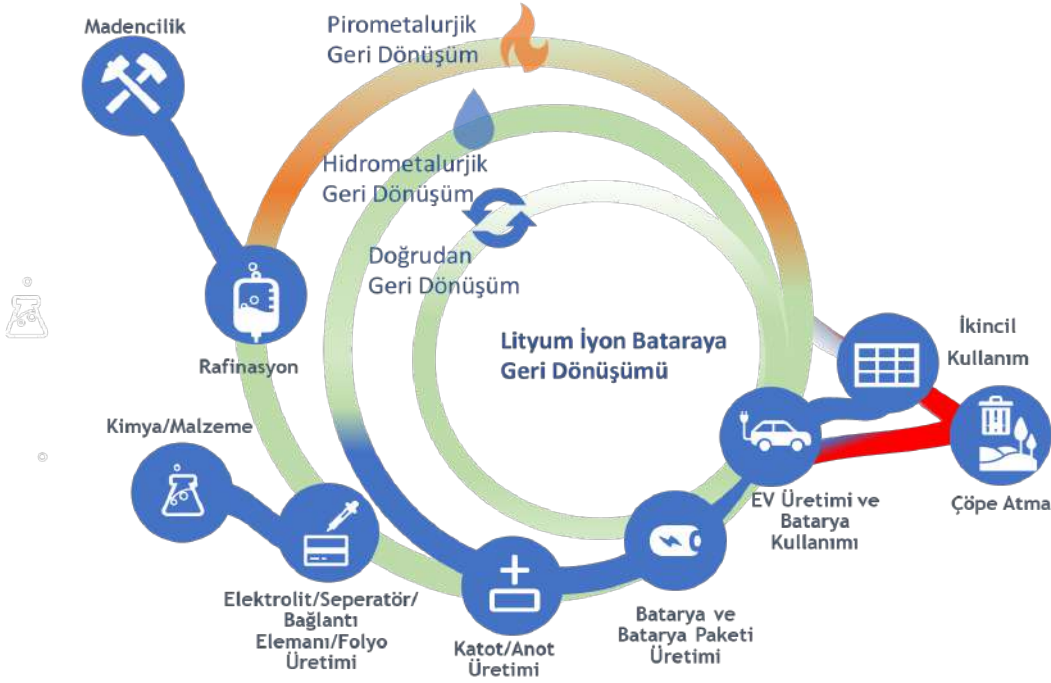
Li İyon Batarya İçeren Elektrikli Araçların Üretiminde Değer Zinciri ve Ekosistemi

İklim değişimi, dünyada yaşayan tüm canlıların yaşam kalitesini etkilemesi sebebiyle devletleri sosyo-ekonomik stratejilerini ve hayata bakış açılarını değiştirmeye zorlamaktadır. Günümüzde atalarımızın öğretisi olan “kendi yağında kavrulma” deyimi daha da önem kazanmış, hayatımıza döngüsel ekonomi kavramı ile yeniden giriş yapmıştır. Şekil 5’de lityum iyon batarya içeren elektrikli araçlarda tedarik değer zinciri verilmiştir. Bu zincirin en önemli girdisi İNSAN, çıktısı İNSANLIĞA ve YAŞAMA hizmettir.



Şekil 5. Li iyon batarya tedarik zinciri.

- Döngüsel ekonomi açısından batarya üretimi değerlendirildiğinde “beşikten mezara” üretim fikrinin doğuşundan, üretilen değer kullanımı ile insanlığa kattığı değer, bu değer tekrar kullanımı ve tekrar doğaya zarar vermeden dönüştürülmesi de oldukça önemlidir. Tekrar kullanımı ekonomik ömründe ikinci bir yaşam döngüsü başlatırken geri dönüşüm yani tekrar doğaya kazandırılma süreci de bu yaşamlar sonrası döngüdür.
- Şekil 6’da Li iyon batarya için döngüsel ekonomi süreci gösterilmiştir. Madencilik ile başlayan serüven, rafinasyon, hücreyi oluşturan katot, anot vb. malzemeleri, batarya, batarya paketi üretimi, kullanımı, ikincil kullanımı, geri dönüşümü ve bertarafını kapsamaktadır.



Şekil 6. Li iyon batarya için döngüsel ekonomi süreci.

Li İyon Batarya-Elektrikli Araç Perspektifinde Darboğazlar, Beklentiler ve 2030 - 2050 Projeksiyonları (Int. Kyn.17-22)

2021 yılında gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı'nda (COP26, World Climate Summit) 2030 yılına kadar emisyon azaltımlarına yönelik Paris Anlaşması hedefleriyle uyumlu daha iddialı Ulusal Katkı Beyanlarının (National Determined Contribution, NDC) açıklanması beklenirken sunulan beyanlar beklentiyi karşılamamıştır. 2022 yılında gerçekleşen COP27'de beyanların gözden geçirilerek iklim değişikliğine uyum için bilime dayalı hedeflerin belirlenmesi ve uzun vadeli stratejik planların hazırlanması kararı alınmıştır.

İklim değişikliğinde araçların kullanım esnasında salınladıkları emisyonun çok büyük rol oynadığı bilinen bir gerçektir. Ulaşımında emisyon azaltımına ait veriler batarya pazarının artan bir ivme ile yükseleceğini göstermektedir. Ancak, bu ivmenin arkasında ülkelerin mobilite uygulamalarının elektrifikasyonu için uyguladığı teşvik programları bulunmaktadır ve bu programların azaltılması/sona ermesiyle beraber artış hızında duraklama beklenmektedir.

Kıtalar coğrafyası incelendiğinde 2030 yılı itibarıyla depolanan enerji miktarı ile arz ve talep arasındaki oranda fark oluşacağı öngörülmektedir. Bu durum yatırımcılar için bir fırsat olarak görülse de özellikle anot hammaddesinin Avrupa coğrafyasında kolay ulaşılabilir olmaması nedeniyle oluşan risk büyüktür. Bu riskin bertarafına yönelik olarak Avrupa Birliği "sentetik grafit" üretimine yönelik proje çağrısı açmıştır. Ancak, Avrupa Birliği grafit için gerçekleştirdiği aksiyonu silisyum anot için gerçekleştirmemiştir.

Bu noktada batarya teknolojisinde kullanılan malzemelerin sürdürülebilirliğinin önemli bir tartışma alanı olduğu bilinen bir gerçektir. Global dünyanın gerçekleri ve gelecek senaryoları gözönüne alınarak ülkelerin verecekleri akılcı stratejik kararlar ve taktikler oldukça önemlidir. Halihazırda batarya üretimi tedarik zincirinde pek çok belirsizlik mevcuttur. Bu belirsizlikler kısaca üç başlık altında toplanmaktadır;

- Arz - talep belirsizlikleri
- Arz - talep dengesinde coğrafi konumla gelen belirsizlikler
- İnsan, çevre, toplum sağlığı ve güvenliği ile ilişkili yönetsel belirsizlikler.

Hammadde tedarikçilerinin coğrafi yoğunlaşması ülkeler arasındaki ticari veya siyasi anlaşmazlık riskini artırmaktadır. Bunun yanı sıra, Covid-19 salgını gibi beklenmeyen tehlike durumlarında pazarlarda oluşabilecek dengesizlikler örneğin ithalat ihracat sürecinde oluşacak durmalar/ülkelerde alınan kapanma kararları nedeniyle tedarik zincirlerinin



bozulabileceği görülmüştür. İklim değişikliği nedeniyle oluşacak olağan üstü doğa olayları da benzer problemlerin yaşanmasına neden olmaktadır. Ayrıca, pazarda belirli ürünler için sınırlı sayıda tedarikçinin bulunuyor olması hammaddelerin fiyatlandırılması ve pazarlanmasında kesintilere sebep olmaktadır.

2023 itibarıyla açıklanmış ve fizibilite çalışması aşamasının ötesine geçen verilere dayanarak, minerallerin küresel arzının 2030 yılına kadar küresel talebi karşılamada yetersiz kalacağı öngörülmektedir. Jeofizik ve madencilik üzerine yapılan araştırmalar, fizibilite çalışmaları tamamlandıktan sonra, lityumda yeni maden kapasitesinin devreye alınmasının ortalama 6 yıldan fazla, nikel ve kobalt için ise 4 yıldan fazla süreceğini göstermektedir. Pili oluşturan arz talep dengesizliği batarya bileşenlerinin her bileşeninde mevcuttur. Bağlayıcılar konusunda açıklanan kapasitenin % 60'a yakınının aktif olarak kullanıldığı görülmektedir. Elektrolitlerde ise hali hazırdaki üretilen miktarlar ve yatırımı düşünülen kapasite toplamları ile gelecekte ancak talep edilecek elektrolit miktarının % 50'sinin karşılanacağı öngörülmektedir. Seperatörler için ise risk daha büyüktür çünkü bu konuda yeni kapasite artırıcı yatırımlar planlanmadığı için varolan kapasite bugünkü üretimler için yeterli olsa da gelecekte artan ihtiyacı karşılayamayacaktır.

Elektrikli araç üreticileri açısından konu incelendiğinde; 2023 yılında 13,7 milyon EA (9,5 milyon BEA ve 4,2 milyon FHEA) tescilli yapılmıştır. Bu araçların %22'si Çinli BYD firmasının, %13,2'si Tesla firmasının olmuştur. Bu OEM firmalarını, Volkswagen Grubu (%7,3), Geely-Volvo Grubu (%6,8) ve Çinli SAIC Grubu (SAIC-GM ortaklığındaki Wuling dahil %5,8) takip etmektedir. 2023'de dünyada en çok satılan model ilk kez bir elektrikli araç olmuştur. Tesla Model Y'nin satışı 1,23 milyon olarak gerçekleşmiştir. Bu bize her yıl yeni bir satış rekoruna imza atılabileceğini göstermektedir. Yalnızca 1 milyon Tesla Y Model aracın üretilmesi için yaklaşık 60 GW-sa'lik batarya gerekmektedir. Bu da elektrikli araç üreticilerinin batarya teknolojisine oldukça bağımlı olduğunu göstermektedir. Bu durumda elektrikli araç üreticisi firmaların stratejileri de önemlidir. Elektrikli araç üreticileri için, her modele özgün bir pil ve batarya paketi teknolojisi kullanmak yerine bütün araçlarında aynı teknolojiyi kullanmak öncelikli stratejileri arasında yer almaktadır. Bu durum pillerde standardizasyonun önemini arttırmaktadır. Günümüzde kese tipi ve prizmatik hücrelerin yanı sıra silindirik hücreler de farklı markalar tarafından elektrikli araçlarda kullanılmaktadır. Uzun vadede gerçekleştirilen değişik hücre şekli ve kimyalar ile maliyetlerin de azalması beklenmektedir. 2022'de BNEF (Bloomberg New Energy Finance) tarafından yayınlanan raporda ortalama batarya ve paket maliyeti sırasıyla 115 ve 138 \$/kW-sa olduğu bildirilmiştir. Standardizasyonun yanı sıra uygun kimya seçimi ve üretim yöntem tercihleri ile EUCAR 2030'da hücre maliyetlerin 70 €₂₀₁₉/kW-sa (pakette ise 80 €₂₀₁₉/kW-sa) değerine kadar düşmesinin hedeflendiğini ifade edilmiştir. BATT4EU tarafından hazırlanan SRIA raporunda ise (SRIA: Strategic Research and Innovation Agenda) 2030 sonrasında paket seviyesinde maliyetlerin 75 \$/kW-sa değerinin altına düşülmesinin gerekliliği raporlanmıştır (Hettesheimer vd., 2023).

Elektrikli araçlarda yukarıda ifade edilen prizmatik, silindirik ve kese tipi hücrelerin hepsinin kullanıldığı görülmektedir. Büyük prizmatik hücreler genelde tek hücreden yapılıdır. Sağlam alüminyum gövdesi sayesinde yüksek mekanik stabilite ve dayanıklılık sergilerler. Kolay kurulum ve yüksek paketleme yoğunluğu sağlarlar. Ancak soğutma proses verimi sınırlıdır ve enerji yoğunluğu diğer geometrilere kıyasla daha düşüktür (210 W·sa. kg⁻¹). 2030 itibarıyla anot (grafit yerine 10-20 % Si içeren kompozit) ve katot (NMCA) yapısındaki aktif malzemelerin değişmesiyle 280 W·sa. kg⁻¹ (700 W·sa. L⁻¹) enerji yoğunluğuna sahip olacakları beklenmektedir. 2023 itibarıyla birçok tedarikçi (CATL, Samsung SDI, Gotion, Northvolt, SVOLT, or PPES) ve OEM (VW, Ford, Honda, Toyota, BMW, Mercedes, BYD) prizmatik hücre kullanımına devam edeceklerini ifade etmişlerdir. Tesla'da LFP kimyalarının prizmatik hücrelerde kullanılacağını duyurmuştur. Diğer taraftan silindirik hücreler titreşime, basınca, mekanik strese ve darbeye dayanıklı olmaları ve yapısal olarak araca entegre olmasının pratik ve ucuz olması sebebiyle tercih edilmektedirler. Tesla ilk olarak 18650 (18 mm çapında ve 65 mm uzunluğunda), ardından daha yüksek enerji eldesine imkan veren 21700 (21 mm çapında ve 70 mm uzunluğunda), son olarak da daha yüksek enerji ve güç yoğunluğu eldesine imkan veren 4680 tipi (46 mm çapında ve 80 mm uzunluğunda) hücreleri kullandıklarını belirtmişlerdir. Günümüzde BMW ve GM gibi çeşitli OEM'lerin yanı sıra yeni kurulan şirketler Nio, Rivian ve Lucid Motor'da silindirik hücre kullanımı için niyetlerini açıklamışlardır. Birçok hücre üreticisi de (LG Energy Solutions, Samsung SDI, BAK, CATL, Panasonic, SVOLT, ve EVE) benzer özellikte silindirik hücre üretimi yapacaklarını açıklamışlardır. 2021 yılında ortalama spesifik enerjinin 250 W·sa·kg⁻¹ ve enerji yoğunluğunun 700 W·sa·L⁻¹ olduğu durumdan silindirik hücrelerde anot olarak grafit yerine % 10-20 Si içeren kompozit malzeme ve katot olarak NMC yerine NMCA içeren malzeme kullanımı ile spesifik enerjinin 300 W·sa·kg⁻¹, ve enerji yoğunluğunun 800 W·sa·L⁻¹ye çıkacağı öngörülmektedir. Kese tipi hücreler ise yüksek paketleme oranına olanak tanıyan esnek tasarımlara sahiptirler. Fakat nispeten düşük enerji yoğunlukları, mekanik stabilite ve dayanıklılıkları sebebiyle elektrikli araçlarda pil hasarına ve termal kaçaklara karşı korunmak için tek hücre olarak kullanılmak yerine modül veya paket olarak kullanımları uygundur. 2020 sonrasında kese tipi hücrelerin boyutlarında değişiklik yapılmış ve daha kalın ve uzun hücreler üretilmeye başlanmıştır. 2023 itibarıyla, VW, Mercedes, Renault, Hyundai, Kia gibi araç üreticileri LG Energy gibi pil üreticilerinin ürettiği kese tipi hücre kullandıklarını açıklamışlardır. 2020 yılında 300 W·sa. kg⁻¹ spesifik enerji ve 670 W·sa·L⁻¹ spesifik

enerji yoğunluğuna sahip olan kese tipi hücrelerin, katı hal batarya teknolojilerini de kullanılarak, 2030 yılı ve sonrasında 400 W·sa. kg⁻¹ spesifik enerji değerine ulaşması beklenmektedir.

Özetle elektrikli araç üretici ve pil üretici ekosisteminin 2030 projeksiyonları incelendiğinde her üç pil geometrisinin de pazarda var olacağı, Çinli üreticilerin pazardaki baskın varlığı sebebiyle prizmatik hücrelerin üretiminin ağırlıkta (% 50) olacağı, kese tipi hücrelerin (% 30) ve silindirik hücrelerin (% 20) üretim miktarlarının daha düşük seviyede kalacağı ön görülmektedir.

2023 verilerine dayanarak lityum iyon batarya üretimine dair 2030 projeksiyonları analiz edildiğinde üretimlerin TW-sa mertebesinde olacağı vaad edilmektedir. Bu durum beklenen tüketim miktarının da üzerindedir. Bazı araç üreticileri elektrifikasyon stratejileri gereğince batarya fabrikası açacaklarını duyurmuşlardır. Bu kapsamda var olan bir grup batarya firması yatırımlarını planlarken aynı zamanda elektrikli araç üreticileri de kendi üretim hatlarını kurabileceklerini duyurmuşlardır. 2030 yılında toplam batarya üretiminin % 18'inin OEM'ler tarafından ve % 13'ünün ise batarya üreticileri ile OEM'lerin birlikte yapacakları ortaklıklarla gerçekleştirileceği beklenmektedir.

Günümüzde Asya firmalarının baskın olduğu ve üretimin temel olarak Çin'de konumlandığı batarya piyasasının 2030 itibarıyla % 25'inin Avrupa kıtasına, % 20'sinin de ABD kıtasına kayması beklenmektedir. Kore ve Japon firmaları ise kendi ülke sınırlarının dışında da üretim gerçekleştirmek için yatırımlar yaparak pazarda kritik rol oynamaktadırlar. Çoklu ülkeleri kapsayan ortak girişimler ise yerli ve yabancı firmaları bir araya getirerek tarafların güçlü yanlarından en yüksek seviyede avantaj sağlamak amacıyla değişken çözümler oluşturmaktadır. Değişen dünya araç pazarında elektrikli araç ve batarya ekosisteminde oluşan ekonomiden ülkemizin pay alması jeopolitik ayrıcalıklarını kullanarak sağlanabilir. Zira Asya ve Avrupa arasında köprü durumunda olan ülkemizde elektrikli araç pazarındaki oluşan tedarik ekosisteminde batarya üretim ve sevkiyatı için yerli ve yabancı yatırımcıların ilgisini çekebilecek güçlü bir aday olarak konumlanabilir.

Kullanıcı bakış açısıyla incelendiğinde ise elektrikli araçlarda batarya kullanımında en önemli kısıt güvenlidir. UNECE Regulation No 100 (ECE R100 – Part II) gereğince elektrikli araçların öncelikli olarak güvenlik testlerinden geçmesi gerekmektedir. Paketlere uygulanan ısıl, mekanik ve elektriksel testlerin yanı sıra pile uygulanan değişen sıcaklık ve akım yükleri altındaki galvanostatik test sonuçları bu kapsamda değerlendirilir. Bu noktada en yaygın soru ne kadar süreyle bataryanın elektrikli araçlarda kullanılabileceğidir. Çevrim ömrü açısından analiz edildiğinde ise Tesla ekibinin yaptığı hesaplamalar bir elektrikli araç için yaklaşık 160.000-320.000 km mesafeyi kat edecek ömüre sahip olduğunu gösterir. Bu, bir elektrikli araç için yaklaşık 1.500 çevrim yani 15 yıla yakın ömür anlamına gelmektedir. EUCAR ise elektrikli araç ömrünü en az 150.000 km ile ilişkilendirmektedir. Bu durumda birçok elektrikli araç üreticisi batarya garanti süresini 8-10 yıl olarak belirlemektedir.

Elektrikli araç pazarının 2030 ve 2050 projeksiyonları genel olarak incelendiğinde 2019 ve sonrasında yaşanan tüm kriz ve olumsuzluklara rağmen 2023 yılında lityum iyon batarya satışlarının 1 TW-sa'ı aştığı görülmüş ve 2030 yılında bu değer 3 TW-sa'e yaklaşması beklenmektedir (Hettesheimer vd., 2023). GW-sa kapasitelerinden TW-sa'e çıkan lityum iyon batarya teknolojisi birçok yatırımcı için fırsat olarak görülmesine rağmen üretimin sürekliliği, sürdürülebilirliği gerek finansal gerekse çevresel endişeler sebebiyle farklı paydaşlarda soru işaretleri oluşturmaktadır. Bu kapsamda hem Ar-Ge hem de Ür-Ge mühendislerinin uyum içerisinde çalışması ile hem daha üstün performanslı hem de daha çevreci pil ve batarya paketlerinin tasarımı hedeflenmektedir. Dünyanın birçok farklı bölgesinde 800 W·sa·L⁻¹ spesifik enerji yoğunluğu veya 350 W·sa·kg⁻¹ spesifik enerji ve hızlı şarj olma kabiliyeti (4C dahil) yanı sıra karbon ayak izi düşük, seri üretime uygulanabilir, sürdürülebilir ve uygun maliyetli olan tasarımlar yatırımcılar tarafından ilgiyle karşılanmaktadır. Bu noktada sürdürülebilir pil üretimi hammadde eldesinden üretim yöntemine kadar farklı senaryoları kapsamaktadır. Bu çerçevede kobaltsız ve mangan miktarı artırılmış kimyaların aktif madde olarak kullanımı, yerli imkanlarla tasarlanacak üretim yöntemlerinin tercihi ve var olan bataryaların yerinde geri dönüşümü ile yeniden üretimde kullanılması dikkat çekmektedir. Ağustos 2023'de yürürlüğe giren yeni AB Batarya Regülasyonu (EU 2023/1542) kapsamında askeri, uzay, nükleer uygulamalar dışında AB pazarına sürülen tüm piller güvenlik ve sürdürülebilirlik hakkında bilgi içeren etiketlere sahip olması hedeflenir. Şubat 2025'de elektrikli araç bataryaları için karbon ayak izi gerekliliklerinin zorunlu olarak uygulanması süreci başlatılacaktır. Şubat 2027'den itibaren de elektrikli araçlarda bulunan bataryaların da karbon ayak izini gösteren etiket /dijital pasaport taşımaları zorunlu hale getirilecektir. Bu etiket sayesinde geri dönüşümde de kontrol ve güvenliğin sağlanması için ön adımlar atılmış olunacaktır. Bu durumda 2030 itibarıyla ağırlıkça % 70 verimlilikle batarya geri dönüşümünün başarılıacağı varsayılmaktadır. Bu regülasyon ayrıca üretimde kullanılacak ve depolanacak enerjinin kaynağının da önemini ortaya çıkarmaktadır ki fosil kaynaklar yerine yenilenebilir enerjinin kullanıldığı ve depolandığı uygulamalar bu sebeple kısa-orta vadede önem kazanacaktır. Avrupa'nın en büyük 5 üreticisi bu perspektifte 2030 ve sonrasında nötr karbon hedefine sahip olduklarını açıklamışlardır (Int. Kyn.18-22).



Teknolojik gelişmeler incelendiğinde var olunan bilgi seviyesi, piyasanın hedefleri ve global projeksiyon verileriyle ikilem sergileyebilmektedir. Piyasanın beklentisi olan yüksek enerji ve güç yoğunluğu değerlerine ulaşabilmek için kullanılacak ileri teknoloji seviyesindeki yüksek enerji tüketen ekipmanların kullanımı “daha çevreci ve sürdürülebilir” bataryaların eldesi projeksiyonuyla gelişmektedir. Bu noktada akademi ve endüstrinin bir arada çalışması hem elektrot aktif malzeme kimyalarının hem de yeni üretim yöntemlerinin çeşitlenmesini sağlayarak orta vadede uzlaşmalı çözümlerin bulunmasına yol açacak ve Li iyon batarya teknolojisinin gelişimini hızlandıracaktır.

Japonya, Avrupa Birliği, Çin, Amerika Birleşik Devletleri, İngiltere ve Güney Kore sahip oldukları patentlerle var olan Li iyon batarya teknolojisinin gelişiminde söz sahibidirler. 2021 yılına kadar var olan patentlerin % 50'sine sahip olan Japonya liderliği Çin'e kaptırmıştır. Var olan patentlerin %85'inin elektrot malzemesi üzerine olduğu görülmektedir. 2021'den sonra batarya performansının optimizasyonu üzerine alınan patent sayısının da dramatik olarak arttığı raporlanmıştır. Bu durum var olan Ar-Ge çalışmalarının yalnız kimya üzerine değil elektrot bağlantıları, muhafaza sızdırmazlığı ('housing'), ısıtma ve soğutma kontrolü gibi sistemlerin üzerine de yoğunlaştığını göstermektedir. Diğer taraftan sürdürülebilirliği destekleyen geri kazanım ve geri dönüşüm konularında da alınan patent sayıları beklentiyle uyumlu olarak hızla artmaktadır. CATL firması batarya üretiminde dünya lideri olmasının yanı sıra en çok patente de sahip firma olma özelliği göstermektedir. Firma, 2008 yılında Hunan Brunp adında geri dönüşüm teknoloji firması kurarak vizyoner görüşünü bir kere daha göstermiştir. Hunan Brunp atık bataryaların yeşil geri dönüşümü için piyasada önemli bir konuma gelmiştir. Patent sayısında diğer önde gelen firmalar Japon ve Güney Kore firmalarından LG Energy Solutions, Samsung SDI, SK On (KR), Panasonic/PPES, Murata, GS Yuasa, Sanyo, Toyota (JP) yanı sıra Çin'de bulunan SVOLT, ATL, BTR, Shenzhen Capchem; Avrupa'da bulunan BMW, VW, BASF, Umicore, Northvolt, VARTA; ABD'de ve Kanada'da bulunan Global Graphene Group ve Li-Cycle firmalarıdır.

Otomobil üreticilerinin 2030 karbon salınım hedefleri incelendiğinde Toyota Motor Company'nin 2018'e nazaran 2030 yılında araç başına karbon salınımını km'de % 33,3 azaltmayı hedeflediği görülmektedir. 2023 yılında 90 kW-sa'lık batarya paketinin 800 V ile 2,5-2,7 C hızında 300 km menzil için 20 dakika 10-80 % SOC (State of Charge: Şarj olma durumu) seviyelerine kısa bir sürede hızlı şarj ederek ulaşıldığı görülmüştür. Alternatif olarak 400 V ile 1,4-1,7 C hızında 40 dakika'da aynı miktarda enerji depolanabilir. EUCAR bu sebeple 2030 yılına kadar 3,5 C ile 17 dakika da 80% SOC'a kadar depolanarak 350 km menzil alabilecek aracın tasarımının tamamlanması hedeflemektedir. Elektrikli araçlarda menzil arttırmak için paket değişimi ('battery swapping') de üzerinde halen tartışılan bir konudur.

Gelinen aşamada;

- Batarya teknolojilerinin, karbon nötr hedeflerinin gerçekleştirilmesi için anahtar teknolojiler arasında olduğu,
- Elektrikli araçlar, mobil ulaşım araçları ve grid uygulamalarında batarya teknolojilerinin global ölçekte kullanımlarının artma potansiyellerinin olduğu,
- Batarya pazarının dinamik olduğu ve değişimin zamana bağlı hızla gerçekleştiği,
- Batarya üretiminde yaygınlaşma ve genişlemeye ait riskin batarya tedarik zincirinde mineral kaynakları ve başlangıç malzemelerine erişimde olduğu,
- Yabancı kaynaklara bağlılığın en aza indirilip tedarik zincirinin güçlendirilmesi gerektiği,
- Bilime ve insana yatırım yapılmadan teknolojinin üretilemeyeceği gerçeğiyle batarya teknolojilerinde ilerlemek için varolan ve yeni jenerasyon batarya teknolojileri için Ar-Ge çalışmalarının hızla ve sürekli desteklenmesi gerektiği unutulmamalı ve daha fazla geç kalmadan ortak akıl ve güç birliği ile çalışmalıdır.

KAYNAKLAR

Ahman, M, 2006. Government policy and the development of electric vehicles in Japan, Energy Policy, Volume 34, Issue 4, March 2006, 433-443.

Altenburg, T., Schamp, E. W., Chaudhary, 2015. The emergence of electromobility: Comparing technological pathways in France, Germany, China and India, Science and Public Policy, Volume 43, Issue 4, August 2016, 464-475, A.

Hettesheimer, T., Neef, C., Inés, R. I., Link, S., Schmaltz, T., Schuckert, F., Stephan, A., Stephan, M., Thielmann, A., Weymann, L., & Wicke, T., 2023. Lithium-Ion Battery Roadmap - Industrialization Perspectives toward 2030.



Kim, I.Y., Ko, J., Ahn, T.Y., Cheong, H., Yoon, Y. S., 2021. Energy materials for energy conversion and storage: focus on research conducted in Korea, Journal of the Korean Ceramic Society, 58:645–661.

Masiero, G., Ogasavara, M. H., Ailton Conde Jussani, A.C., Risso, M.L., 2016. Electric vehicles in China: BYD strategies and government subsidies, RAI Revista de Administração e Inovação, Volume 13, Issue 1, 3-11.

Patchell, J., 1998. Creating the Japanese electric vehicle industry: The challenges of uncertainty and cooperation, Environment and Planning A 1999, volume 31, 997-1016.

İnternet Kaynakları

- [1] <https://spectrum.ieee.org/lithium-ion-battery-2662487214>, (5.10.2023).
- [2] <https://www.batterydesign.net/chemistry-roadmap/>, (5.10.2023)
- [3] <https://www.motor.com/2022/05/bev-hev-and-ice-service-pricing/>, (5.10.2023)
- [4] <https://www.hyundainews.com/en-us/releases/324#:~:text=SEOUL%2C%20Korea%2C%20July%208%2C,the%20Korean%20and%20international%20press>, 5.10.2023.
- [5] <https://media.mbusa.com/releases/release-6f055760fe2e4e678ff54fa054baa857-mercedes-benz-debuts-s400-hybrid-with-advanced-lithium-ion-battery-technology>.
- [6] <https://www.energy.gov/eere/success-stories/articles/eere-success-story-battery-cathode-developed-argonne-powers-plug>.
- [7] https://www.tesla.com/tr_tr/roadster, 12.04.2024.
- [8] https://www.meti.go.jp/english/report/pdf/0520_001a.pdf, 5.10.2023.
- [9] How did China come to dominate the world of electric cars? | MIT Technology Review, <https://www.technologyreview.com/2023/02/21/1068880/how-did-china-dominate-electric-cars-policy/>, 5.10.2023.
- [10] IEA (2023), Global EV Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0, 12.04.2024.
- [11] <https://www.china-briefing.com/news/chinas-electric-vehicle-supply-chain-and-its-future-prospects/>, 12.04.2024.
- [12] https://elaw.klri.re.kr/eng_mobile/viewer.do?hseq=25065&type=new&key=Bill+Cannis, 2013
- [13] <https://cdn.crsnews.com/documents/CRS.pdf>, Congressional Research Service 7-5700 www.crs.gov R4170, 5.10.2023.
- [14] <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>, 5.10.2023.
- [15] <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-131-million-boost-americas-battery-supply-chain-and> 5.10.2023.
- [16] https://www.emo.org.tr/ekler/a37abdeefe1dab1_ek.pdf, 15.04.2024
- [17] <https://unfccc.int/decisions>, 12.04.2024.
- [18] <https://www.bain.com/insights/building-a-resilient-global-ev-supply-chain-amid-uncertainty/>, 12.04.2024.
- [19] <https://www.stellantis.com/en/news/insights/driving-toward-a-new-era-of-sustainable-mobility>, 12.04.2024.
- [20] <https://www.bmwgroup.com/en/sustainability/goals.html>, <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/renault-group-dissects-its-decarbonization-strategy-at-changenow/>, 12.04.2024.
- [21] <https://group.mercedes-benz.com/responsibility/sustainability/climate-environment/ambition-2039-our-path-to-co2-neutrality.html>, 12.04.2024.
- [22] <https://www.volkswagen-group.com/en/focus-topics-16036>, 12.04.2024.



MADEN REZERVLERİ VE ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

M. O. Kangal¹[+], Z. Üçerler¹, T. Türk¹, O. M. Gürkan¹, E. Çuhadar², Ç. Eyüboğlu²

ÖZET

Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan Li iyon pillerde kullanılan elementler arasında lityum (Li), grafit, nikel (Ni), manganez (Mn), demir (Fe), kobalt (Co), alüminyum (Al), bakır (Cu) ve fosfat (PO_4^{3-}) bulunmaktadır. Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve talebin artmasıyla birlikte bu elementlere ve dolayısıyla bu elementlerin çıkarıldığı madenlere olan talep de büyümektedir. Ülkeler, enerji güvenliği ve sürdürülebilirlik açısından bu kaynaklara erişim konusunda stratejiler geliştirmekte ve maden rezervlerini yeniden değerlendirmektedirler. Elektrikli araç bataryalarında kullanılan madenlerin varlığı ve işletilebilir olması, elektrikli araçların ve temiz enerji teknolojilerinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu önemin temel sebepleri arasında;

Enerji Dönüşümü ve Temiz Ulaşım: Elektrikli araçlar, fosil yakıtlı araçlara kıyasla kullanımları esnasında daha düşük karbon ayak izine sahiptir ve temiz enerji dönüşümünün bir parçası olarak görülmektedir. Ancak, bu araçların bataryalarında kullanılan lityum, nikel, kobalt ve diğer madenlere olan talep arttıkça, bu madenlerin sürdürülebilir ve etik koşullarda çıkarılması önem kazanmaktadır.

Küresel Talep ve Tedarik Güvenliği: Elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerine olan küresel talep arttıkça, bu madenlere olan talep de büyümektedir. İşletilebilir rezervlere sahip olmak, bir ülkenin enerji güvenliğini sağlamak açısından önemlidir. Özellikle, bu madenleri ithal etmek yerine yerel kaynaklardan temin etmek, enerji bağımsızlığını artırabilir.

Çevresel ve Sosyal Sorumluluk: Maden çıkarımı, çevresel etkileri ve yerel topluluklara olan sosyal etkileri nedeniyle dikkatli bir şekilde yönetilmelidir. İşletilebilir rezervlere sahip olmak, çevresel sürdürülebilirlik ve sosyal sorumluluk ilkelerini koruma potansiyelini artırabilir.

Teknolojik İnovasyon ve Rekabet: Elektrikli araç pazarında rekabet, batarya teknolojisinin ve bileşenlerinin sürekli olarak geliştirilmesini gerektirir. İşletilebilir maden rezervlerine sahip olmak, yerel endüstrilerin bu süreçte lider konumda olmasını sağlayabilir ve teknolojik inovasyonları teşvik edebilir.

Fiyat Dalgalanmalarına Karşı Güvence: Madenlerin dünya genelindeki fiyatları dalgalanabilir. İşletilebilir rezervlere sahip olmak, enerji depolama ve elektrikli araç sektörlerindeki şirketlere, fiyat dalgalanmalarına karşı daha dirençli olma olanağı sağlaması yatmaktadır.

Elektrikli araç bataryalarında kullanılan madenlerin varlığı kadar, bu madenlerin işletilebilir olması ve çıkarımının sürdürülebilir ve etik standartlara uygun bir şekilde gerçekleştirilmesi önemlidir. Bu, temiz enerji ve elektrikli araç teknolojilerinin uzun vadeli başarısı ve sürdürülebilirliği için kritik bir unsurdur.

Bu bölümde elektrikli araç bataryalarında kullanılan kritik hammaddelerin ülkemiz ve dünya maden rezervleri ve bu madenlerin zenginleştirme yöntemleri anlatılmaktadır. Unutulmamalıdır ki bir ülkenin maden rezervlerine sahip olması, o ülkenin zenginliğinin

[+] kangal@itu.edu.tr

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, Maslak, Sarıyer, 34469 İstanbul, Türkiye.

2 Exitcom Recycling, Çepni Mahallesi Suadiye Bağdat Cd. No:40 Kartepe, 41250 Kocaeli, Türkiye.

bir göstergesidir. Ancak, bu potansiyelin katma değeri yüksek teknolojiler için doğru işletilmesi ve kullanılması ve bunun için de insana ve çevreye duyarlı araştırma geliştirme ve yatırım gereklidir.

1. GİRİŞ

Li iyon bataryalarında kullanılan madenler, zenginleştirme sonrası formları, bataryalarda kullanılan formları ve kullanıldıkları batarya türleri Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Li iyon bataryalarda kullanılan madenler

Madencilik	Metalurjik Prosesler Sonrası Yarı Ürünler	Katot ve Anot Girdi Malzemeleri	Pillerde Kullanım
Nikel Cevherleri	Karışık hidroksit çökteller	Nikel sülfat	LNO, LMO, LMNO, NMC, NCA katot
Kobalt Cevherleri	Karışık hidroksit çökteller	Kobalt sülfat	LNO, LMO, LMNO, NMC, NCA katot
Manganez Cevherleri	Karışık hidroksit çökteller	Mangan sülfat	LNO, LMO, LMNO, NMC, NCA katot
Lityum Cevherleri	Süpodümen	Lityum hidroksit Lityum karbonat	Tüm katotlar ve elektrolit
Lityum Cevherleri	Tuz ve lityum karbonat	Lityum fosfat	LFP katot
Demir Cevherleri	Demir Sülfat	Demir fosfat	LFP katot
Fosfat Cevherleri		Ammonium polyphosphate H ₃ PO ₄	LFP katot
Alüminyum Cevherleri	Alüminyum ve Alüminyum sülfat	Alüminyum ve Alüminyum sülfat	NCA katot ve pil katot elektrot folyosu, kutuplar ve kese tipi hücrelerin kılıfları
Bakır Cevherleri	Bakır	Bakır	Anot elektrot folyosu ve batarya paketinde kablo
Titanyum Cevherleri	Titanyum oksit	Titanyum oksit	LTO katot
Grafit Cevherleri	Grafit	Grafit	Grafit anot
Silika Cevherleri	Silisyum	Silisyum	Silisyum anot

Türkiye, Li iyon batarya üretimi için gerekli olan bazı önemli maden rezervlerine sahiptir. Ancak, bu rezervlerin büyüklüğü, madenlerin çıkarılma ve işlenme süreçleri, çevresel etkiler, teknik kapasite ve ekonomik faktörler gibi bir dizi faktör, Türkiye'nin Li iyon batarya üretimi konusundaki potansiyelini etkilemektedir.

Türkiye'nin lityum rezervleri genellikle lityumun birleştiği çeşitli mineraller içerir. Ancak, lityum madenciliği ve lityumun ticari kullanımında genellikle teknik ve ekonomik zorluklarla karşılaşabilir. Lityum, özellikle lityum karbonat veya lityum hidroksit gibi özel formlarda madencilikten çıkarılır ve bu ürünler Li iyon bataryalarında kullanılan hammaddeleri oluşturur. Türkiye, lityum rezervleri konusunda çalışmalar yapmış ve bu alanda yatırımlar gerçekleştirmiştir. Özellikle Eskişehir bölgesinde ve çeşitli bölgelerde yapılan araştırmalar, ülkede lityum rezervlerinin varlığını göstermektedir. Ancak, lityum madenciliği sadece lityum rezervlerinin keşfedilmesiyle sınırlı değildir. Ayrıca, çevresel sürdürülebilirlik, madencilik süreçlerinin etkisi, teknolojik altyapı, işgücü becerileri ve ekonomik faktörler de önemlidir. Türkiye'nin Li iyon batarya üretimi konusundaki potansiyelini tam olarak değerlendirebilmek için bu faktörlerin tümünün dikkate alınması gerekmektedir.

Sonuç olarak, Türkiye'nin lityum rezervlerine sahip olması, ülkenin Li iyon batarya üretimi potansiyeli olduğunu gösterir; ancak, bu potansiyelin gerçekleştirilmesi için daha fazla araştırma, yatırım ve endüstriyel gelişmelerin gerekebileceği unutulmamalıdır.

Grafit, Li iyon bataryalarının anot malzemesinde kullanılan önemli bir bileşendir. Elektrikli araçlarda ve enerji depolama sistemlerinde kullanılan bu bataryaların talebinin artmasıyla birlikte, grafit rezervlerine olan ilgi de artmıştır. Türkiye'nin grafit rezervleri özellikle Çorum, Balıkesir, Kırşehir ve Ankara gibi bölgelerde bulunmaktadır. Bu bölgelerdeki grafit maden ocakları, yerel ve ulusal enerji depolama projeleri ile birlikte grafit çıkarmakta ve işlemektedir. Grafit, dayanıklılığı ve iletken özellikleri nedeniyle Li iyon bataryalarındaki anot malzemesi olarak tercih edilmektedir. Dolayısıyla, Türkiye'nin sahip olduğu grafit rezervleri, ülkede enerji depolama ve elektrikli araç endüstrilerinde batarya kalitesine katkı sağlama potansiyeline sahiptir. Ancak bu potansiyeli tam anlamıyla değerlendirebilmek için sürdürülebilir madencilik yöntemlerinin yanı sıra madendeki grafit ile beraber diğer minerallerin cinsi ve miktarı da analiz edilmelidir.

Türkiye'nin nikel rezervleri özellikle Eskişehir bölgesinde yer almaktadır. Bu bölgede yapılan madencilik çalışmaları ve keşifler, Türkiye'nin nikel rezervlerine sahip olduğunu göstermektedir. Nikel, özellikle Li iyon bataryalarında katot malzemesi olarak kullanılan bir metaldir. Elektrikli araçlardaki Li iyon bataryalarda nikelin kullanımı yaygındır. Nikel, bataryaların enerji yoğunluğunu artırarak araç



menziline ve performansını olumlu yönde etkiler. Türkiye'deki nikel rezervleri, ülkede enerji depolama ve elektrikli araç endüstrilerine yönelik batarya üretiminde potansiyel bir kaynak oluşturabilir.

Manganez, Li iyon bataryalarının bir bileşeni olan katot malzemesinde kullanılan önemli bir bileşen olarak öne çıkar. Türkiye'deki manganez rezervlerinin önemli bir kısmı Mersin, Kayseri ve Balıkesir gibi bölgelerde yer almaktadır. Manganez, Li iyon bataryalarındaki katot malzemesi olarak ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Türkiye, Karadeniz Bölgesi, İç Anadolu Bölgesi ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi gibi çeşitli bölgelerinde demir madenlerine sahiptir. Demir, metalurji endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahip olmasının yanı sıra, elektrikli araçlarda ve enerji depolama sistemlerinde kullanılan batarya teknolojilerinde de bazı uygulamalarda bulunabilir. Elektrikli araçlarda demir, özellikle lityum demir fosfat (LiFePO_4) gibi batarya teknolojilerinde katot malzemesi olarak kullanılır. Bu tür bataryalar, özellikle enerji depolama sistemleri ve bazı elektrikli araç modellerinde tercih edilmektedir. Türkiye'nin demir rezervleri, ülkede çeşitli madencilik projelerine kaynak sağlamaktadır.

Türkiye'nin doğal olarak zengin kobalt rezervleri bulunmamaktadır. Kobalt, Li iyon bataryalarının bir bileşeni olarak öne çıkar ve özellikle enerji depolama sistemleri ve elektrikli araçlarda kullanılır. Ancak, kobaltın büyük bir kısmı Demokratik Kongo Cumhuriyeti'nde bulunmaktadır ve diğer önemli kaynaklar arasında Avustralya, Rusya ve Kanada yer almaktadır. Kobaltın madencilik ve ticaretinde yaşanan bazı etik ve çevresel endişeler, sektörde alternatif batarya teknolojilerinin ve madde kullanımının araştırılmasına yol açmıştır. Bu bağlamda, enerji depolama teknolojilerinde ve elektrikli araçlarda kobalt kullanımını azaltma veya alternatif malzemelere geçiş arayışları devam etmektedir.

Alüminyum, hafif ve dayanıklı bir metal olup, elektrikli araçların yapısal bileşenlerinde ve batarya kasa yapısında kullanılabilir. Bunun yanı sıra katot aktif madde sektöründe bir bileşen (Nikel, Kobalt, Alüminyum, NCA) olarak kullanıldığı gibi katotta akım toplayıcı folyo olarak da kullanılır. Elektrikli araçlar genellikle daha hafif olmaları ve enerjiyi daha verimli kullanmaları açısından alüminyum gibi hafif ve güçlü malzemelerin kullanımına odaklanır ve bu sebeple şasi ve gövdede alüminyum alaşımları kullanılır. Türkiye, dünya genelinde önemli alüminyum üreticilerinden biridir. Alüminyum rezervleri genellikle boksit madeni içerisinde bulunmaktadır.

Türkiye, dünya genelinde önemli bakır üreticilerinden biridir. Bakır, elektrikli araçlarda ve enerji depolama sistemlerinde kullanılan elektrik iletkenliği yüksek bir metaldir. Elektrikli araçlarda bakır, motor sargılarında ve batarya sistemlerinde anotta akım toplayıcı folyo olarak kullanılır. Ayrıca, enerji depolama sistemlerinde bakır, iletim hatlarında, bağlantılarda ve diğer elektrikselleşenlerde kullanılır. Türkiye'deki bakır rezervleri çeşitli bölgelerde bulunmaktadır, özellikle Kastamonu, Siirt ve Balıkesir gibi yerlerde madencilik faaliyetleri sürdürülmektedir. Bu rezervler, Türkiye'nin enerji depolama ve elektrikli araç endüstrilerinde kullanılan bakırın yerel üretimine katkı sağlama potansiyeline sahiptir.

Fosfatlar, gübre endüstrisinde yaygın olarak kullanıldıkları gibi, aynı zamanda Li iyon batarya teknolojilerinde katot malzemesi üretiminde kullanılabilirler: Lityum demir fosfat (LiFePO_4). Türkiye'nin fosfat rezervleri özellikle Mardin bölgesinde yer almaktadır. Bu bölgelerde fosfat madenciliği yapılmakta ve çıkarılan fosfatlar genellikle gübre endüstrisinde kullanılmaktadır. Fosfatlar Li iyon bataryalarında kullanılan katot malzemelerinin bir parçası olarak enerji depolama sistemlerinde rol oynayabilir. Türkiye'nin fosfat rezervleri, bu teknolojilerin üretiminde ve enerji depolama sektöründe kullanılabilir malzemeler sağlama potansiyeline sahip olabilir.

2. LİTYUM

Lityum, atom numarası 3 olup, periyodik tabloda Li sembolü ile gösterilmektedir. Özgül ağırlığı $0,534 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ve atom ağırlığı ise $6,941 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ 'dir. Lityum dünyada bulunma sıklığı açısından 25. sırada olup, deniz sularında ortalama tenör 20 ppm ve yeryüzünde ise $0,006\%$ 'dir. Lityum, yer kabuğunda metal formda bulunmamakla birlikte üretimi kayaç tipine bağlı olarak cevherden veya salamuralardan (tuzlu sulardan) yapılmaktadır (Akgök ve Şahiner, 2017). Dünyada bulunan lityum rezervlerinin 26% 'sı pegmatik tipi kayaç olup, en önemli lityum mineralleri olan spodümen, lepidolit, petalit, zivaldit ve amblygonit bu kayaç tipinde bulunmaktadır (Akgök ve Şahiner, 2017; Meshram vd., 2014). Tablo 2'de önemli lityum mineralleri verilmektedir (Gourcerol vd., 2019).

Üretim yapılan birincil lityum minerali spodümen minerali olup, $3,1-3,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ yoğunluğa sahiptir. Saf spodümen içerisinde $8\% \text{ Li}_2\text{O}$ içeriği mevcuttur.

Sedimanter tip kayaçlar ise, lityum rezervlerinin 8% 'ini oluşturmaktadır (Akgök ve Şahiner, 2017). Bu tip rezervler genellikle kil içeriği yüksek rezervlerdir. Hektorit, lityum içeriği yüksek ve smektit grubu altında bulunan önemli bir lityum mineralidir. Genellikle, tuvenan cevherin Li içeriği $0,3-0,7\%$ arasında olmaktadır. En önemli hektorit yatağı, mineral ismini aldığı, ABD-Kaliforniya-Hektor bölgesindedir ve bölgedeki Li içeriği $0,7\%$ 'dir (Meshram vd. 2014). Bir başka ve yeni keşfedilmiş lityum içeren mineral ise, Sırbistan-Jadar bölgesinde ismini alan ve borosilikat bir yapıda olan jadarit mineralidir (Mohr vd., 2010). Bu bölgede, günümüzde madencilik faaliyetleri başlamamış ancak projelendirme aşamasındadır.



Li iyon bataryalarda Li katot malzeme üretiminde Li_2CO_3 veya LiOH olarak kullanılırken ayrıca lityum tuz formları (LiPF_6 , LiCl) ile elektrolitte kullanılır. Bu yönü ile bu madenlerde bulunan minerallerden ekonomik olarak bataryada kullanılabilir kalitede Li_2CO_3 , LiOH ve elektrolit olarak kullanılacak Li içeren tuzların eldesi gereklidir. Bu kitabın ikinci bölümünde madenden metale dönüşüm için gerekli prosesler anlatılacaktır.

Tablo 2. Önemli lityum minerallerinin isimleri, kimyasal formülleri, bağlı oldukları mineral grubu, teorik %Li ve % Li_2O içerikleri ve özgül ağırlıkları (Gourcerol vd., 2019).

Mineral	Kimyasal Formülü	Mineral Grubu	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik	İçerik	
					% Li_2O	%Li
Spodümen	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	Inosilikat	3,2	6,5-7	8,03	3,73
Litiofillit	$\text{Li}(\text{Mn},\text{Fe})\text{PO}_4$	Fosfat	3,5	5	9,53	4,43
Siklerit	$\text{Li}_{1-x}(\text{Fe}_x^{+3},\text{Mn}_{1-x}^{+2})\text{PO}_5$	Fosfat	3,2-3,4	4	<9,48	4,40
Ferrisiklerit	$\text{Li}_{1-x}(\text{Fe}_x^{+3},\text{Mn}_{1-x}^{+2})\text{PO}_4$	Fosfat	3,2-3,4	4	<9,47	4,40
Lepidolit	$\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	Fillosilikat	2,8-2,9	1,57	7,7	3,58
Ambigonit	$(\text{Li},\text{Na})\text{AlPO}_4(\text{OH},\text{F})$	Fosfat	2,98	5,5-6	10,1	4,69
Trifilit	$\text{Li}(\text{Fe},\text{Mn})\text{PO}_4$	Fosfat	3,5	4-5	9,47	4,40
Politionit	$\text{KLi}_2\text{Al}(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$	Fillosilikat	2,6-2,8	2-3	6,46	3
Petalit	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$	Tektosilikat	2,4	6-6,5	4,88	2,26
Ökriptit	LiAlSiO_4	Feldspatoid	2,67	6,5	11,86	5,51
Montebrasit	$\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{OH},\text{F})$	Fosfat	3,98	5,5-7	10,1	4,69
Jadarit	$\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$	Neosilikat	2,45	4-5	7,3	3,39
Zinvaldit	$\text{LiKFeAl}_2\text{F}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}$	Fillosilikat	2,9-3,2	5,5	4,12	1,91
Elbait	$\text{Na}(\text{Li}_{1,5}\text{Al}_{1,5})\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4$	Siklosilikat	2,9-3,2	7,5	4,07	1,89
Holmquistit	$\text{X}(\text{Li}_2)(\text{Mg}_3\text{Al}_2)(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	Inosilikat	3,1	5,5	3,98	1,85
Cookeit	$\text{LiAl}_4(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	Fillosilikat	2,6	2,5-3,5	2,9	1,34
Hektorit	$\text{Na}_{0,3}(\text{Mg},\text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$	-	2-3	1-2	1,2	0,56

2.1. Türkiye’de Lityum Madenleri

Maden Tetkik Arama (MTA, 2017) tarafından hazırlanan rapora göre, Türkiye’de günümüzde ekonomik olarak işletilebilecek bir rezerv olmadığı belirtilmektedir. Yozgat-Sorgun bölgesinde pegmatit tipi bir yatak bulunmakla birlikte, belirtilen sebepten dolayı, üretim çalışmaları yapılamamaktadır. Bu rezerv dışında, Tuz Gölü’nde araştırmalar yapılmış, zenginleştirilebilir Li konsantrasyonu olmasına karşın Mg:Li oranı 6:1 oranının çok üzerinde olması sebebiyle ekonomik bir zenginleştirmenin henüz yapılamayacağı belirtilmiştir (Üçerler, 2020). Daha önce yapılmış birçok araştırma olmakla beraber bor rezervlerinin bulunduğu bölgede ekonomik olarak elde edilebilecek Li içeriği mevcuttur (Şensöz vd. 2021; Helvacı vd.2004).

İMMİB (İstanbul Maden ve Metaller İhracatçı Birlikleri) tarafından Dünya Gazetesi’nde 2021 yılında yayınlanmış köşe yazısına göre, Türkiye’de lityum ile ilgili önemli gelişmelerin yaşandığı ve 2020 yılı sonunda Eti Maden tarafından açılan Li_2CO_3 üretim tesisinde bor atıklarından çıkan sıvı atıklar içerisinde Li_2CO_3 üretilmekte olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, ASPİLSAN tarafından Li iyon pil üretiminde kullanmak için gerekli deneme çalışmalarının devam ettiği de belirtilmektedir (Int. Kyn.1).

2.2. Dünya’da Lityum Madenleri

Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırma Kurumu (United States Geological Survey, USGS) (2022) raporuna göre, dünya lityum rezervi 89 milyon tondur. Tablo 3’te, dünya lityum rezervlerinin ülke ve yıl bazında üretim miktarları verilmektedir. Tablo 3’de belirtilen üretim ve rezerv miktarlarının verilmediği Bolivya’da ise rezerv miktarı 21 milyon ton olarak verilmiştir (USGS, 2022).

**Tablo 3.** Başlıca lityum üretici olan ülkelerin yıllar bazında üretim miktarları (ton)

Ülkeler	2016	2017	2018	2019	2020	2021 ^t	Rezerv (10 ⁶ ton)
Arjantin	5.800	5.700	5.400	6.300	5.900	6.200	19
Şili	14.300	14.200	17.000	19.300	21.500	26.000	9,8
ABD	-	-	-	-	-	-	9,1
Avustralya	14.000	40.000	58.800	45.000	39.700	55.000	7,3
Çin	2.300	6.800	7.100	10.800	13.300	14.000	5,1
Kanada	-	-	2.400	200	-	-	2,9
Zimbabve	1.000	800	1.600	1.200	417	1.200	0,5
Brezilya	200	200	300	2.400	1.420	1.500	0,47
Portekiz	400	800	800	900	348	900	0,27
Toplam	38.000*	69.000*	95.000*	86.000*	82.500*	100.000	

t: tahmini, -: üretim verileri mevcut değildir.

2.3. Türkiye ve Dünya’da Lityum Ticareti

Dünyada, lityum ithalat ve ihracatı denildiğinde ön plana çıkan lityum karbonat ticareti olmaktadır. LCE (Lityum Karbonat)’nin ticareti, dünya ticaretinin %0,006’sını temsil etmektedir. 2020 yılına göre LCE ihracatını ve ithalatını en çok yapan ülkeler, % payları ve ihracat değerleri Tablo 4’te verilmektedir (Int. Kyn. 2 ve 3).

Tablo 4. 2020 yılına göre LCE ihracatını ve ithalatını en çok yapan ülkeler, % payları ve ihracat-ithalat değerleri

Ülkeler	İhracat payı (%)	İhracat değerleri, (milyon \$)	Ülkeler	İthalat payı (%)	İthalat değerleri, (milyon \$)
Şili	70	632	Güney Kore	29	313
Çin	6,76	60	Çin	24	260
Arjantin	6,27	56	Japonya	17,7	191
Hollanda	4,1	36	ABD	7,12	76
Belçika	3,27	29	Belçika	5,28	56

2022 yılının Eylül ayının sonlarına doğru, lityum metali, lityum konsantresi, LCE ve LiOH (lityum hidroksit) kalitelerine bağlı olarak satış fiyatları Tablo 5’te verilmiştir (Int Kyn-4).

Tablo 5. Farklı tipte lityum bileşiklerinin kalitelerine bağlı olarak, konsantre ve metal lityumun satış fiyatları (Int. Kyn.4).

Ürün		Fiyat
Spodümen Konsantresi	%6 Li ₂ O	5200\$/ton (CIF, Çin)
Endüstriyel kalite LCE	%99,2	68.600 \$/ton
Pil Kalite LCE	%99,5	70.350 \$/ton
Pil kalitesinde LOH	%56,5	68.880 \$/ton
Pil kalitesinde LOH (ince toz)	%56,6	70.070 \$/ton
Endüstriyel kalite LOH	%56,5	66.850 \$/ton
Pil kalitesinde LOH	%56,5	75,5 \$/kg (CIF Çin, Japonya ve Kore)
Li metal	-	411.600 \$/ton

2.4. Lityum Kullanım Alanları

Lityum, konsantre, metal veya bileşik halinde piyasada farklı kullanım amaçları doğrultusunda elde edilebilen bir hammaddedir. Arz-talebe göre, lityum türevi ürünlerin pazarda kullanım oranları başlıca %25 oranında LiOH, >%50 oranında Li₂CO₃ olmak üzere, %20-25 oranında ise lityum konsantreleri, lityum metali ve diğer lityum türevi bileşikler talep edilmektedir (Yıldız, 2016). Konsantre olarak kullanımına bakıldığında, özellikle lepidolit, spodümen ve petalit konsantrelerinin kalitelerine göre kullanım alanları mevcuttur. Özellikle, cevher hazırlama yöntemleri ile %Li₂O içeriği yükseltilmiş konsantreler doğrudan cam-seramik endüstrisinde kullanılmaktadır. Cam endüstrisinde kullanıldığı zaman, Li₂O bileşiği, cam bünyesinde viskoziteyi arttırmakta, camın kırılgenliğini ve cam ergime sıcaklığını düşürmektedir. Seramik sektöründe kullanılmasının amacı ise, seramik sır malzemelerine ısı ve kimyasal kararlılık sağlamak ve ısı ile genişlemelerini azaltmaktır (Akgök ve Şahiner, 2017; Yıldız, 2016).

Lityum metalik formda olduğu zaman ise, özel alaşımlar içerisinde kullanılmakta ve Cr, Cu ve demir dışı metallere alaşımlar yapılabilmektedir. Sağlık alanında vitamin üretimi veya enerji depolama özelliği sebebiyle de nükleer enerji alanında kullanımı mevcuttur. Değerliğine göre, füzyon patlama özelliği sebebiyle yakıt, düşük özgül ağırlığı olması sebebiyle de askeri alanda roketlerde kullanımı mevcuttur (Akgök ve Şahiner, 2017).

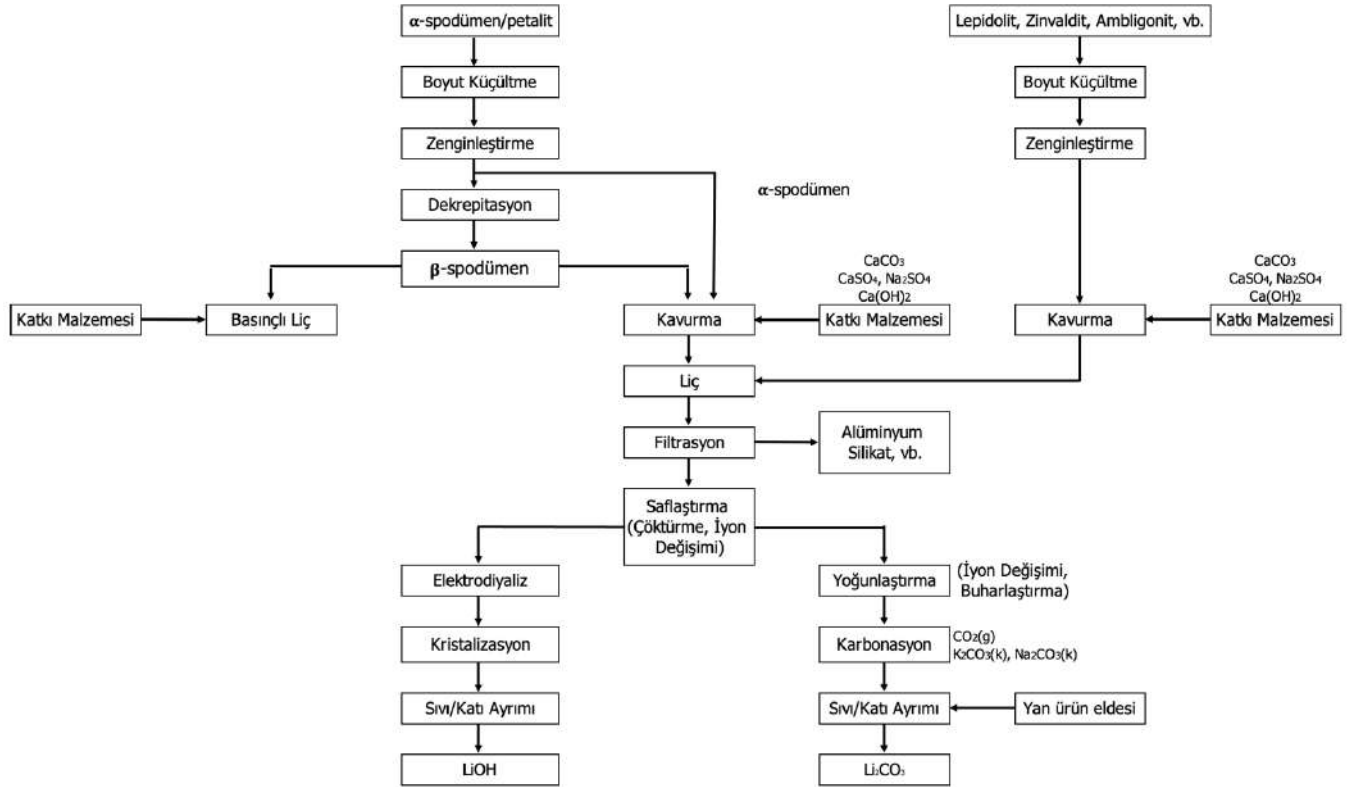
Lityum karbonatın kullanım alanı çok fazla olmasına karşın en önemlisi elektrikli araçlarda kullanılan Li iyon pil üretimi olarak ön plana çıkmaktadır. Ancak bunun yanı sıra Li₂CO₃ cam üretiminde de kullanılabilen, camın şekil almasını kolaylaştırmakta, ergime sıcaklığını düşürmekte ve ortamın iklim koşullarına göre cam direncinin sabit tutulmasını sağlamaktadır. Lityum karbonatın en önemli özelliklerinden bir tanesi de diğer lityum bileşiklerinin Li₂CO₃ bazlı üretilebiliyor olmasıdır. Bu bileşikler, LiCl, LiOH.H₂O, LiF, LiBr olmak üzere temel lityum bileşikleridir. Li₂CO₃'ün satış fiyatlarının verilmiş olduğu Tablo 4'te de görülmektedir ki, Li₂CO₃ farklı saflıklarda üretilebilmekte ve bu saflıklara göre de kullanım alanları değişmektedir. Çok yüksek saflıkta elde edilen Li₂CO₃, Li iyon pillerde, medikal alanda, fosfat tuzu üretiminde, optik özel camlarda kullanılabilir. Yüksek saflıktaki lityum hidroksit monohidrat, Li iyon pillerde, lityum kimyasallarının, yağ ve korozyona dayanıklı çinko pigmentlerinin üretiminde ve CO₂ emici olarak kullanılabilir. Lityum dihidrojen fosfat bileşiği ise, lityum demir fosfat pillerde katot malzemesi üretiminde kullanılabilir. LiCl bileşiği ise, nem alıcı olarak, Li iyon pillerde kullanılan elektrolitlerde ve metalik Li eldesinde kullanılmaktadır (Yıldız, 2016).

2.5. Lityum Minerallerinin Zenginleştirilmesi

Lityum içeren minerallerin zenginleştirilmesi cevherden Li₂CO₃ üretiminin maliyetli olması sebebiyle genel olarak salamuralardan yapılmaktadır. Li₂CO₃ üretiminin %60'ını neredeyse And Dağları'nda bulunan lityum üçgeni olarak adlandırılabilir Arjantin, Şili ve Bolivya karşılamaktadır.

Cevherden üretimin yapılması için ise, açık ocak veya yeraltı madencilik operasyonlarının ardından zenginleştirme tesislerine gönderilen cevher öncelikle boyut küçültme işlemine tabi tutularak sonraki prosese uygun bir boyuta indirilmektedir. Mineralin tipine bağlı olarak, gravite ile zenginleştirme, manyetik duyarlılığa göre zenginleştirme veya yüzey özelliklerine bağlı olarak flotasyon gibi zenginleştirme yöntemleri uygulanarak, mineralin tipine bağlı olarak %4-6 arasında Li₂O içeren konsantre elde edilmektedir. Genel zenginleştirme akış şeması Şekil 1'de verilmektedir (Tran ve Luong, 2015). Akış şemasında belirtildiği gibi, spodümen minerali zenginleştirildikten sonra kavurma ve liç prosesleri ve ardından Li₂CO₃ elde etmek için yapılan proseslerde lityum ekstraksiyonunun sağlanabilmesi için dekrepitasyon prosesine tabi tutulması gerekmektedir. Bu işlem 1.000-1.100°C 'de 2 saat boyunca kalsinasyon işleminin uygulanmasıdır. Spodümen doğada α-spodümen olarak monoklinik kristal yapıda bulunmakta olup bu kristal yapıdaki konsantreden lityum ekstraksiyonu gerçekleştirilememektedir. Bu sebeple, spodümen tetragonal kristal yapıya sahip β-spodümen formuna dönüştürülerek geri dönüştürülemez bu reaksiyon ile lityum ekstraksiyonu yapılabilir (Peltosaari vd., 2014).

Zenginleştirme işlemlerinin kademeli olarak uygulandığı Avustralya'da bulunan en büyük lityum zenginleştirme tesisi Greenbushes zenginleştirme tesisidir (Tadesse vd., 2019). Avustralya-Greenbushes Madeni'nde Li₂CO₃ üretimi yapılmaması sebebi ile tesiste dekrepitasyon işlemi yapılmamaktadır. Prosesin genelinde iki tip konsantre üretilmekte olup, biri cam kalitesinde spodümen konsantresi, diğeri ise pil kalitesinde spodümen konsantresidir. Cam kalitesinde üretilen konsantre manyetik ayırma prosesi ile elde edilmekte iken, pil kalitesinde olan konsantre gravite ile ayırma+flotasyon+manyetik ayırma kombinasyonu ile çok kademeli zenginleştirme prosesi ile %7,5-%7,7 Li₂O ve <%0,1 Fe₂O₃ içerikli elde edilmektedir. Gravite ile ayırma prosesinde elde edilen ağır ürün içerisinde de tantal içeriği yüksektir (Tadesse vd., 2019).



Şekil 1. LiOH ve Li₂CO₃ için genel zenginleştirme akış şeması (Tadesse vd. 2019).

2.5.1. Gravite ile zenginleştirme

Gravite ile zenginleştirmenin yapıldığı birçok zenginleştirme tesisi olup, bunlar; Greenbushes-Avustralya, Bernic Gölü-Kanada ve Bald Hill-Avustralya gibi büyük lityum tesisleridir. Yan kayacına bağlı olmak üzere feldspat, mika tipi minerallerin uzaklaştırılmasında genel olarak lityum içeren mineraller ağır ürün olarak elde edilirken, tantal içeren cevherlerde lityum içeren mineral hafif üründe yer almaktadır (Tadesse vd. 2019).

2.5.2. Manyetik ayırma ile zenginleştirme

Manyetik ayırma, pil kalitesinde veya cam kalitesinde elde edilmek istenen lityum konsantrasyonunun içerisindeki manyetik duyarlılığa sahip demir içerikli safsızlıkların uzaklaştırılması amacıyla kullanılabilir (Tadesse vd. 2019). Zinvaldit gibi manyetik duyarlılığa sahip olan paramanyetik lityum minerallerinin ise manyetik ürün olarak alınarak zenginleştirmesinde de yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcılar kullanılabilir (Leibner vd. 2016).

2.5.3. Flotasyon ile zenginleştirme

Özellikle spodümen mineralinin zenginleştirilmesinde, doğal pH'da, anyonik-oksihidril grubunda yer alan yağ asitlerinin veya sabunların kollektör olarak kullanımı ile spodümen yüzen ürün olarak elde edilebilir. Elde edilen kaba konsantreye, temizleme flotasyonu da yapılmaktadır. Genel olarak yan kayacı feldspat ve mika olan spodümen, flotasyon ile yüzen ürün olarak elde edilmesinin ardından, batan ürün içerisindeki feldspat ve mika da ayrıca flotasyon prosesleri ile kazanılabilir. Cevher içerisinde tantalit bulunduğu ise, spodümen ile birlikte yüzen ürün olarak elde edilmekte ve daha sonrasında iki mineralin ayrımı için gravite ile zenginleştirme işlemi uygulanmaktadır. Lepidolitin flotasyonunda ise, anyonik kollektör kullanılamamakta ve genel olarak katyonik bir kollektör olan amin kullanılabilir. Bunun yanı sıra, zinvaldit mineralinin genel olarak mikalarla ve özellikle de biyotit ile birlikte bulunması sebebiyle de flotasyon prosesi mika flotasyonu ile aynı olmakla beraber asidik pH'da amin tipi bir kollektörün kullanımı ile yüzen ürün olarak elde edilebilir (Üçerler, 2020).

2.5.4. Elde edilen konsantreye uygulanan kavurma ve liç prosesi

Kademeli zenginleştirme proseslerinin uygulanmasının ardından, özellikle lityum karbonat eldesine uygun %Li₂O içeriğine sahip konsantreye, kavurma ve liç prosesi uygulanarak lityum çözeltiye alınabilmekte ve bununla birlikte çöktürme işlemleri sonucunda Li₂CO₃ elde edilebilmektedir. Bu prosesin uygulanması halinde birçok farklı parametre söz konusu olmaktadır ki bunlar, kavurma sıcaklığı, süresi, katkı maddelerinin tipi ve oranları, liç sıcaklığı-süresi ve sıvı/katı oranıdır. Elde edilmek istenen ürün LiOH veya LiCl olması halinde, prosesin akış şeması da istenilen ürünlere bağlı olarak değişmektedir. Spodümen konsantresinin eldesinden sonra, lityumlu bileşiklerin üretilmesi için konsantre yaklaşık olarak %7,2 Li₂O içeriğine sahip olmaktadır. Konsantrenin, yüzey alanının artırılması amacıyla ince boyutlara öğütülmesi gerekmektedir ki böylece ısı işlem daha verimli olarak gerçekleşmektedir. Spodümen için gerekli olan ön prosesin uygulanmasının ve spodümenin kristal yapısının transformasyonu sonucunda β-spodümen olarak elde edilmesinin ardından, kavurma ve liç işlemleri uygulanarak lityum içeren bileşiklerin üretimi sağlanmaktadır. Barbosa ve arkadaşlarının (2015) yaptıkları bir çalışmada, kavurma prosesi için kullanılan katkı maddesi olarak CaCl₂'nin kullanılması önerilmiş ve klorlayıcı kavurma uygulandıktan sonra nihai ürün olarak ise LiCl elde edilmiştir. Özellikle kavurma sıcaklığının belirlenmesi için DTA-TGA (Diferansiyel Termal Analiz-Termogravimetric Analiz) yapılması gerekmektedir. Lepidolit konsantresi ile lityumlu bileşiklerin üretimine bakıldığında ise, konsantrenin %5,5 Li₂O içermesi gerekmektedir. Katkı maddesi olarak CaO ve FeS'in birlikte kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. CaO eklenmesinin sebebi, LiF bileşiğinin oluşmasını engellemek olup, CaF₂ bileşiği oluşmaktadır. Bu tip katkı maddeleri ile yapılan kavurmalarda dikkate alınması gereken önemli bir nokta, Ca:F oranı ve FeS:Li oranı olmaktadır. Kavurma işleminin ardından su liçinin uygulanması ile lityum çözeltiye alınmaktadır (Hien-Dinh vd., 2015). Bunun yanı sıra, zinvaldit mineraline uygulanabilecek proseslere örnek olarak, flotasyon ve manyetik ayırma proseslerinin birlikte uygulanması ile elde edilmiş konsantre, ince boyuta öğütülmekte ve ardından, kavurma işleminde CaCO₃ ve CaSO₄.2H₂O (jips) katkı maddesi olarak kullanılabilir. Jips yerine, Na₂SO₄ tuzu da kullanılabilir olup, jipsin daha ucuz olması sebebiyle jips genel olarak tercih edilmektedir (Siame ve Pascoe, 2011; Üçerler ve Güney, 2022). CaCO₃'ün kullanımı reaksiyon sonucu oluşan Li₂SO₄'ün ters reaksiyonla bozulmasının engellenmesi amaçlıdır. CaCO₃, ortamdaki serbest silisyum ile reaksiyona girmekte ve kalsiyum silikat bileşiği oluşturarak oluşan Li₂SO₄'ün bozulmasının önüne geçmektedir (Crocker vd., 1987). Killer içerisinde bulunan hektorit mineraline uygulanabilecek kavurma+su liçi veya asit liçi uygulanabilmektedir (Crocker vd., 1987; Mordoğan vd., 1995). Ancak, bu proses çok fazla asit sarfiyatı olması sebebiyle, ekonomik bir yöntem olmaktan çıkmaktadır. Genel olarak, Na₂CO₃, K₂CO₃, CaCO₃, NaOH, KOH, CaSO₄, Na₂SO₄ ve K₂SO₄ gibi bileşikler kavurma esnasında katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Bunların yanı sıra KCl tuzu da LiCl üretimi için önemli bir katkı malzemeleridir. Aynı zamanda, bu katkı malzemelerinin kombinasyonları da kavurma esnasında uygulanabilmektedir. Başka bir yöntem ise, HCl ile klorlayıcı kavurma yapılması olup, kil mineralleri içerisinde miktarca fazla magnezyum bulunması ve kalsiyumun da lityum kadar çözünmesi sebebiyle asit sarfiyatı çok fazla olmaktadır. Bu sebeple selektif klorlayıcı kavurma da uygulanabilmektedir. Bu yöntemde ise, H₂O-HCl ortamında kavurma işlemi gerçekleştirilebilmektedir (Crocker vd., 1987).

Petalit minerali ile yapılan bu tip proseslerde ise, Li₂O içeriği yaklaşık %4 olmalıdır. Yukarıda belirtilen katkı maddelerinin kullanımının yanı sıra, H₂SO₄ de katkı maddesi olarak kullanılabilir (Sitando ve Crouse, 2012).

Yapılan kavurma+su liçi prosesleri sonucunda, çözeltiye alınan lityumun, Li₂CO₃ olarak kazanımına bakıldığında, çöktürme prosesi ön plana çıkmaktadır. Çözelti önce evaporasyona tabi tutulmakta ve orijinal çözeltinin %50'si buharlaştırılmaktadır. Artan sıcaklığın etkisiyle buharlaşma sonucu ve derişimin artması ile çözeltideki kalsiyum, karbonat formunda çökmekte olup, filtrasyon ile katı/sıvı ayrımı yapılmakta ve ortamdaki uzaklaştırılmaktadır. Sıcaklık artmaya ve orijinal çözeltinin %20'si kalıncaya kadar buharlaşma devam etmektedir. Eğer ortamda başka bir safsızlık yok ise bu proses uygulanmakla birlikte, stokiometrik oranda Na₂CO₃ eklenerek, lityum karbonat çöktürülerek %99 saflıkta elde edilebilmektedir. Buna ek olarak çözeltiye CO₂ gazı verilerek karbonasyon ile de çöktürme işlemi yapılabilir. pH 6,8'de karbonlaşmış çözelti elde edilmesi halinde, Al, Si ve Ca çökmektedirler ve ardından sistemden uzaklaştırılmaktadırlar. 90°C'de çözeltinin hacimce %25'nin kalmış olduğu durumda CaCO₃ çökmektedir. Orijinal çözeltinin, hacimce %85'nin buharlaşmış olduğu ve sıcaklığın 90°C'de sabit tutulduğu durumda ise Li₂CO₃ çökmekte, %95'nin buharlaşmış olduğu durumda, tekrar Li₂CO₃ çökmekte ve çözeltinin %98'nin buharlaşmış olduğu (90°C) durumda da kalan Li₂CO₃ kristallenerek çökmüş olmaktadır. Uygulanabilecek diğer prosesler ise, lityumun solvent ekstraksiyonudur. pH 13'te LIX54 ve TOPO kimyasallarının belirli molaritelerde kullanılması ile lityum çözelti içerisinde ekstrakte edilmekte ve ardından H₂SO₄ ile sıyırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu tip proseslerde önemli olan kullanılan solventlerin oranlar ve organik/asit oranıdır. Ardından sülfatlı formda bulunan lityum, Ca(OH)₂ veya K₂CO₃ eklenmesi ile çözeltinin nötralizasyonunun ardından Li₂CO₃ olarak çöktürülür. Başka bir yöntem ise, çözeltinin %95'nin buharlaştırılması ile kalsiyum içeren atık çökmesi ve ortamdaki uzaklaştırılmaktadır. Çözeltinin %98'nin buharlaştırılması sonucu çok az miktarda H₂SO₄ içeren Li₂SO₄ kristallenmeye başlamakta ve ardından su içerisinde

çözündürmeye tabi tutulmaktadır. Nötralizasyonun yapılması ve K_2CO_3 gibi çöktürücülerin stokiyometrik oranda eklenmesi ile özellikle $90^\circ C$ 'de Li_2CO_3 elde edilmektedir (Jandová vd., 2010; Crocker vd., 1987). Fe veya Al gibi empürilerin de bulunması durumunda, pH 5,5-6,5 arasında $CaCO_3$ eklenerek, karbonatlı formda çöktürülerek uzaklaştırılabilmektedirler, Ca ve Mg'nin bulunduğu sistemlerde, $Ca(OH)_2$ 'nin kullanımı ile hidroksit formda Ca ve Mg çöktürülebilmektedirler. Yüksek oranda saflaştırılmış olan çözeltiliye daha sonrasında, pH 11-12'de Na_2CO_3 'ün eklenerek kalan kalsiyum çöktürülmekte ve ardından sıcaklığın $95-100^\circ C$ 'ye kadar yükseltilmesi ile ve çöktürücü olarak da Na_2CO_3 'ün kullanımı ile Li_2CO_3 çöktürülmektedir. Ancak, Li_2CO_3 birlikte çökmüş olma olasılığı çok yüksek olan Na_2SO_4 'ün uzaklaştırılması için çöktürülen Li_2CO_3 saf su ile yıkanmaktadır. Nihai olarak %99'un üzerinde bir saflıkta Li_2CO_3 elde edilmiş olmaktadır. Çöktürülmüş olan malzemeye XRD analizi yapıldığında piklerin zabuyelit minerali olduğu görülmektedir (Sitando ve Crouse, 2012).

3. GRAFİT

Grafit, ticari olarak kullanılan Li iyon bataryalarda anot aktif malzeme olarak kullanılmaktadır. Grafit, karbon içeriği yüksek, kaygan bir yüzeye sahip ince levhalar halinde yumuşak bir mineraldir. Yoğunluğu 2 g. cm^{-3} ve sertliği ise Mohs sertlik skalasına göre 1'dir (Int Kyn-5). Karbon, grafit, kömür gibi organik yapıların en önemli elementi olmakla birlikte, yakabuğunda %0,2 oranında mevcut olmaktadır.

Grafit, gelişen teknoloji ile kullanım alanının arttığı ve birçok alanda kullanımının kaçılmaz olduğu bir mineral haline gelmiştir. Örneğin, Türkiye'de bazı demir-çelik fabrikalarında çelik üretimi esnasında kullandıkları grafit elektrotlar ithal edilmekte olup bu ürünlerin yerli üretimle eldesi oldukça önemlidir. Global olarak, 2. Dünya savaşıdan önce 200.000-250.000 ton olan üretim miktarı, son yıllarda 800.000 tona ulaşmıştır (Int. Kyn. 5).

Genel olarak doğal kaynakların stratejik önemi zaman içerisinde artan bir eğilim göstermektedir. Grafit de bu minerallerden biri olup, Avrupa Birliği için Kritik Hammaddeler ve Britanya Jeolojik Araştırmalar Konseyi'nin hazırlamış oldukları Risk Listelerine göre, grafit 14 kritik hammadde içerisinde yer almaktadır (EU Report, 2014).

Doğal grafit, ekonomik olarak üç tip yatak tipinden üretim yapılarak elde edilebilmektedir; bunlar, mikrokristal, damar ve kristal pul grafit yataklarıdır.

3.1. Türkiye'de Grafit Rezervleri

Dünyada üretimi yapılan doğal grafitin %60'ı amorf grafitten sağlanmaktadır. Her yıl %4 oranında talep artışı gerçekleşmektedir. Bu açıdan, Türkiye amorf grafit madenciliği ve zenginleştirmesi yapan bir ülke olması sebebiyle bu sektörde önemli ülkelerden biri olmaktadır. Türkiye ile birlikte Çin, Hindistan ve Brezilya'da kaynak/talep oranı açısından önemli rol oynamaktadırlar.

Türkiye'de yapılan grafit üretimi, Türkiye'nin kendi yerel kaynağının yine yerel üretimlerde kullanılması açısından çok önemlidir. Bunun yanı sıra, ithal de edilmektedir ve yıllık 11.000 ton miktarındadır. Bu ithalat genel olarak Çin'den ve Avrupa ülkelerinden gerçekleştirilmektedir. 10 milyon $\text{\$-yıl}^{-1}$ bir ithalat gideri mevcut olmaktadır. İthal edilmiş olan grafit, Türkiye'de, döküm, boya, kurşun kalem, refrakter endüstrisi, mineral yağları ve imalat alanlarında kullanılmaktadır. Aktif olarak çalışan grafit madeni Kütahya-Oysu'da olmakla birlikte 7,2 milyon ton rezerv mevcuttur ve %20 grafitik karbon içeriğine sahiptir. Balıkesir-Susurluk, Kastamonu, Bingöl-Genç, Adıyaman-Sincik, Muğla-Milas, Kütahya-Oysu, Kahramanmaraş-Göksun, Konya, Yozgat-Akdağmadeni ve Kırklareli'nde bulunan rezervler tespit edilmiş olan rezervlerdir. Türkiye'de bulunan rezervler ve oluşumlar, Palezoik yüksek dereceli amfibolitik metamorfik kayalar içerisinde oluşmuştur ki bunlar Menderes Masifi, Istranca Masifi, Akdağmadeni Masifi, Sultandağ Masifi ve Doğu Bitlis Masifleri olmaktadır. Yeni grafit rezervlerinin bulunması sonucunda, rezervlerin bulunduğu kayaç tipi, ince taneli (kil, şist) ve karbonatlı kayaçlardır (Int. Kyn. 6).

3.2. Dünya'da Grafit Rezervleri

USGS (2022) raporuna göre, dünya grafit rezervi 320 milyon ton'dur. En büyük rezerve sahip olan ülkeler, Bolivya, Arjantin, Şili, Avustralya ve ABD'dir. Tablo 6'da, grafit üreticisi olan ülkelerin yıllar bazında üretim miktarları ve rezerv miktarları verilmektedir (USGS, 2017; USGS, 2018; USGS, 2020; USGS, 2021).



3.3. Türkiye ve Dünya’da Grafit Ticareti

Dünya grafit ticaretine bakıldığında, ön plana çıkan ürün doğal grafit olmaktadır. Doğal grafitin, 2020 yılındaki ihracat değerine 57 ülke bazında bakıldığında 463 milyon \$, 2019 yılına bakıldığında ise bu değer 60 ülke bazında 455 milyon \$ olduğu görülmektedir. LCE’nin ticareti, dünya ticaretinin %0,0032’sini temsil etmektedir. Grafit, PCI (Product Complexity Index)’ya göre 871.’dir. 2020 yılına göre doğal grafit ihracatını en çok yapan ülkeler, % payları ve ihracat değerleri Tablo 7’de verilmiştir (Int. Kyn. 7 ve 8).

Tablo 6. Başlıca grafit üreticisi olan ülkelerin yıllar bazında üretim miktarları ve rezerv miktarları (ton) (USGS, 2017; USGS, 2018; USGS, 2020; USGS, 2021).

Ülkeler	2017	2018	2019	2020	2021 ^t	Rezerv (10 ⁶ ton)
Almanya	-	800	800	300	300	-
Avusturya	-	1.000	1.000	500	500	-
Brezilya	90.000	95.000	96.000	63.000	68.000	70
Çin	625.000	693.000	700.000	762.000	820.000	73
Hindistan	35.000	35.000	35.000	6.000	6.500	8
Kanada	40.000	40.000	11.000	8.000	8.600	-
Kuzey Kore	5.500	6.000	6.000	8.100	8.700	2
Madagaskar	9.000	46.900	48.000	20.900	22.000	26
Meksika	9.000	9.000	9.000	3.300	3.500	3,1
Mozambik	300	104.000	107.000	28.000	30.000	25
Norveç	15.500	16.000	16.000	12.000	13.000	6
Rusya	17.000	25.200	25.100	25.000	27.000	-
Sri Lanka	3.500	4.000	4.000	4.000	4.300	1,5
Tanzanya	-	150	150	-	150	18
Türkiye	2.300	2.000	2.000	2.500	2.700	90
Ukrayna	5.000	20.000	20.000	16.000	17.000	-
Özbekistan	-	-	100	100	110	7,6
Vietnam	5.000	5.000	5.000	5.000	5.400	-
Toplam	897.000	1.120.000	1.100.000	966.000	1.000.000	320

t: tahmini, -: üretim verileri mevcut değildir.

Tablo 7. 2020 yılına göre doğal grafit ihracatını en çok yapan ülkeler, % payları ve ihracat değerleri (Int. Kyn. 7, Int. Kyn. 8).

Ülkeler	İhracat payı, (%)	İhracat değerleri, (milyon \$)
Çin	66,00	308
Almanya	5,45	25
Brezilya	5,33	24
ABD	4,29	19,9
Madagaskar	3,43	15,9

Doğal grafit ithalat değeri ise, 2020 yılında 108 ülke bazında \$431 milyon dolara ulaşmıştır, ancak bu değer 2019 yılında, 110 ülke bazında \$574 milyon dolar olmuştur. 2020 yılına göre doğal grafit ithalatını en çok yapan ülkeler, % payları ve ithalat değerleri Tablo 8’de verilmiştir (Int. Kyn. 7).

Tablo 8. 2020 yılına göre doğal grafit ithalatını en çok yapan ülkeler, % payları ve ithalat değerleri (Int. Kyn. 7).

Ülkeler	İthalat payı, (%)	İthalat değerleri, (milyon \$)
Güney Kore	23,0	102
Japonya	14,5	62
ABD	10,1	43
Almanya	8,8	37
Polonya	5,41	23
Hindistan	5,09	21

2020 yılında her alanda olduğu gibi grafit üretimi, ithalatı-ihracatı, tüketimi, talebi de COVID-19 Pandemi sebebiyle düşüşe uğramıştır. Doğal grafit talebinin ve bağlantılı olarak da üretiminin artmasının en büyük nedenlerinden bir tanesi, elektrikli araçlara duyulan taleptir. Çin önemli bir Li iyon pil üreticisi olması sebebiyle, Çin'deki grafit üretiminde büyük bir artış yaşanmaktadır (Int. Kyn. 9).

Li iyon pillerin 2021-2025 arasında %17,9'luk hacimsel artışı da grafitin kullanımının ve üretilmesinin artışı ile aynı trende sahiptir. Hibrit elektrikli araçlardaki (HEV) grafit kullanımı ortalama 10 kg ve elektrikli araçlarda (EV) ise 70 kg'dır. Genel olarak, elektrikli araçlardaki pillerde anot üretiminde sentetik grafitin kullanımı tercih edilmiş olsa da, son yıllarda doğal grafit kullanımı daha düşük maliyetli olması ve yüksek performans getirisine sahip olması sebebiyle ön plana çıkmaktadır (Int. Kyn.10).

Tablo 9'da doğal grafitin ve sentetik grafitin özelliklerine bağlı olarak Eylül-2022'deki güncel ortalama fiyatları verilmektedir (Int. Kyn.11).

Tablo 9. Doğal ve sentetik grafitin özelliklerine bağlı olarak satış fiyatları (Int. Kyn.11).

Ürün	Özellik	Fiyat, (\$ ton ⁻¹)
Doğal Grafit (Kısa ömürlü)	1.deşarj kapasitesi 350-355 mAh. g	4.186
Doğal Grafit (Orta ömürlü)	1.deşarj kapasitesi 355-360 mAh. g	6.006
Doğal Grafit (Uzun ömürlü)	1.deşarj kapasitesi >360 mAh. g	8.666
Yapay Grafit (Uzun ömürlü) (Dijital ürünlerde kullanım)	1.deşarj kapasitesi >355 mAh. g	10.640
Yapay Grafit (Orta ömürlü) (Elektrikli araçlarda, dijital ve enerji stoklanması)	1.deşarj kapasitesi 350-355 mAh. g	8.400
Yapay Grafit (Kısa ömürlü) (Elektrikli araçlarda, dijital ve enerji stoklanması)	1.deşarj kapasitesi 340-349 mAh. g	6.510
Sentetik grafit (Uzun ömürlü)	1.deşarj kapasitesi >355 mAh. g	11.550
Sentetik grafit (Orta ömürlü)	1.deşarj kapasitesi 345-355 mAh. g	9.345
Sentetik grafit (Kısa ömürlü)	1.deşarj kapasitesi 330-345 mAh. g	6.335

3.4. Grafit Kullanım Alanları

Grafit, genel bilgiler bölümünde de belirtildiği gibi çok geniş kullanım alanlarına sahip olmakla birlikte, yüksek saflıkta elde edilmiş grafit, pil üretiminde, kuru pillerde, çelik sanayinde, kurşun kalem üretiminde, nükleer reaktörlerde ve elektrometalurjide kullanılmaktadır. Daha düşük karbon içerikli olan grafit ise, refrakter kaplamalarda, demir-çelik dökümlerde, fırınlarda kullanılan refrakter macun yapımında, boya sanayinde ve gres yağlarında kullanılmaktadır.

Grafitin en önemli ve son zamanlarda en popüler kullanım alanlarından biri elektrik araçlarda kullanılan Li iyon pillerin anot hammaddesidir. Anot malzemesi olarak kullanılan grafitin minimum %99 C içermesi, yüzey alanının yaklaşık 10 m². g, termal geçirgenliğinin yaklaşık 3.000 W.m⁻².K ve tane boyutunun 300 µm boyutunun altında olması istenmektedir. Anot malzemesi olarak kullanılan grafit tane boyutunun küçük ve yüzeyinde porozite olması Li adsorpsiyon kapasitesinin arttırarak yüksek performansa ulaşılmasını sağlamaktadır (Zhang vd. 2021).

Grafitin bir başka önemli kullanım alanlarında biri de grafen üretimidir ve bu üretimde hammadde olarak yer alır. Grafen, yüksek elektronik yük taşıması (yaklaşık $200.000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V} \cdot \text{sn}^{-1}$) ve yüksek termal iletkenliği ($5.000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) sebebiyle enerji dönüşümü, depolama araçları, elastik elektronikler ve elektromanyetik koruma gibi geniş uygulama alanı potansiyeline sahip olmasına rağmen kitle üretimlerde maliyeti ve üretimde kullanım zorlukları nedeniyle çoğu zaman katkı malzemesi olarak tercih edilmektedir (Zhang vd. 2022).

3.5. Grafit Cevherlerinin Zenginleştirilmesi

Grafit, doğal hidrofobik bir malzeme oluşu sebebiyle genelde klasik flotasyon yöntemi ile zenginleştirilebilmektedir. Grafit konsantrasyonu elde etmek için kırma, öğütme, boyut kontrolü, sarsıntılı masa, flotasyon, manyetik ayırma, elektrostatik ayırma ve liç gibi prosesler kombinasyon halinde veya ayrı bir şekilde uygulanabilir.

Saf grafit, düşük yüzey enerjisine sahip olması sebebiyle, doğal hidrofobik bir malzemedir. Grafitin temas açısı pH'ya bağlı olarak değişmekte olup, pH 2-9 arasında, 77° ve 88° arasında değişkenlik göstermektedir. İzoelektrik noktası ise pH 2,2 ve 4,5 arasındadır. Grafit flotasyonunda, kerosen, fuel oil, parafin ve dizel yağlar gibi iyonik olmayan hidrokarbonlar kollektör olarak kullanılabilir. Kerosen bu anlamda birçok çalışmada, grafit flotasyonunda en etkili olan kollektörlerden biri olarak tanımlanmaktadır. Bastırıcı olarak kullanılabilen kimyasallara bakıldığında ise, sodyum silikat, kebraho, gelatin, tanik asit ve nişasta ön plana çıkmaktadır. Genel olarak grafit flotasyonu bir kaba flotasyon ve birkaç kademe temizleme flotasyonunun kombinasyonu ile gerçekleştirilmektedir (Chehreh Chelgani vd., 2016).

Dünyada, endüstriyel anlamda gravite farkına dayalı grafit zenginleştirilmesinde kullanılan cihaz ağır ortam ayırıcılarıdır. Ağır ortam ile ayırmada, ortamın hazırlanması için ZnCl_2 kullanılmaktadır. Beslenen cevher boyutu $-25+0,5 \text{ mm}$ olmakla birlikte flotasyon öncesinde uygulanarak genel kazanma veriminin de artmasını sağlamaktadır (Chehreh Chelgani vd., 2016).

Liç prosesi ile yapılan kimyasal saflaştırma genel olarak, flotasyon sonrasında yüksek saflıkta grafit eldesi için yapılan yaygın bir prosedir. Konsantrasyonundaki empüritelere bağlı olarak farklı asitlerin kullanımı ile asit liçi prosesi uygulanabilmektedir. Bu asitler, HCl, HF, H_2SO_4 , HNO_3 veya bu asitlerin karışımı da kullanılabilir. Kavurma prosesinin uygulanması ise, genelde silikatlı ve sülfürlü yapıların grafit konsantrasyonundan uzaklaştırılması için uygulanabilmektedir. Bu yöntem, kavurma, su ile yıkama ve asit liçi proseslerinin kombinasyonudur. Bu işlemler sonunda elde edilen grafit batarya kalitesinde olabilmektedir.

Kütahya-Oysu'da faaliyet gösteren Karabacak Madencilik San. ve Dış. Tic. A. Ş.'ye ait grafit tesisinde $150 \mu\text{m}$ boyuta indirilen grafit üzerinde flotasyon işlemi yapılmakta ve bunun neticesinde minimum %93 C içerikli grafit kazanılmaktadır. 2013 yılında flotasyon üniteleri yenilenmiş daha yüksek karbonlu ürün üretebilme amaçlı liç tankları kurulmuştur.

4. NİKEL

Nikel, Li iyon pillerde yer alan katot elektrotunda kullanılan katot aktif malzemenin bir bileşenidir. Genelde ticari olarak üretilen katot aktif malzemelerin sentezinde hidrometalurjik yöntemler kullanıldığı için (ör: birlikte çöktürme) bu proseslere girdi nikel sülfat veya asetat tuzlarıdır.

Nikel, atom numarası 28, atom ağırlığı $58,6934 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ olan bir elementtir. Nikelin sertliği mohs skalasına göre 4 ve yoğunluğu $8,9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 'tür. Yerkabuğunun % 0,008 kadarını oluşturan nikel en bol bulunan beşinci elementtir. Doğada saf olarak bulunmaz, çoğunlukla demir ve kobalt ile birlikte oksitler, sülfidler ve silikatlar şeklinde oluşur. En önemli nikel mineralleri; nikelin (NiAs), kloantit (NiAs_2), pentlandit [$(\text{FeNi})\text{S}$], millerit (NiS), anaberjit [$(\text{Ni})_3(\text{AsO}_4)28\text{H}_2\text{O}$] ve garniyerit [$(\text{NiMg})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$] dir (Eroğlu ve Akgök, 2018). Birçok nikel minerali olmakla beraber yaygın olarak bulunan ve günümüzde ekonomik olarak işletilen nikel mineralleri Tablo 10'da verilmektedir.

Nikel yataklarının büyük bir kısmı ikiye ayrılmaktadır. Bunlar limonit ve garniyeritin ana cevher olduğu lateritik yataklar ve ana cevherin pentlandit olduğu magmatik sülfür yataklarıdır. Nikel laterit yatakları magnezyumca zengin veya ultramafik kayaların lateritleşmesi sonucu oluşmaktadır ve %0,2-0,4 Ni içermektedir. Lateritleşme sonucu nikel ve kobalt konsantrasyonu ana kayanın 3-30 katına ulaşabilmektedir. Lateritleşme proses, iklim, tektonik, topoğrafya, birincil kaya türü ve yapısı gibi faktörlerin etkileşimi ile kontrol edilmektedir. Nikel lateritleri nikel endüstrisinde önemli bir yere sahiptir ve nikel üretiminin %40'ını oluşturmaktadır. Nikel kaynaklarının %70'i lateritik nikel yataklarıdır (Elias, 2002). Dünyadaki nikelin (Ni) yaklaşık %30'u magmatik yataklardan gelir ve magmatik nikel yatakları doğrudan ergimiş kayalardan oluşur. Magmatik yataklar ana element olarak nikel içermekle beraber (genellikle %0,5-3 Ni) önemli miktarda bakır (%0,2-2 Cu) ve az miktarda kobalt (<%0,1), altın ve platin grubu elementler de içermektedir (Burron, 2023).

**Tablo 10.** Yaygın olarak kullanılan nikel mineralleri ve yatakları (BGS, 2008)

İsim	Grup	Formül	Örnek yataklar
Pentlandit	Sülfür	(Fe,Ni) ₉ S ₈	- Noril'sk, Rusya - Bushveld, Güney Afrika - Voisey's Bay, Kanada - Kambalda, Batı Avustralya
Pirotitte Ni değişim	Sülfür	Fe _{1-x} S _x	- Noril'sk, Rusya - Bushveld, Güney Afrika - Voisey's Bay, Kanada - Kambalda, Batı Avustralya
Garniyerit	Sulu nikel silikat (serpantin)	(NiMg) ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	- Yeni Kaledonya - Sulawesi, Endonezya - Cerro Matoso, Kolombiya
Nikelli limonit	Hidroksit	(Fe,Ni)O(OH)	- Yeni Kaledonya - Sulawesi, Endonezya - Euboea, Yunanistan
Millerit	Sülfür	NiS	- Silver Swan, Batı Avustralya - Sudbury, Kanada
Nikolit	Nikel arsenit	NiAs	- Cobalt, Ontario - Widgiemooltha Dome ve Kambalda, Batı Avustralya
Nikel içeren götit	Hidratlı oksit	(Fe,Ni)O(OH)	- Koniambo Massif, Yeni Kaledonya
Siejenit	Sülfür	(Ni,Co) ₃ S ₄	- Siegen, Almanya - Jachymov, Çek Cumhuriyeti

4.1. Türkiye'de Nikel Madenleri

MTA tarafından gerçekleştirilen çalışmalarla, Anadolu'nun farklı noktalarında hem lateritik hem de sülfütlü tip nikel cevherleşmelerinin varlığı saptanmıştır. Bulunan rezervlerinin önemlisi ise, 1940'lardan itibaren bir demir yatağı olarak bilinen, ama 1977'de nikel için prospeksiyon çalışmalarına geçilen Manisa-Turgutlu-Çaldağ'da yer almaktadır. Çaldağ dışındaki lateritik yataklar; Manisa-Gördes, Uşak-Banaz, Bolu-Mudurnu-Akçaalan, Eskişehir-Mihalıççık-Yunus Emre'de ve Uşak-Banaz-Murat Dağı'nda bulunmaktadır. Bitlis-Pancarlı, Bursa-Orhaneli-Yapköy, Sivas-Divriği-Güneş ve Hatay-Payas-Dörtöl ise sülfütlü yataklardır. MTA kaynaklarına göre Türkiye toplam nikel rezervi 40 milyon ton'dur ve 33 milyonu Manisa Çaldağ'da bulunmaktadır. Toplam nikel metali ise 400 bin ton kadardır ve Dünya nikel rezervlerinin binde 6'sına denk gelmektedir (DPT, 2018). Karmaşık ve zonlu bir yapıya sahip olan Çaldağ bölgesindeki lateritik nikel-kobalt yatağı başlıca serpantinleşmiş ultrabazikler (%0,2-1,2 Ni), demirli ve kilce zengin (%0,02-5,6 Ni), karbonatlı-jipsli (%0,2-1,2 Ni) ve silisli laterit (%0,2-1,2 Ni) olmak üzere farklı zonlardan oluşmaktadır (Helvacı vd., 2013).

Tablo 11. Türkiye'deki nikel içeren bazı yataklar ve metal tenörleri (ton) (JMO, n.d.)

Konum	Tipi	Tenör	Toplam rezerv*
Manisa (Çaldağ)	Lateritik	%0,93-1,95 Ni; %0,042-0,06 Co	39,5 milyon (Gör+Muh)
Bursa (Yapköy)	Sülfit	1-4 Ni	163 bin (Muh+Müm)
Bitlis (Pancarlı)	Sülfit	1,4 Ni	15,5 bin (Müm)

Müm: Mümkün Rezerv, Muh: Muhtemel Rezerv

Türkiye'nin en büyük nikel rezervine sahip olan Çaldağ yöresinde 29,7 milyon ton ham cevher mevcuttur. Çaldağ Nikel A.Ş. tarafından açık ocak işletmesi uygulanan bu sahada; ortalama % 1,16 tenörlü nikel, %0,07 tenörlü kobalt ve %21,66 tenörlü demir rezervi bulunmakta olup sahanın metal nikel rezervi yaklaşık 400 bin tondur. Gördes yöresindeki lateritik tip, ortalama %1 tenörlü sahada ise yaklaşık 300 bin ton metal nikel rezervi mevcuttur. Meta Nikel Kobalt A.Ş. tarafından işletilen bu sahada kurulan zenginleştirme tesislerinde (yüksek basınç liç tesisi), hidrometalurjik yöntemler kullanılarak metal nikel üretimine başlanmıştır, 2016 yılından beri ticari üretime geçilerek ihracat gerçekleştirilmiştir. Aynı şirketin, Eskişehir ve Uşak'ta nikel-kobalt yatırım projelerinin yanı sıra farklı bölgelerde de arama ve rezerv geliştirme ön çalışmaları devam etmektedir (Eroğlu vd., 2018). Türkiye tüvenan nikel üretim değerleri yıllara göre Tablo 12'de verilmektedir.

Tablo 12. 2018-2022 Türkiye nikel üretim değerleri (Mapeg, 2023)

Yıllar	2018	2019	2020	2021	2022
Nikel üretimi (x1000 ton)	1.199,9	419,7	1.787,7	1.030,7	1.286,3

Meta Nikel Kobalt A.Ş.'ye ait Gördes işletmesinde tesis beslemesinde kullanılan tüvenan cevherin ortalama nikel tenörü %1,0-1,1, kobalt tenörü %0,04-0,045 ve kalsiyum tenörü ise %5,5-6,0 aralıklarında değişmektedir. Proses sonucunda elde edilen ürün "MHP" olarak (Mixed Hydroxide Precipitate) tanımlanmaktadır. MHP ürünündeki nikel ve kobalt hidroksit ($Ni(OH)_2$ ve $Co(OH)_2$) formundadır. Proses sonucunda elde edilen ürünün içeriğinde ortalama %36-37 nikel, %1,5-1,75 kobalt bulunmaktadır. Belirli değer aralığında magnezyum ve mangan içeriği de oluşmaktadır. MHP ürünün satılabilir olabilmesi için nikel içeriğinin %35-36 ve kobalt içeriğinin %1,5 olması veya fazlası olması istenir. Bunun yanı sıra içerisinde bulunan demirin %1-2'den, magnezyumun %4'ten, alüminyumun %2'den ve manganın %7'den az olması istenir. MHP ürünün kabul edilir nem oranı ise %48-52'dir.

4.2. Dünya'da Nikel Maden Rezervleri

2021 yılında küresel nikel kaynaklarının %60'ı laterit yataklarında ve %40'ı magmatik sülfür yataklarında olmak üzere 300 milyon tonun üzerinde olduğu tahmin ediliyor. Nikel ayrıca deniz tabanı kabuklarında ve nodüllerinde de bulunmuştur (Government of Canada, 2023).

Tablo 13. Dünya'daki nikel rezervleri ve üretimleri (USGS, 2021-2022)

Ülkeler	Üretim (ton)				Rezerv (ton)
	2019	2020	2021	2022 ^t	
Avustralya	159.000	169.000	151.000	160.000	21.000.000
Endonezya	853.000	771.000	1.040.00	1.600.000	21.000.000
Brezilya	60.600	77.100	76.000	83.000	16.000.000
Rusya	279.000	283.000	205.000	220.000	7.500.000
Yeni Kaledonya	208.000	200.000	186.00	190.000	7.100.000
Filipinler	323.000	334.000	387.000	330.000	4.800.000
Kanada	181.000	167.000	134.000	130.000	2.200.000
Çin	120.000	120.000	109.000	110.000	2.100.000
ABD	13.500	16.700	18.400	18.000	370.000
Diğer ülkeler	310.000	373.000	429.000	440.000	20.000.000

t: tahmini

2021 yılında küresel nikel talebi yaklaşık 2,86 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Nikel talebinin dünya çapında 2023 yılında 3,61 milyon ton olabileceği tahmin ediliyor; bu da 2022'deki tahmini talebe göre %14'lük bir artışı temsil etmektedir (Garside, 2023).

4.3. Türkiye'de ve Dünya'da Nikel Ticareti

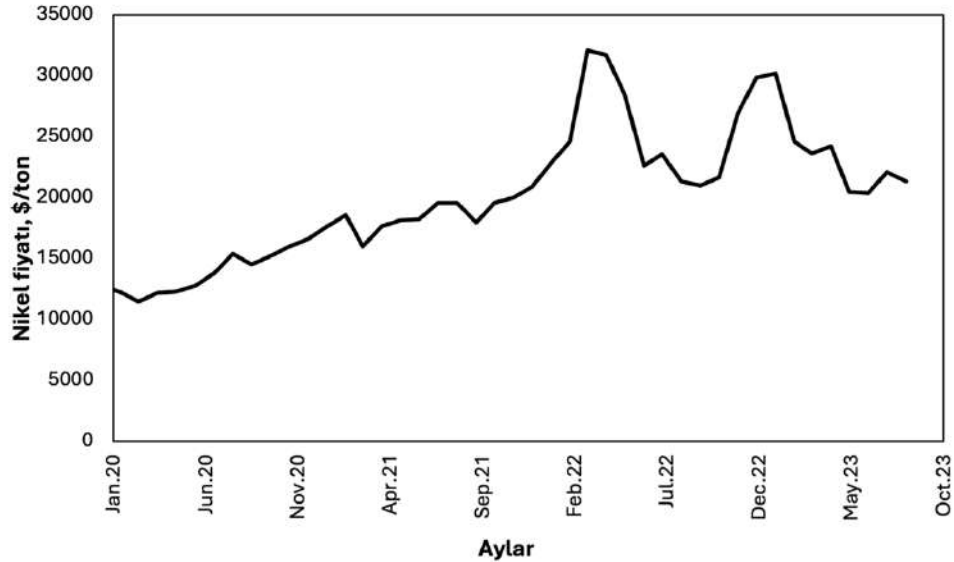
2021'de dünyada nikel ihracatının başında Filipinler (1,5 milyar \$), Yeni Kaledon (734 milyon \$), Rusya (314 milyon \$), Finlandiya (277 milyon \$) ve ABD (243 milyon \$) gelirken nikel ithalatında önde gelen ülkeler Çin (2,36 milyar \$), Kanada (403 milyon \$), İsviçre (389 milyon \$), Güney Kore (314 milyon \$) ve Japonya (257 milyon \$)'dır (Int.Kyn.12). Temmuz 2023 tarihine kadar Türkiye için ürün bazında ithalat ihracat verileri Tablo 14'te ve 2020-2023 yılları arasında kobalt fiyatının değişimi Şekil 2'de verilmektedir. Türkiye'de nikel ihracatı için ana destinasyon İran (20,6 milyon\$), Özbekistan (889 bin \$), Birleşik Arap Emirlikleri (833 bin \$), Kazakistan (651 bin \$) ve Mısır (646 bin \$) iken Japonya (37,7 milyon \$), Rusya (24,3 milyon \$), Norveç (11,9 milyon \$), İngiltere (6,9 milyon \$) ve İtalya (4,26 milyon \$)'dan nikel ithal etmektedir (Int. Kyn.13).

**Tablo 14.** Ürün bazında Türkiye nikel ithalat ve ihracat değerleri (TÜİK, 2023)

GTİP No	Ürün	İthalat		İhracat	
		Miktar (kg)	Değer (₺)	Miktar (kg)	Değer (₺)
26.04.00.00	Nikel cevherleri ve zenginleştirilmiş nikel cevherleri	128.520	1.976.144	158.580	3.170.426
28.25.40.00	Nikel oksitleri ve hidroksitleri	21.540	7.383.885	25	119.654
28.33.24.00	Nikel sülfatlar	709.733	98.979.022	182.684	26.054.846

Zaman içinde iniş ve çıkışlar yaşayan nikel fiyatı Mart 2022 tarihinde en yüksek değere ulaşmaktadır. Nikel metalinin Ağustos 2023 tarihinde ise 21.339 \$·ton⁻¹ değerine ulaştığı görülmektedir (Trading Economics, 2023). Türkiye’de ise nikel fiyatları aşağıda verilmektedir (Mapeg, 2023).

- LMB 30.400 \$
- Nikel cevheri %1,8 Ni, (CIF, Çin) %15-20 Fe, Si:Mg oranı < 2 103-105 \$
- Laterite %1,5 Ni, (CIF, Çin) 70-73 \$
- Nikel sülfat, batarya kalitesi 5.369-5.456 \$

**Şekil 2.** 2020-2023 yılları arasında nikel fiyatı değişimi (Trading Economics, 2023)

Dünya’da nikel üretimi yapan birçok ülke bulunmaktadır. Tablo 15’de nikel ve nikel bileşiklerinin üretimini yapan birkaç şirket verilmektedir.

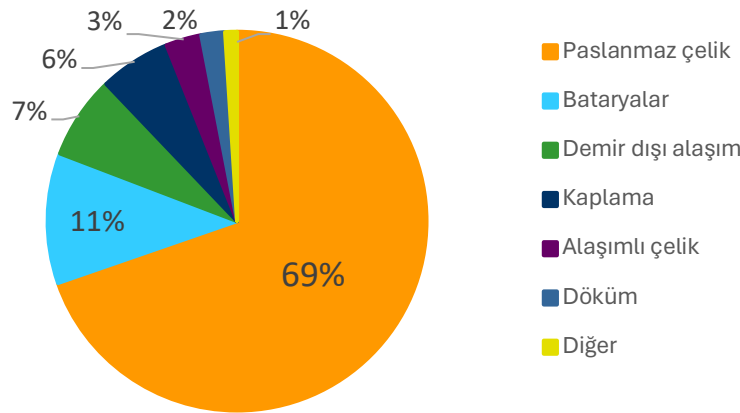
Tablo 15. Nikel ve nikel bileşiklerinin üretimini yapan bazı şirketler

Şirket	Ülke	Şirket	Ülke
Vale	Brezilya	South32 Limited	Avustralya
Nornickel	Rusya	IGO Limited	Avustralya
Jinchuan Group	Çin	Terrafame	Finlandiya
Glencore	İsviçre	Metallurgical Corporation of China Ltd	Çin
BHP Group	Avustralya	Meta Nikel Kobalt A.Ş.	Türkiye
Eramet S.A.	Fransa		

4.4. Nikel Kullanım Alanları

Nikel taşıdığı kimyasal ve fiziksel özellikleri nedeniyle kullanım alanı oldukça geniş ve giderek artmaya devam etmektedir. Dünyada üretilen metalik nikelin %70'i paslanmaz çelik üretiminde kullanılmaktadır. Nikel, bir alaşım metalidir ve korozyona dirençli alaşımların yapımında kullanılmaktadır. Bakır, krom, alüminyum, kurşun, kobalt, gümüş ve altın ile alaşımları mevcuttur. Nikel, çok yüksek ve çok düşük ısılarda gösterdiği dayanıklılık nedeniyle, motor parçalarının (gaz türbinleri, jet motorları vb.) yapımında kullanılır. Günümüzde nikel; ulaştırma, havacılık, denizcilik ve inşaat sektörlerinde, mimari uygulamalar, tıbbi cihazlar ve madeni para yapımı gibi yaklaşık 300 bin çeşit üründe kullanılmaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023).

Nikel yaygın olarak bataryalarda özellikle tekrar şarj edilebilen nikel kadmiyum (NiCd) ve uzun ömürlü nikel metal hidrit (NiMH) bataryalarında kullanılmaktadır. Nikelin pillerde kullanılmasının en büyük avantajı daha düşük maliyet ile daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha fazla depolama kapasitesi sağlamasıdır. Gelişen teknoloji ile nikelin kullanım alanları da genişlemektedir. Nikel içeren Li iyon bataryaları üstün güç yoğunlukları sayesinde uzun mesafelere gitmeye ihtiyacı olan elektrikli araba bataryalarında da tercih edilmektedir. Nikel Kobalt Alüminyum (NCA) ve Nikel Manganez Kobalt (NMC) bataryaları %33 nikel kullanmaktadır. Unutulmaması gerekli noktalardan biri bataryalarda kullanılan nikel, katot aktif malzeme üretimine nikel tuzları olarak girmekte ve hidroksit formda üretildikten sonra Li_2CO_3 veya LiOH ile kalsinasyona tabi tutularak lityum, nikel, mangan, kobalt oksit (NMC) katot aktif malzemesinin oluşturulduğudur (NI, 2023).



Şekil 3. Nikelin kullanım alanlarına göre oranları (NI, 2023)

4.5. Nikel Cevherlerinin Zenginleştirme

Sülfürlü nikel yataklarında mineralizasyon ağırlıklı olarak pirotit, pentlandit, kalkopirit ve pirit içermektedir. Lateritik nikel yataklarında iki tür oluşum bulunmaktadır: limonit tipi ve silikat tipi. Limonit tipi lateritler (veya oksit tipi), magnezyum ve silikanın çok kuvvetli liçinden dolayı demir açısından oldukça zengindir. Büyük ölçüde götitten oluşurlar ve götitin içinde %1-2 Ni içerirler. Silikat tipi (veya saprolit tipi) nikel cevheri limonit zonu altında oluşmuştur. Genellikle %1,5-2,5 Ni içerir ve büyük ölçüde nikelin dahil olduğu serpantinden oluşur (Kawatra vd., 2019). Nikel laterit yatakları, genellikle tropik ve subtropikal iklimlerde, Ni silikat içeren ultramafik kayaların uzun süreli ve yaygın ayrışmasıyla oluşur. Nikel cevheri açık madencilik yöntemi ile çıkartılmaktadır. Madenden çıkarılan cevher hidrometalurjik proses (basınçlı asit liçi veya Caron prosesi) ile nikel ve kobalt oksit üretiminde ya da pazar için karışık Ni-Co sülfürleri üretiminde ya da pirometalurjik yöntemler ile ferronikel granülleri veya nikel matı üretiminde kullanılabilir (Gleeson vd., 2003).

Metalurjik yöntemler öncesinde nikel cevherinin konsantre haline getirilmesi için çalışmalar yapılmıştır (Tablo 16). Çalışmaların çoğunda kullanılan flotasyon yöntemi birçok açıdan soruna yol açmaktadır. Lateritik cevherler içerisinde bulunan nikel mineralleri düşük içerikte ve oldukça küçük tane boyutlarındadır. Serbestleşme boyutu çok ince boyutlarda olduğunda flotasyon ekonomik ve verimli bir yöntem olmaktan çıkmaktadır. Zenginleşme çok ince boyutlarda olduğundan geleneksel flotasyon yöntemi yerine ince boyutlarda flotasyon işlemini gerçekleştirilecek yeni nesil flotasyon cihazları kullanılabilir. Bir diğer çözüm ise ince boyutlu nikel tanelerinin seçimli olarak floküle edilmesi ve ardından flotasyon işlemi ile konsantre haline getirilmesidir (Farrokhpay ve Filippov, 2016).

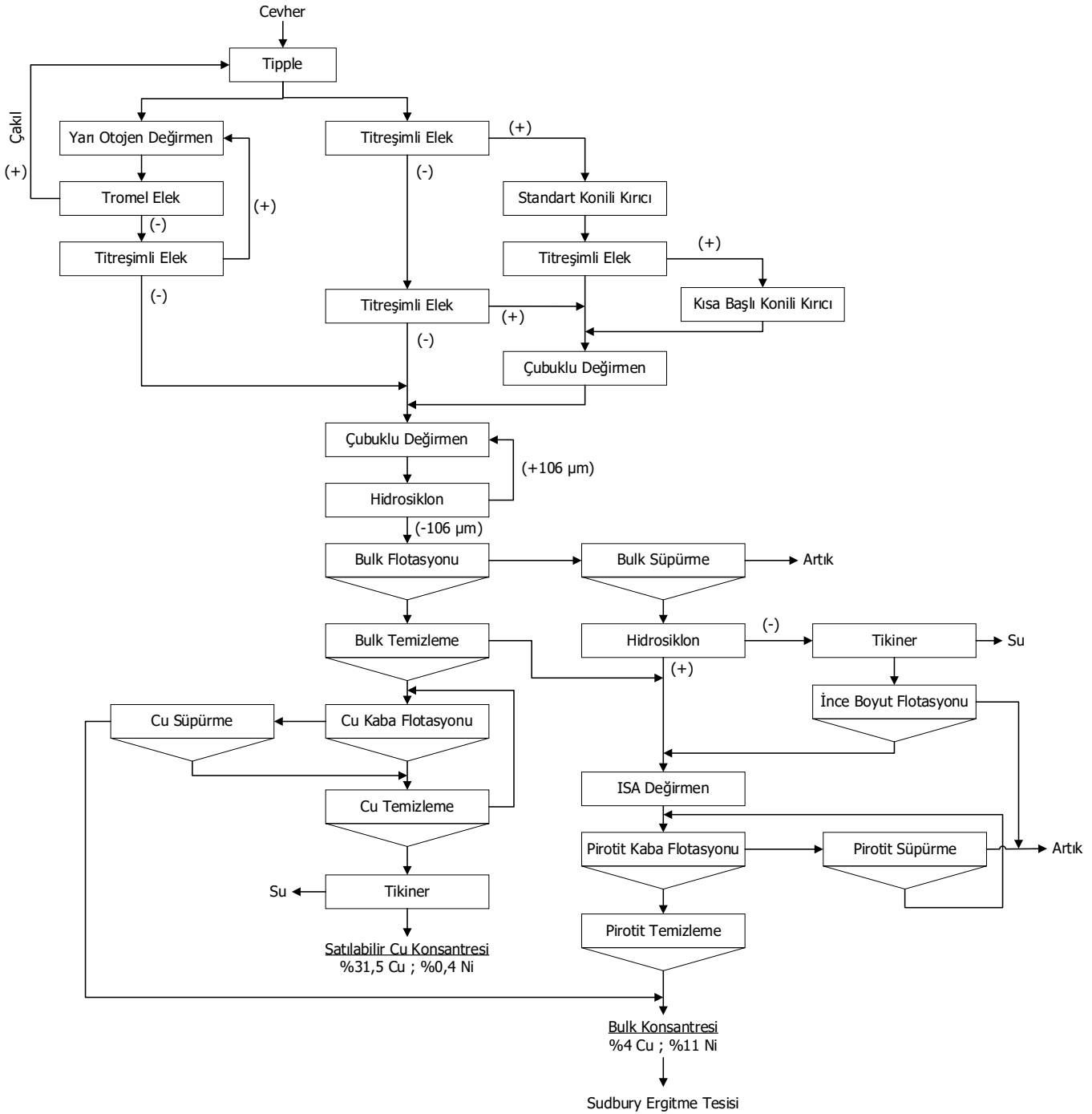
**Tablo 16.** Lateritik cevherlerde nikelin flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesi ile ilgili bazı çalışmalar (Farrokhpay ve Filippov, 2016).

Cevher kaynağı	Koşullar	Tuvenan içeriği	Ni içeriği ve Verim	Kaynakça
Brezilya	Toplayıcı olarak sentezlenmiş 2,3 oktanedion dioksim	%1,2 Ni	%1,4 Ni ve %63	Teoh vd., 1982
Hindistan	Anyonik kollektörler ve sodyum silikat	%0,6 Ni	%1,6 Ni ve %60	Rao ve Charan, 1989
Hindistan	20 mikron boyutunda siklon üst akımından Ni kazanımı Katyonik kollektör ve nişasta	%0,8 Ni	%1,3 Ni ve %86	Rao ve Charan, 1990
Hindistan	Sodyum lauril metilamino asetik asit ve modifiye edilmiş karboksilik asidin sodyum tuzu	%0,5 Ni	%1 Ni ve %70-80	Rao ve Sastri, 1996
Hindistan	Hidroksi kinolin, dimetil glioksim, nitrozo pirazolon, 2,2 bipiridal, trietonolamin ve sodyum oleat	%0,5 Ni	İçerikte çok az artış ve %40-60	Mohanty vd., 2000
Fildişi Sahili	Dispersan olarak sodyum silikat kullanılarak nikel laterit cevherlerinin ayrıştırılması ve ardından yüzdürülmesi	%1,2 Ni	%6-8 Ni ve %35-45	Harris vd., 2013
Avustralya	Flotasyon öncesi bir takım numune hazırlama teknikleri	%1 Ni	%1,4 Ni ve %43	Quast vd., 2105

Karmaşık yapısı nedeniyle cevher hazırlama yöntemleri kullanılarak nikelin zenginleştirilmesi oldukça güçtür. Yapılan çalışmaların çoğu ise umut vadeden sonuçlar vermemektedir. İri boyutlarda içerik arttırma amacıyla tesislerde flotasyon yöntemi kullanılabilir. En büyük nikel yataklarından biri olan Sudbury madeni (Ontario, Kanada) kimyasal işlemler öncesinde flotasyon yöntemi kullanan tesislerden biridir (Bknz. Şekil 4).

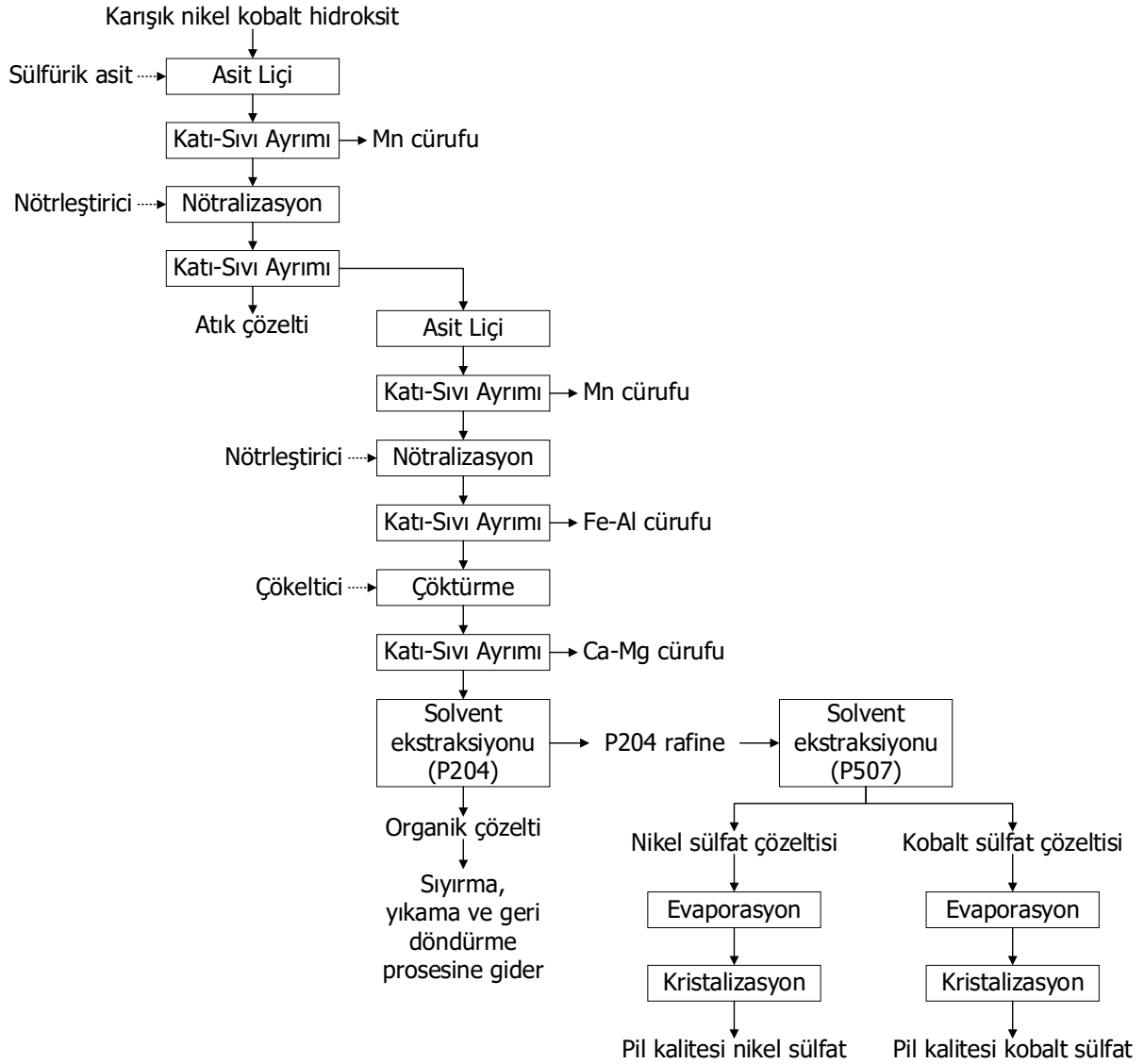
Sülfürlü nikel yataklarından elde edilen nikel sülfür konsantrelerinin %90'ından fazlası nikel içeren matlar (sıvı sülfürler) oluşturmak için pirometalurjik işlemlerden geçirilmektedir. Nikel konsantrelerinin pirometalurjik olarak işlenmesi üç tür birim işlemi içerir: kavurma (roasting), eritme (smelting) ve dönüştürme (converting). Elde edilen matlar çeşitli hidrometalurjik yöntem ile zenginleştirilebilmektedir. Tipik bir hidrometalurjik işlemde, konsantr veya mat ilk olarak nikel, kobalt ve bakırın bir kısmını çözmek için bir sülfat veya klorür çözeltisinde liç edilirken, sülfid çözünmeyen elementel sülfüre veya çözünür sülfata oksitlenir. Sıklıkla, liç işlemi iki aşamalı ters akımlı bir sistemde gerçekleştirilir, böylece mat çözeltiyi kısmen saflaştırmak için kullanılabilir. Genel olarak nikel, yalnızca sonraki işlemler veya rafine metal ürünün özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilecek safsızlıkların kabul edilebilir bir seviyeye indirilmesi için rafine edilir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından nikel çok benzeyen kobaltın tamamen giderilmesi zordur ve nikel için çoğu uygulamada genellikle ciddi bir kirlenici değildir (Kawatra vd., 2019).

Lateritik yataklarda bulunan nikel pirometalurjik yöntemler kullanılarak saprolitik yataklardan veya hidrometalurjik yöntemler ve çeşitli yöntemler ile limonitik yataklardan üretilmektedir. Pirometalurjik süreçler ağırlıklı olarak ferronikel veya mat ürün üreten döner fırın-elektrik fırını (RKEF) süreçleridir, ancak bu akış şemasının çeşitli varyasyonları mevcuttur. Caron prosesi, laterit cevherinin yüksek sıcaklıkta kalsinasyonu ve ardından nikel ve kobaltın geri kazanılması için kalsine edilmiş ürünün amonyak liçi ile hibrit bir rotayı temsil eder. Hidrometalurjik prosesler arasında yüksek basınçlı asit liçi (HPAL) ve yığın liçi yer alır ve her ikisini de genellikle nikel ve kobaltın geri kazanımı için solvent ekstraksiyonu ve elektroliz (SX-EW) takip eder (Kawatra vd., 2019).



Şekil 4. Sudbury madeni akış şeması (Hodder ve diğerleri, 2022)

Nikel ve kobalt üretimi yapan tesislerde nihai ürün karışık nikel kobalt hidroksit formunda üretilmektedir. Bataryalarda kullanılmak üzere yüksek içerikli nikel ve kobalt eldesi için bulunan CN111455174A numaralı patente ait akış şeması Şekil 5'de verilmektedir.



Şekil 5. CN111455174A numaralı patente ait akış şeması.

5. KOBALT

Kobalt, Li iyon bataryaların katot aktif malzemesinde kullanılan bir malzemedir ve genellikle katot aktif malzeme üretimi için sülfat ve asetat tuzları kullanılır. Elementel kobaltın, atom numarası 27, atom ağırlığı 58,93 g·mol⁻¹ olan bir elementtir. Genellikle kübik, masif, kompakt ve hegzagonal kristal yapıya sahip olan kobaltın sertliği Mohs skalasına göre 5-5,5 ve yoğunluğu 8,9 g·cm⁻³tür. En iyi bilinen mineralleri Skutterudit ve Kobaltit'tir. Diğer elementlerden ayrılması zor olduğundan, saf kobalt elde etmek için çok fazla işlem gerektirir. Yer kabuğunda %0,001 oranında yer alan kobalt; demir, nikel, bakır, çinko ve mangan gibi cevherlerden bir yan ürün olarak sağlanır (Int. Kyn. 14). Kobalt doğada saf halde bulunmaz ancak Uluslararası Mineraloji Derneği'nin veri tabanına göre kobalt 66 mineralde temel bileşen olarak bulunmaktadır. Bunun yanı sıra nikel, demir ve manganez içeren minerallerde düşük veya eser miktarda bulunmaktadır. Kobalt mineralizasyonu tipik olarak Cu-Co sülfür veya oksit cevherlerinde, Ni-Cu magmatik sülfür cevherlerinde veya Ni-Co lateritlerde bulunur (Dehaine vd., 2021). Tablo 17'de yaygın olarak kullanılan kobalt mineralleri ve kobalt içeren diğer mineraller içerikleri ile beraber verilmektedir.

Kobaltın çoğunlukla bulunduğu yatak tiplerinin başında sedimanter yataklar, magmatik sülfür yatakları, hidrotermal ve volkanojenik yataklar, lateritik yataklar ve manganez nodülleri gelmektedir. Öncelikli olarak bakır ve kobaltın işlendiği sedimanter tip yataklar dünya kobalt üretiminin %50'sinden fazlasını oluşturmaktadır. Magmatik sülfür tipi yataklar ise kobaltın yanı sıra nikel ve platin grubu elementleri içerebilmektedir. Lateritik tip yatakları ise tropikal ve subtropikal

iklimlerde, ultramarfik kayaların yoğun ayrışması ile kobalt ve nikel zenginleşmelerine neden olabilir. Bu tip yataklarda esas olarak nikel üretimi yapılmakla beraber kobalt yan ürün olarak üretilmektedir (CI, 2023).

Tablo 17. Yaygın olarak kullanılan kobalt mineralleri ve içerikleri (Yaylalı vd., 2020)

Mineraller	Formül	Co İçeriği (%)
Ana mineraller		
Linneit	Co ₃ S ₄	58,0 (Teorik)
Siejenit	(Co, Ni) ₃ S ₄	20,4-26,0
Karolit	(Co ₂ , Cu) S ₄	35,2-36,0
Kobaltit	(Co, Fe) As S	26,0-32,4
Saflorit	(Co, Fe) As ₂	13,0-18,6
Glokodot	(Co, Fe) As S	12,0-31,6
Skutterudit	(Co, Fe) As ₃	10,9-20,9
Heterojenit	CoO (OH)	64,1 (Teorik)
Diğer kobalt taşıyıcı mineraller		
Asbolit	(Manganez oksitler + Co)	0,5-5,0
Eritrit	(Co, Ni) ₃ (AsO ₄) ₂ .8H ₂ O	18,7-26,3
Gersdorfit	(Ni, Co) AsS	(Düşük)
Pentlandit	(Fe, Ni, Co) ₉ S ₈	1,50 (Maksimum)
Pirit	(Fe, Ni, Co) S ₂	13,0 (Maksimum)
Sfalerit	Zn (Co)S	0,30 (Maksimum)
Arsenopirit	Fe (Co)AsS	0,38 (Maksimum)
Mangan Oksit Mineralleri		0,10-1,00 (veya daha fazla)

5.1. Türkiye’de Kobalt Madenleri

Ülkemizde 2017’ye kadar yapılagelmiş araştırmalar sonucunda tespit edilmiş bir kobalt yatağı bulunmamaktadır. Ancak bazı bakır ve nikel yataklarında kobalt, yan ürün olarak üretilebilecek miktarlarda bulunmaktadır. Türkiye’deki kobalt içeren Ni/Co yataklarının genel olarak lateritik olduğu görülmektedir. Karmaşık ve zonlu bir yapıya sahip olan Çaldağ bölgesindeki lateritik nikel-kobalt yatağı başlıca serpantinleşmiş ultrabazikler (%0,2-1,2 Ni; %0,04-0,11 Co) demirli ve kilce zengin (%0,02-5,6 Ni; %0,02-5,2 Co), karbonatlı-jipsli (%0,2-1,2 Ni; %0,04-0,11 Co) ve silisli laterit (%0,2-1,2 Ni; %0,04-0,11 Co) olmak üzere farklı zonlardan oluşmaktadır (Helvacı vd., 2013). Tablo 18’de belirtilen yatakların dışında Bursa-Meryemsirtı’nda bulunan kobaltın %0,01-%0,02 değerleri arasında olduğu MTA Genel Müdürlüğü tarafından yapılan çalışma ile belirlenmiştir.

Tablo 18. Türkiye’deki kobalt içeren nikel-kobalt cevherleri ve metal tenörleri (Arıkan, 2022)

Konum	Tipi	%Co	%Ni	Toplam rezerv* (ton)
Manisa (Çaldağ)	Lateritik	0,06	1,2	37,9 milyon
Manisa (Gördes)	Lateritik	0,08	1,1	68,5 milyon
Kastamonu (Küre)	Lateritik	0,3	0,0023	13,2 milyon
Eskişehir (Mihalıççık-Yunusemre)	Lateritik	0,2-0,3	1-4	-

*Görünür + Muhtemel + Mümkün Rezerv

META Nikel Kobalt A.Ş. Manisa/Gördes, Uşak ve Eskişehir/Yunusemre’de bulunan nikel lateritlerden kobaltı yan ürün olarak kazanmak için üç ayrı proje başlatmıştır. Manisa/Gördes’te 2014 yılının son çeyreğinde deneme üretimine başlanmış ve 2016 yılında ticari üretime geçilerek ilk ihracat gerçekleştirilmiştir.

Sivas/Kangal'da özel sektöre ait bir demir-nikel-kobalt üretim projesi kapsamında Ar-Ge çalışmalarının sürdüğü ve Co:Ni oranının 1:30 olması durumunda aynı yataktan kobalt üretiminin de gerçekleştirilmesinin planlandığı bildirilmiştir.

Cevherden kobalt kazanımı dışında flotasyon atıklarının da değerlendirilmesi amacıyla 2018 yılında Eti Bakır A.Ş. Mazıdağı Metal Geri Kazanım ve Entegre Gübre tesisi kurulmuştur. Bu tesiste, Kastamonu/Küre flotasyon tesisinde üretilen pirit konsantresinden kobalt kazanımı ve gübre üretimi gerçekleştirilmektedir (Yaylalı vd., 2020).

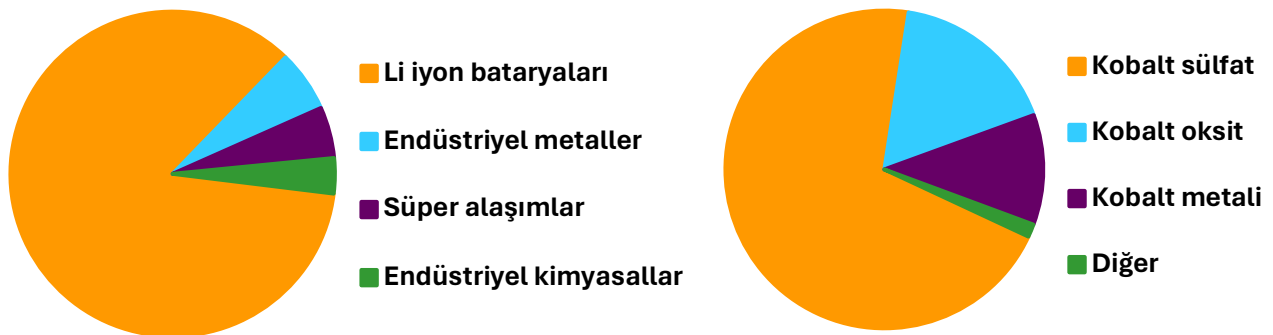
5.2. Dünya'da Kobalt Madenlerinin Durumu

Dünyadaki kobalt yataklarının %58'ini tabakalı tortu veya şeyl barındıran Cu-Co yatakları, %29'unu lateritik Ni-Co yatakları ve %9'unu magmatik Ni-Cu-PGE-Co yatakları oluşturmaktadır (Dehaine vd., 2021). Darton Commodities Ltd.'e göre, 2018 yılında kobalt üretiminin %67'si bakır madenlerinden, %32'si nikel madenlerinden yan ürün olarak, geriye kalan %1'i ise kobalt madenlerinden elde edilmiştir (Arıkan, 2022). Dünya kobalt rezervi ve yıllara üretim miktarları Tablo 19'da verilmektedir. Kobaltın dünyada kullanım alanına ve kobalt ürününe göre talep oranları ise Şekil 6'da verilmektedir.

Tablo 19. Dünya'daki kobalt rezervleri ve üretimleri (USGS, 2021-2022)

Ülkeler	Üretim (ton)				Rezerv (ton)
	2019	2020	2021	2022 ^t	
Kongo	100.000	98.000	119.000	130.000	4.000.000
Avustralya	5.740	5.630	5.295	5.900	1.500.000
Endonezya	-	1.100	2.700	10.000	600.000
Küba	3.800	3.800	4.000	3.800	500.000
Filipinler	5.100	4.500	3.600	3.800	260.000
Rusya	6.300	9.000	8.000	8.900	250.000
Kanada	3.340	3.690	4.361	3.900	220.000
Çin	2.500	2.200	2.200	2.200	140.000
Madagaskar	3.400	850	2.800	3.000	100.000
Amerika	500	600	650	800	69.000
Yeni Gine	2.910	2.940	2.953	3.000	47.000
Güney Afrika	2.100	-	-	-	40.000
Türkiye	-	-	2.400	2.700	36.000
Fas	2.300	2.300	2.300	2.300	13.000
Diğer ülkeler	6.320	-	4.567	5.200	610.000

t: tahmini, -: üretim verileri mevcut değildir.



Şekil 6. Kullanım alanına ve kobalt ürününe göre dünya kobalt talebi (CI, 2021)

5.3. Türkiye ve Dünya’da Kobalt Ticareti

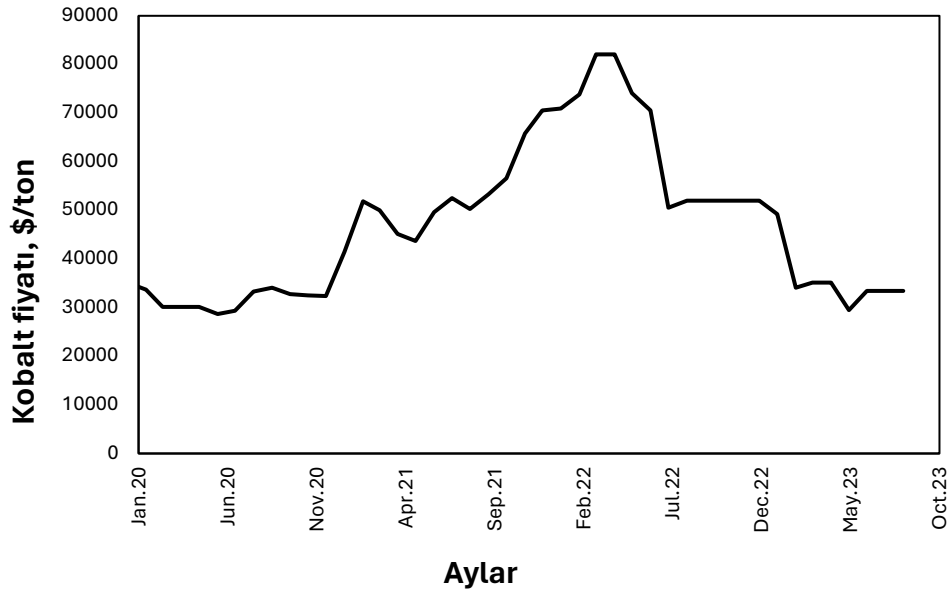
2021’de dünyada kobalt ihracatının başında Demokratik Kongo Cumhuriyeti (4,44 milyar \$), Kanada (460 milyon \$), ABD (335 milyon \$), Finlandiya (289 milyon \$) ve Norveç (241 milyon \$) gelirken kobalt ithalatında önde gelen ülkeler Çin (4,82 milyar \$), Japonya (481 milyon \$), ABD (389 milyon \$), Hollanda (295 milyon \$) ve Belçika (189 milyon \$)’dır (Int. Kyn. 15). Temmuz 2023 tarihine kadar Türkiye için ürün bazında ithalat ihracat verileri Tablo 20’de ve 2020-2023 yılları arasında kobalt fiyatının değişimi Şekil 7’de verilmektedir. Türkiye’de kobalt ihracatı için ana destinasyon Almanya iken Rusya, Belçika, Finlandiya, Kanada ve İngiltere’den kobalt ithal etmektedir (Int. Kyn. 16).

Tablo 20. Ürün bazında Türkiye kobalt ithalat ve ihracat değerleri (Tüik, 2023)

GTİP No	Ürün	İthalat		İhracat	
		Miktar (kg)	Değer (₺)	Miktar (kg)	Değer (₺)
81.05.20.00.00.11	İşlenmemiş kobalt	104.253	142.052.230	424.924	523.937.968
26.05.00.00.00.00	Kobalt cevherleri ve zenginleştirilmiş kobalt cevherleri	2	98.006	0	0
28.22.00.00.00.12	Ticari kobalt oksitleri	50.750	42.975.923	111	74.805
81.05.20.00.00.12	Kobalt tozları	24.799	58.211.801	18.340	21.226.665

Zaman içinde iniş ve çıkışlar yaşayan kobalt fiyatı Mart 2022 tarihinde en yüksek değere ulaşmaktadır. Kobalt metalinin Ağustos 2023 tarihinde ise 33.420 \$/ton değerine ulaştığı görülmektedir (Trading Economics, 2023). Türkiye’de ise kobalt fiyatları aşağıda verilmektedir (Mapeg, 2023).

- Metal, serbest piyasa 51.015 \$
- Kobalt sülfat, serbest piyasa, ton 8.863 \$



Şekil 7. 2020-2023 yılları arasında kobalt fiyatı değişimi (Trading Economics, 2023)

Dünyada kobalt üretimi yapan birçok ülke bulunmaktadır. Tablo 21’de kobalt ve kobalt bileşiklerinin üretimini yapan birkaç şirket verilmektedir.

Tablo 21. Kobalt ve kobalt bileşiklerinin üretimini yapan bazı şirketler

Şirket	Ülke
Glencore	İsviçre
Eurasian Resources Group	Kazakistan
China Molybdenum	Çin
Gecamines	Demokratik Kongo Cumhuriyeti
Zhejiang Huayou Cobalt	Çin
Vale	Brezilya
Umicore	Belçika
Jervois Global Limited	Avustralya
Sherritt International	Kanada
Panoramic Resources Limited	Avustralya
Meta Nikel Kobalt A.Ş.	Türkiye

5.4. Kobalt Kullanım Alanları

Kobalt yüksek erime sıcaklığı, yüksek sıcaklıklardaki sağlamlığı ile kesici uç malzemesi, süper alaşım, yüzey kaplama, yüksek hız çelikleri ve daha birçok malzemenin üretiminde yer almaktadır. Kobalt yüksek sıcaklığa ve oksitlenmeye karşı yüksek dayanıklılığı sayesinde süper alaşım olarak uçak parçalarında ve jet motorlarının belirli parçalarında kullanılmaktadır. Ayrıca kobalt cam ve metal birleştirilmelerinde, paslanmaz çelik üretiminde, mıknatıslar ve veri saklama cihazlarında, eloktrolizle kaplama işlemlerinde, boya sektöründe ve renk verici pigmentlerde, petrol seramik ve cam sanayiinde, insan ve hayvan vücudunda B12 vitamini depolanabilmesi için anahtar bir rol oynamasının yanı sıra kanser ışın tedavilerinde de kullanılmaktadır (Int. Kyn.17). Kobalt, Li iyon pillerde yüksek iletkenliği ve batarya döngüsü boyunca stabil yapısı nedeniyle kullanılmaktadır. Kobalt katot aktif malzemede yer alan diğer geçiş metalleri (Ni ve Mn) ile karşılaştırıldığında daha az bulunur ve daha pahalıdır. NCA (NiCoAl) ve NMC (NiMnCo) katotlarında kobalt yüksek performans sağlar ve döngü stabilitesini artırır (Li ve Lu, 2020). Rezervlerin azlığı ve buna bağlı yüksek ve stabil olmayan pazar ve fiyat yapılması özellikle de Demokratik Congo’da kobalt madenciliğinde çocuk işçi çalıştırılması nedeniyle batarya sektöründe kobalt miktarının azaltılması ve alternatif malzeme bulunması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. 2018’de LCO katot kullanılan Li iyon pillerde 100 kWh başına 28 kg kobalt kullanıldığı tespit edilmiş ve bu değer 2035 yılında %60 oranında azalması hedeflenmiştir. (UCS, 2021).

5.5. Kobalt Cevherlerinin Zenginleştirilmesi

Kobalt üretiminin %60’ı bakır madenciliğinden, %38’i nikel madenciliğinden yan ürün olarak sağlanırken %2’si birincil kobalt kaynaklarından sağlanmaktadır. Kobalt tek başına Fas’ta ve Kanada arsenit cevherlerinden üretilmektedir (CI, n.d.). Kobalt maden yatağı ve cevher türüne göre farklı yöntemlerle zenginleştirilmektedir. Kobalt içeren sülfürlü cevherler flotasyon ve ardından pirometalurjik yöntemler kullanılarak zenginleştirilirken kobalt içeren oksitli cevherler liç-solvent ekstraksiyonu-elektroliz yöntemlerini kullanarak zenginleştirilebilmektedir (Savinova vd., 2023). Kobalt cevherinin sınıflandırılması ve üretim yöntemleri Tablo 22’de verilmektedir.

Kobalt çoğunlukla bakır ve nikel yatakları ile ilişkilidir ve genellikle yan ürün olarak elde edilir. Kobalt cevher hazırlama yöntemlerinden flotasyon yöntemi kullanılarak zenginleştirilebilir. Fakat flotasyon yöntemi sonucunda elde edilen kobalt konsantresinin sektörde kullanılabilmesi için bazı metalurjik yöntemler kullanılarak safsızlaştırılmalıdır. Kobalt içeren bakır cevherleri selektif flotasyon veya bulk flotasyonu yöntemleri ile kazanılabilmektedir. Selektif flotasyon yönteminde pH 10’da pH düzenleyici olarak kireç ve toplayıcı olarak dithiofosfat kullanılarak seçimli olarak ilk bakır flotasyonu gerçekleştirilir. Daha sonra toplayıcı olarak ksantat kullanılarak pirit ve pirotit flotasyonu gerçekleştirilir. İşlemler sonunda flotasyon hücresinde kalan batan kısım kobalt minerallerini içermektedir. Kobalt mineralleri sülfürik asit kullanılarak pH 4 değerine getirildikten sonra toplayıcı ksantat ve dithiofosfat karışımı kullanılarak yüzdürülebilmektedir. Bulk flotasyonu yönteminde ise bakır ve kobalt birlikte yüzdürülmektedir. Bulk flotasyon doğal pH değerinde ksantat veya dithiofosfat veya MBT kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sonraki aşamada elde edilen bakır ve kobalt içeren bulk konsantresinin pH değeri 11’e yükseltilerek kobalt minerallerinin bastırılması gerçekleştirilir ve bakır minerali yüzdürülebilir. Kobaltın bastırılması için az miktarda siyanür de kullanılabilir. Eğer bakır minerali kalkopirit ise bulk flotasyonu pH 10 değerinde ksantat kullanılarak gerçekleştirildikten sonra bulk/kitle konsantresinden

kobaltı ayırmak için flotasyon pH 4 değerinde toplayıcı olarak amin ve yağ asidi kombinasyonları kullanılarak gerçekleştirilebilir (FMC, n.d.).

Tablo 22. Kobalt cevherlerinin sınıflandırılması ve üretim yöntemleri (Yaylalı vd., 2020)

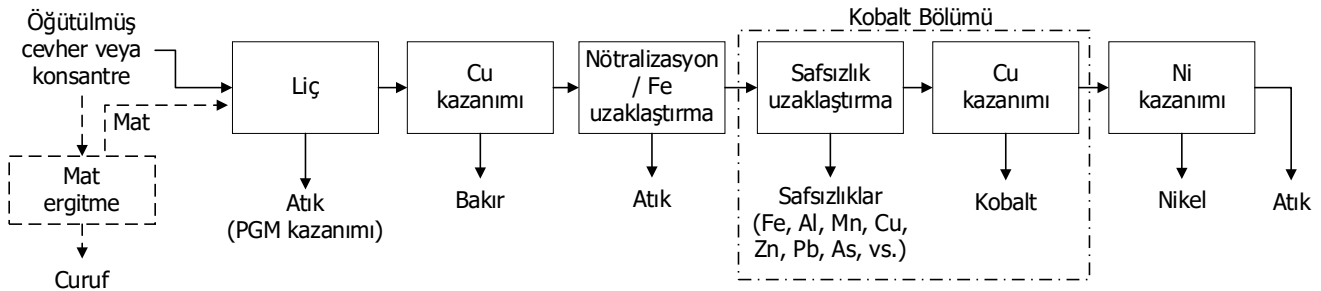
	Cevher türü	Metal tenörü	Kobalt Kaynağı/ Mineral	Üretim Yöntem(ler)i
Ana ürün kobalt	Arsenik Sülfür	-	Kobaltit – (Co, Fe) AsS	Kavurma + Basınç liçi
	Lateritik Nikel	%0,1 Co %1,26 Ni %46,5 Fe %0,1 Mg %1,9 SiO ₂	Götit – (Fe, Ni, Co) OOH	1) Yüksek basınçlı sülfürik asit liçi 2) İndirgeyici kavurma + Amonyak liçi (Caron prosesi)
Yan ürün olarak kobalt	Sülfürlü Nikel	%1,1±0,3 Co %36 Ni	Pentlandit – (Ni, Fe, Co) ₉ S ₈	1) Flotasyon + Flaş izabe 2) Flotasyon + Yüksek basınçlı amonyak liçi (Sherritt-Gordon prosesi)
	Sülfürlü Bakır-Kobalt Cevherleri	%0,4 Co %4-6 Cu	Karrolit – Cu (Co,Ni) ₂ S ₄	Kavurma + Atmosferik koşullarda sülfürik asit liçi
	Oksitli Bakır-Kobalt Cevherler	%0,3 Co %3 Cu	Heterogenit – Co O(OH) Sfaerokobaltit - CoCO ₃	Atmosferik koşullarda SO ₂ kullanarak indirgeyici sülfürik asit liçi

Nikel-kobalt sülfür cevherlerinde kobalt bir sülfür minerali olan kobaltit olarak veya pentlandit içerisinde bulunur. Kobaltın geri kazanım işlemi kırma ve öğütme işlemlerinin ardından flotasyon yöntemi ile nikel ve kobaltın birlikte yüzdürülmesi ile gerçekleşir. Üretilen nikel-kobalt konsantresi ergitilir ve düşük demirli sülfid matına dönüştürülür (Petavratzi vd., 2019).

Birincil kaynakların yanı sıra ikincil kaynaklardan kobalt üretimi üzerine de çalışmalar bulunmaktadır. Maden ve metalurji işlemleri sırasında ortaya çıkan atık sularında bulunan bakır, kobalt ve çinko gibi ağır metallerin kazanılması üzerine yapılan çalışmada iyon flotasyonu yöntemi kullanılmaktadır. Oldukça selektif bir yöntem olan iyon flotasyonu kobalt gibi ağır metallerin düşük konsantrasyonlarda bile kazanılmasını sağlamaktadır. İyon flotasyonu yöntemi ağır metallerin kimyasal kullanılarak hidrofobik ve çözünmeyen maddelerin oluşturulması prensibine dayanır. Daha sonra hidrofobik ve çözünmeyen hale getirilen taneler toplayıcı reaktif kullanılarak flotasyon yöntemi ile yüzdürülerek kazanılmaktadır (Hua vd., 2022).

Fiziksel ve fiziko-kimyasal yöntemler ile ön zenginleştirmeye tabi tutulan cevherler sülfat formunda elde edilir ve ardından metalurjik işlemlere tabi tutularak hidroksit formunda elde edilirler.

Kobalt genellikle bakır ve/veya nikel üretim prosesi sırasında bir yan ürün olarak elde edilir. Genel bir proses akış şemasında liç işlemi ile ilk olarak bakırın kazanımı ve safsızlaştırmasını içerirken ikinci olarak kobaltın kazanımı ve son olarak nikelin kazanımını içermektedir (Kawatra vd., 2019). Genel akış şeması Şekil 8’de verilmektedir.



Şekil 8. Kobaltın yan ürün olarak üretiminin genel akış şeması (Kawatra vd., 2019)



Alternatif kobalt üretimi, limonitik nikel lateritlerinin hidrometalurjik işlenmesi ile, ya HPA/ ya da yığın (atmosferik) liçi ile elde edilen bir yan üründür. Geleneksel Caron prosesi, Avustralya'nın Yabulu kentinde olduğu gibi, nikel geri kazanıldıktan sonra buharla sıyırma kullanarak bir oksid-hidroksit keki olarak kobalt üreten indirgeyici kavurma ve ardından amonyak süzme işlemini kullanır (Kawatra vd., 2019).

6. MANGANEZ

Manganez, bir diğer adı ile mangan, Li iyon bataryalarda nikel ve kobalt ile birlikte katot aktif malzeme üretiminde kullanılan malzemelerden biridir. Mangan (Mn), atom numarası 25, atom ağırlığı 54,94 g·mol⁻¹ olan bir elementtir. Metalik bir element olan mangan yerkürede %0,1 oranında bulunmaktadır. Bileşiminde mangan bulunan 300'den fazla mineral vardır. Bu minerallerden başlıcaları Tablo 23'de verilmiştir (Eroğlu ve Şahin, 2019).

Tablo 23. Önemli mangan mineralleri

Mineralin Adı	Formülü	Renk	Mn, %	Sertlik	Yoğunluk (ton/m ³)
Pirolusit	MnO ₂	Çelik grisi-siyah	63,2	6,0-7,0	5,0
Ramsdellit	MnO ₂	Koyu gri-siyah	63	3,0	4,7
Polianit	MnO ₂	Siyah-çelik grisi	-	6,0-6,5	5,0
Manganit	Mn ₂ O ₃ ·H ₂ O	Siyah-çelik grisi	62	4,0	4,3
Kriptomelan	KMn ₈ O ₁₆	Siyah-çelik grisi	45-60	5,0-6,0	4,3
Psilomelan	BaMn ₉ O ₁₈ ·2H ₂ O	Siyah-koyu gri	35-60	5,0-6,0	4,4-4,7
Hausmanit	Mn ₃ O ₄	Kahverengi-siyah	72	4,8	4,7-5,0
Braunit	3Mn ₂ O ₃ ·MnSiO ₃	Kahverengi-siyah	50-60	6-6,5	4,7-4,9
Bixbit	(Mn, Fe) ₂ O ₃	Siyah	30-40	6,0	5,0
Jakopsit	MnFe ₂ O ₄	Siyah	24	6,0	4,8
Hollandit	BaMn ₈ O ₁₆	Siyah-çelik grisi	24	6,0	4,5-5,0
Koronadit	PbMn ₈ O ₁₆	Siyah-çelik grisi	24	5,2-5,6	4,5-5,0
Rodokrosit	MnCO ₃	Kırmızı-pembe-kahve	48	3,5-4,5	3,3-3,6
Rodonit	MnSiCO ₃	Pembe	42	5,5-6,5	3,4-3,6
Alabandit	MnS	Demir siyahı	Değişken (63,2)	3,5-4,0	3,95
Wad	Değişik	Siyah-esmer siyah	Değişken (63,2)	5,0-6,0	3,0-4,28

Pirolusit, Manganit, Rodokrosit, Wad, Kriptomelan, Hollandit, Koronadit ve Psilomelan yüzeysel koşullarda oluşan mangan mineralleri olup Rodonit ve Braunit metamorfizma geçirmiş Mn yataklarında görülmektedir. Derin ortam koşullarında Hausmanit ve ender olarak Jakopsit minerali gözlenir. İçerdiği mangan miktarına göre mangan cevheri; manganlı demir (%5-10 Mn), demirli mangan (%10-35 Mn) ve mangan cevheri (%35'den fazla Mn) olarak sınıflandırılırlar. Kullanım alanlarına göre; metalurjik mangan cevheri (%46-48 Mn), batarya sanayi mangan cevheri (%78-85 MnO₂), kimya sanayi mangan cevheri (%74-84 MnO₂) ve diğer amaçlarda kullanılan mangan cevheri olarak sınıflandırılır (DPT, 2001).

6.1. Türkiye'de Mangan Madenleri

Türkiye mangan potansiyeli olarak %0,11'lik bir paya sahiptir. Demirli-mangan (%10-35 Mn) cevherleri rezervlerin büyük bir bölümünü oluşturur. Manganlı demir cevheri demir çelik fabrikalarında sinterde kullanılarak mangan cevheri kullanımından tasarruf sağlar. Türkiye'de manganlı demir (%5-10 Mn) cevheri de bulunmaktadır. Türkiye'de bulunan mangan cevheri, genelde metalurjik mangan cevheri grubunda değerlendirilebilir.

Tablo 24'te Türkiye mangan rezervleri yer almaktadır. Türkiye mangan rezervleri görünür+muhtemel 4.561.750 ton olup en önemli mangan rezervi 4 milyon ton ile Denizli Tavas'ta bulunmaktadır. Ayrıca, ülkemizde belirli bölgelerde yaygın



olarak mangan cevher yatakları bulunmaktadır. Ancak tenör ve rezervleri dünya mangan yatakları ile kıyaslandığında küçüktür (DPT, 2001).

Tablo 24. Türkiye mangan cevheri rezervleri (DPT, 2001).

Yatak Adı	İli ve İlçesi	Rezerv Görünür+Muhtemel (1.000 ton)	Tenör (%Mn)	Metal İçeriği (ton)
Dokuz tekne	Adana-Selimiye	76,5	20,0	15,30
Kontromtaşı	Artvin-Ardanuç	10,0	38,5	3,85
Baçlı	Artvin-Borçka	20,0	42,17	8,43
Seçkiyat	Artvin-Borçka	28,8	34,09	9,82
Korucular	Artvin-Borçka	187,5	42,8	8,02
Korucular	Artvin-Borçka	202,5	22,9	4,64
Çavdarlı	Artvin-Şavşat	30,0	31,78	9,53
Ulukent	Denizli-Tavas	4,000	33,86	1354,4
Dilli	Erzincan-Kemaliye	24,0	43,93	10,54
Zülfikar	Gaziantep-Burç	30,0	32,62	9,78
Y. Kalecik	Gaziantep-Musabeyli	9,0	30-48	3,6
K. Mustafapaşa	Gaziantep-Musabeyli	145,0	53,65	7,78
Mendos	Muğla-Fethiye	23,0	49,35	11,35
Çubuklu	Trabzon-Araklı	18,0	45,0	8,1
Küçükkyaz	Trabzon-Maçka	37,5	51,0	1,92
Ocaklı	Trabzon-Maçka	28,0	35,0	9,80
Kızılamba	Zonguldak-Ereğli	19,0	35,0	6,65
TOPLAM		4.561,75		15,76

6.2. Dünya’da Mangan Rezervleri

Dünya metal mangan rezervi 810 milyon ton’dur. Güney Afrika, Brezilya, Ukrayna ve Avustralya önemli rezervlere sahip ülkelerdir. Dünya rezerv dağılımları ve yıllara göre dünya manganez üretimi Tablo 25’de verilmiştir (USGS, 2022).

Tablo 25. Dünya manganez rezerv dağılımı ve yıllara göre dünya manganez üretimi (ton) (USGS, 2022).

Ülke	2017	2018	2019	2020	2021	Rezerv
Güney Afrika	5.400	5.800	5.800	6.500	7.400	640.000
Gabon	2.190	2.330	2.510	3.310	3.600	61.000
Avustralya	2.820	3.480	3.180	3.330	3.300	270.000
Çin	1.700	1.200	1.330	1.340	1.300	54.000
Ukrayna, konsantre	735	517	500	578	670	140.000
Gana	810	1.360	1.550	637	640	13.000
Hindistan	734	961	801	632	600	34.000
Brezilya	1.160	1.310	1.740	494	400	270.000
Meksika	212	210	202	198	200	5.000
Kazakistan, konsantre	168	140	140	158	160	5.000
Diğer ülkeler	898	1.589	1.846	1.693	1.680	
Toplam	17.305	18.897	19.599	18.870	19.950	1.492.000

Dünya rezervi ağırlıklı olarak 4 ülkede toplanmıştır. Bu dört ülke rezervin yaklaşık %80’ine sahiptir. Manganezin önde gelen kullanımı olan küresel çelik üretimi, küresel COVID-19 pandemisinin olumsuz etkilerinin ardından artan talep nedeniyle 2021’de 2020’deki üretime göre artmıştır. Küresel manganez cevheri üretiminin 2020’dekinden yaklaşık %6 daha fazla olduğu tahmin edilmektedir. Mangan üretimi çok sayıda ülke tarafından gerçekleştirilmesine karşın G. Afrika,

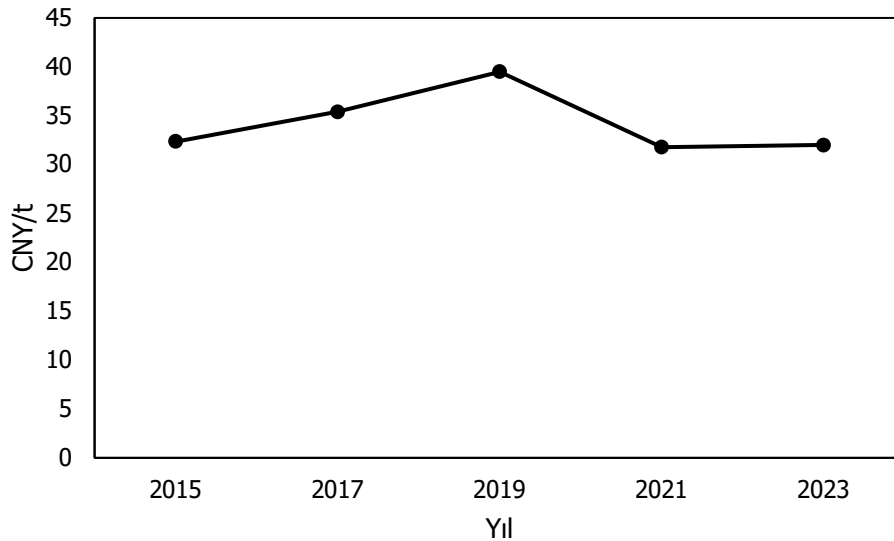
Çin, Avustralya ve Gabon'un üretim miktarları öne çıkmaktadır. Üretimden kritik ülke sayısı 8 olarak bulunmuştur. Türkiye dünya üretiminin %0,12'sini gerçekleştirerek üretim sıralamasında 15. sırayı almıştır. Ülkemiz rezerv oranına göre daha az miktarda mangan üretmektedir (IMIB, 2022).

6.3. Türkiye ve Dünya'da Mangan Ticareti

Dünya mangan cevheri ticareti 8 Milyar \$'lık bir hacme sahiptir. En önemli ihracatçılar G. Afrika, Avustralya, Gabon ve Brezilya'dır. Bu 4 ülke tüm pazarın yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır. Türkiye yaklaşık 7 milyon \$'lık ihracatı ile 27. sırada yer almaktadır. Dünya ithalat pazarında ise Çin, Hindistan, Kore ve Japonya ön plana çıkmaktadır. Çin tüm ithalat hacminin %60'ını tek başına gerçekleştirir.

Dünya ithalatının büyük bir kısmını Çin (%57) gerçekleştirir. Dünya mangan metali pazarı 1,35 milyar \$'dır. Türkiye 4 milyon \$'lık mangan metali ithalatı gerçekleştirmektedir. İthalatının %60'sı Çin, %14'ü İspanya ve %13'ü Almanya ile yapılmaktadır. Dünya ferro-siliko-mangan ticaret hacmi 4,1 milyar \$'dır. En önemli ihracatçılar Hindistan, Ukrayna ve Norveç'tir (IMIB, 2022).

Dünya ithalat pazarında çok sayıda ülke bulunmaktadır. En önemli ülkeler ABD, Japonya, Almanya, Hollanda ve Türkiye'dir. Bu 5 ülke toplam hacmin %40'ını sağlamaktadır. Türkiye 5,3 milyon \$ ihracat ve 231,4 milyon \$ ithalat ile net ferro-silika-mangan ithalatçısıdır. Türkiye toplamda 223,9 milyon \$'lık mangan cevheri, mangan ve ferro-silika-mangan ithal etmektedir. Dünya mangan fiyatlarının gelişimi (CNY-t⁻¹) ise Şekil 9'da verilmektedir (Int. Kyn. 18).



Şekil 9. Dünya mangan fiyatları (Int.Kyn. 18).

6.4. Mangan Kullanım Alanları

Türkiye'de mangan kullanım alanları Dünya'daki kullanım alanlarıyla paralellik göstermektedir. Ülkemizde üretilen manganın % 95'e yakını demir-çelik sektöründe kullanılmaktadır. Diğer önemli kullanım alanı batarya ve kimya sanayiidir. Az miktarda kullanıldığı bir diğer alan elektrolitik çinko üretimidir. Demir-çelik sektöründe manganın %95'i manganlı demir alaşımları olup demirsiz manganda ise manganın %95'i ferromangan halindedir (DPT, 2001).

Mangan sahip olduğu özelliklerden dolayı metalurji, kimya ve batarya sektöründe kullanılan en önemli yardımcı metallere biridir. Çeliğin üretimi sırasında ham demirin içinden oksijenin ve kükürdün atılmasını kolaylaştırdığı için çeliğe mangan katılmaktadır. Böylece çeliğe haddelenme ve dökülme özelliklerini kazandırır. Mangan çeliğe ayrıca yüksek bir çekme mukavemeti ve uzama kabiliyeti kazandırır. Bu nedenle manganlı çelikler demir yolu çivisi olarak demiryolu raylarında, bağlantılarında, kesişme noktalarında, makaslarda ve makine dişlisi, otomobil jantı, silah namlusu, koruyucu zırh levhaları, köprü ve binalar için özel yapı malzemesi yapımında kullanılmaktadır.

Mangan kimya endüstrisinde de önemli bir yere sahiptir. KMnO₄ kimya laboratuvarlarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Diğer yandan suni gübre, cam, seramik, refrakter, çimento, ilaç, petrokimya ve elektronik endüstrisinde de kullanılmaktadır.



Kullanım alanlarına göre mangan cevheri 4 ana gruba ayrılır :

- Metalurjik mangan cevheri %48-50 Mn içerir.
- Batarya sanayi mangan cevheri %78-85 MnO₂ içerir.
- Kimya sanayi mangan cevheri %74-84 MnO₂ içerir.
- Diğer amaçlarda kullanılan mangan cevheri

Dünyada yıllık tüketilen yaklaşık 25 milyon ton mangan cevherinin; %90'ı metalurji sanayinde geri kalanı ise batarya üretiminde ve kimya sanayinde kullanılmaktadır (DPT, 2001).

Metalurjik Mangan Konsantreleri:

- Mn : %44'ten fazla (%44-60 Mn)
- Mn:Fe : 6'dan fazla
- Fosfor : %0,15-0,2'den az (her % Mn için %0,003'den az fosfor)
- Cu+Pb+Zn : %0,1-0,3'den az
- Al₂O₃+SiO₂ : %15'den az

Tane iriliği: 100 mm'den ince olmalıdır.

pH ve Kimyasal Konsantreler:

Kuru pil, kimyasal madde, renksiz cam yapımında kullanılan Mn konsantreleri, aktif oksijeni fazla peroksitli bilhassa pirolusit, manganit ve vernadit içermelidir. Bu konsantreler;

- MnO₂ : En az % 70-85
- Mn : En az % 53
- Fe : En fazla % 3
- SiO₂ : En fazla % 3-5
- Al₂O₃ : En fazla % 3
- P : En fazla % 0,1-0,2
- Ni, Co, As : En fazla % 0,05

6.5. Mangan Cevherlerinin Zenginleştirilmesi

Mangan konsantrelerini zenginleştirmekteki amaçlar; Mn tenörünü ve Mn-Fe oranını yükseltmek ve istenilmeyen zararlı elementleri (fosfor, silis, Al₂O₃, Cu, Zn, Pb, As) konsantreden uzaklaştırmaktır. Mangan; demir-mangan, manganlı demir cevherlerinden oluşum şekillerine göre elle ayıklama, gravite zenginleştirme, manyetik zenginleştirme, flotasyon yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir.

Elle ayıklama yöntemi iri tanede serbestleşebilen, yüksek mangan tenörlü cevherlerin zenginleştirilmesinde uygulanmaktadır. İleri aşamadaki cevher zenginleştirme işlemlerine yardımcı ön zenginleştirme işlemi olarak da uygulanmaktadır. Kırma-öğütme-sınıflandırma işlemleri sonucu gang minerallerinin ve mangan minerallerinin farklı tane sınıflarında toplanmaları halinde uygulanmaktadır. Bol killi, pirolusit, vernadit minerallerinin zenginleştirilebilmesiyle, satılabilir konsantreler üretilebilmektedir. Ayrıca ileri aşamadaki zenginleştirme işlemlerinde (gravite, manyetik, flotasyon zenginleştirme) zarar verecek şlamın (çamur) atımında bir ön zenginleştirme yöntemi olarak uygulanmaktadır. Ekonomik mangan minerallerinin çoğunun yoğunlukları 3 g·cm⁻³'ten yüksektir. Yoğunluk farkına dayalı zenginleştirme yöntemleri iri tanede serbestleşen taneleri zenginleştirebildiklerinden ve iri taneli konsantrelerde metalurji sanayinde tercih edildiklerinden gravite zenginleştirilmesi mangan cevherlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle pirolusit, braunit, hausmanit, mangan cevherlerine gravite zenginleştirme uygulamaktadır. Ayrıca oluşum nedeniyle yoğunlukları 3,2 g·cm⁻³'ten fazla olan wad, psilomelan ve rodokrozit cevherleri de zenginleştirilebilmektedir.

Serbestleşme tane irilikleri ve cevher hazırlamada ulaştıkları, tane iriliklerine, tesis kapasitelerine bağlı olarak aşağıdaki yöntemler kombine olarak uygulanabilmektedir (Önal ve Ateşok, 1994):

- Ağır ortamda yüzdürme batırma 50-5 mm
- Jiglerde zenginleştirme 30-1 mm
- Ağır ortam siklonlarında zenginleştirme 10-20 mm
- Humphrey spirallerinde zenginleştirme 6-0,3 mm
- Sarsıntılı masalarda zenginleştirme 2-0,05 mm
- MGS -0,01 mm

Ülkemizdeki mangan cevherlerinin büyük bir çoğunluğunun toprak görünüşlü oksit cevheri tipinde oluşları, kırma-öğütme işlemleri sırasında bol miktarda ince malzeme meydana getirmeleri, mangan mineralleri ile gang minerallerinin çok iyi karışmış olmaları ve tane serbestleşmesi için öğütme işleminin gerekli olması nedeniyle, flotasyon yöntemi en önemli zenginleştirme yöntemi olarak ortaya çıkmaktadır. Bazı cevherlere yüksek alan şiddetinde manyetik zenginleştirme uygulandığında fakir-zengin, ağır-hafif mangan mineralleri topluca yüksek kazanma verimleri ile konsantreye alınabilmektedir. Fakat bu konsantrelerin tenörleri fazla olmamaktadır. Böyle cevherlere önce yoğunluk farkına dayalı zenginleştirme uygulandığında yoğunlukları yüksek ($3,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 'ten fazla) mangan mineralleri konsantreye geçerek zengin mangan konsantreleri oluşturmaktadır (Bayat vd., 2013).

7. DEMİR

Demir; Li iyon bataryalarında özellikle LiFePO_4 esaslı katot aktif malzemelerde kullanılan elementler arasındadır. Atom numarası 26, atom ağırlığı $55,85 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ olan baz metal grubu bir elementtir. Yerkabuğunda en fazla bulunan ilk dört elementten biri olan demir alüminyumdan sonra en yaygın metaldir (Tuncel vd., 2017).

Demir, oksitlendiğinden tabiatta nabit olarak ender bulunur. Manyetik demir siyahı renginde, yağlı metal parlaklığında, porselen üzerinde siyah çizgi bırakan, gevrek yapılı, kuvvetli manyetik özellik gösteren bir mineraldir. Hematit kırmızı renkli, mat, porselen üzerinde kırmızı ve kahverengi kırmızı renk bırakan bir mineraldir. Spekülarit (Olijist) demir siyahı renginde, kuvvetli metal parlaklığında, porselen üzerinde kırmızı ve kahverengi kırmızı çizgi bırakan gevrek yapılı bir mineraldir. Mohs sertlik skalasına göre sertliği 6,5 ve yoğunluğu $5,2-5,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ arasındadır. Limonit koyu kahverenginden açık sarıya kadar çeşitli renklerde, mat, porselen üzerinde kahverengi-sarı kahverengi bir çizgi bırakan gevrek bir mineraldir. Mohs sertlik skalsına göre sertliği 5-5,5, yoğunluğu $3,8-4,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ arasındadır. Siderit sarımsı beyaz renkte, mat, porselen üzerinde beyaz veya açık gri renk bırakan gevrek ve çok iyi dilinimi olan bir mineraldir. Mohs sertlik skalsına göre sertliği 4-4,5 ve yoğunluğu $3,7-3,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ arasında olup saf halde %48'e varan Fe ihtiva eder.

Demirin minimum işletme tenörüne ulaşabilmesi için zenginleşme katsayısı on gibi küçük bir değer olduğunda erken magmatik evreden sedimanter ve rezüdüel zenginleşmeye kadar hemen her ortamda konsantre olarak yatak oluşturabilmektedir (Temur, 1997).

7.1. Türkiye'de Demir Madenleri

Ülkemiz rezervleri; Sivas, Malatya, Bingöl, Adana, Kayseri bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Bu cevherlerin yanı sıra Ankara, Balıkesir ve Adapazarı bölgelerinde de değişik büyüklüklerde demir cevheri rezervleri mevcut olup, üretilen cevher çimento tesislerinde kullanılmaktadır. Bilinen demir rezervlerimiz bugünkü tüketim seviyesi ile entegre demir-çelik fabrikalarının gereksinimini uzun süre karşılayabilecek durumda değildir. Ülkemizde demir cevheri madenciliğinde; yeni yataklar bulunmadığı, mevcut yataklarla ilgili rezervler geliştirilmediği, kaliteleri artırılmadığı, üretim maliyetleri düşürülmediği sürece demir cevheri ithali artarak devam edecektir. Stratejik öneme sahip metal madenleri arasında yer alan demirin, yaklaşık 124,6 milyon ton işletilebilir rezervin, yıllık ortalama 6-8 milyon ton üretim ile 21 yılın sonunda tükenmesi ve yıllık ortalama 15-18 milyon ton olan demir cevheri ihtiyacının karşılanması konusunda tümüyle ithalata bağımlı duruma gelinmesi beklenmektedir. Türkiye'nin işletilebilir demir rezervleri Tablo 26'da verilmektedir (Tuncel vd., 2017).

Tablo 26. Türkiye İşletilebilir Demir Rezervleri (Tuncel vd., 2017)

Yatak Adı	Tenör (%Fe)	Rezerv (1000 ton)
Sivas-Divriği-A Kafa	54	36.500
Sivas-Divriği-B Kafa	56	8.000
Sivas-Divriği-Ekinbaşı	55	12.000
Sivas-Divriği-Purunsur	55	100
Sivas-Divriği-Taşlıtepe	62	60
Gürün-Otlukilise	54	800
Kangal-Çetinkaya-Pınargözü	54	1.300
Malatya-Hekimhan-Deveci	38	46.000
Malatya-Hekimhan-Şırzı	49	275
Kayseri-Yahyalı-Karamadazı	51	300
Kayseri-Yahyalı-Karaçatı Kayseri-Yahyalı-Karamağara Kayseri-Yahyalı-Kızıl+Menteş	54	9.500
Kayseri-Yahyalı-Ayigediği	54	590
Pınarbaşı-Tacin	51	70
Adana-Feke-Koruyeri	51	8.500
Adana-Feke-Attepe	57	4.500
Adana-Elmadağ	53	1.000
Adana-Feke-Uyuzpınar	58	235
Adana-Karaisalı-Yenigireği	57	40
Ankara-Bala-Kesikköprü	54	1.800
Balıkesir-Havran-Büyükeymir	53	340
Balıkesir-Şamlı	58	190
TOPLAM	-	132.100

7.2. Dünya’da Demir Rezervleri

Dünya demir rezervinin toplamı 800 milyar ton olarak tahmin edilmekte olup bunun 230 milyar ton demir ihtiva ettiği düşünülmektedir. Görünür rezerv miktarı ise 170 milyar ton olup yaklaşık 81 milyar ton demir içermektedir. USGS verilerine göre dünya demir rezervi 81 milyar ton’dur. Avustralya, Rusya, Brezilya ve Çin dünyanın en büyük rezervlerine sahip ülkelerdir ve tüm dünya rezervinin yaklaşık %70’ine sahiptir. Rezervler belli ülkelerde yoğunlaşmıştır ancak yoğunlaşmanın boyutu görece düşüktür. Türkiye 81 milyon ton ile dünya rezervinin %0,1’ine sahiptir. Bu açıdan demir rezervi konusunda yetersiz sayılabilir. Dünya kullanılabilir demir cevheri rezerv miktarları sırasıyla Tablo 27’de verilmektedir (USGS, 2022).

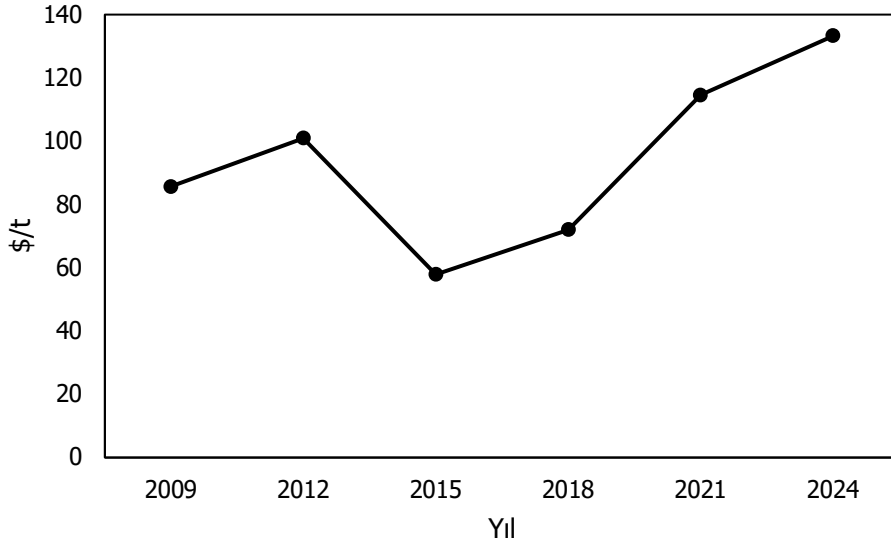
Tablo 27. Dünya demir cevheri rezervleri (milyar ton) (USGS, 2022).

Kullanılabilir Cevher	2017	2018	2019	2020	2021
Avustralya	883.000	900.000	919.000	912.000	900.000
Brezilya	425.000	460.000	405.000	388.000	380.000
Çin	360.000	335.000	351.000	360.000	360.000
Hindistan	202.000	205.000	238.000	204.000	240.000
Rusya	95.000	96.100	97.500	100.000	100.000
Ukrayna	60.500	60.300	63.200	78.800	81.000
Kanada	49.000	52.400	58.500	60.100	68.000
Kazakistan	39.100	41.900	22.000	62.900	64.000
Güney Afrika	81.100	74.300	72.400	55.600	61.000
İran	40.100	36.400	33.100	49.500	50.000
ABD	47.900	49.500	46.900	38.100	46.000
İsveç	27.200	35.800	35.700	35.800	40.000
Şili	-	14.000	13.100	15.600	19.000
Meksika	-	22.300	-	14.900	17.000
Peru	-	14.200	15.100	13.300	16.000
Türkiye			16.400	15.400	16.000
Diğer Ülkeler	119.000	62.500	67.700	69.500	90.000
Toplam	2.428.900	2.459.700	2.454.600	2.473.500	2.548.000

- : üretim verileri mevcut değildir.

7.3. Türkiye ve Dünya’da Demir Ticareti

Dünya demir cevheri ticareti 2019 yılında bir önceki seneye göre %30 artarak 120,98 milyar \$ olarak gerçekleşmiştir. Genel olarak, küresel fiyatlar 2021’in ilk 9 ayında ton başına ortalama birim değer 178,27 \$, 2020 yıllık ortalama ton başına 108,92 \$’dan %64 artış ve 2019 yıllık ortalama ton başına 93,85 \$’dan %90 artış eğilimi göstermiştir. En önemli demir cevheri ihracatçıları Avustralya ve Brezilya’dır. Bu 2 ülke tüm pazarın yaklaşık %73’ünü oluşturur. Türkiye yaklaşık 100M\$’lık demir cevheri ihracatı ile 23. sıradadır. Dünya demir cevheri ithalatı, Trademap verilerine göre 144,39 Milyar\$ olarak gerçekleşmiştir. Türkiye yaklaşık 1,1 milyar \$’lık ithalatı ile 8. büyük ithalatçı olmuştur. 2019 yılı dünya demir ithalatında Çin %69’luk pay ile pazarda kısmi tekel alıcı konumuna gelmiştir. Türkiye yaklaşık 1,1 milyar \$’lık ithalat gerçekleştirmiştir. 2021’de üretim, sevkiyat ve ticaretteki önemli artışlar, 2020’de küresel çelik üretimini ve tüketimini düşüren COVID19 pandemisinin etkilerinden kurtulmasına bağlanmıştır. Yerli demir cevheri üretiminin 2021’de 46 milyon ton olacağı tahmin edilmiş, 2020’de 38,1 milyon tondan %21’lik bir artış sağlanmıştır. ton olan toplam ham çelik üretiminin 2021’de 87 milyon tona yükseldiği tahmin edilmiştir. Demir cevheri kullanan proses olan bazik oksijen fırınlarında üretilen çeliğin payı, enerji verimliliği, azaltılmış çevresel etkiler ve hazır hurda tedariki nedeniyle elektrik ark ocaklarının artan kullanımı nedeniyle 2015’te %37,3’ten 2021’de tahmini olarak %28’e düşmeye devam etmiştir (IMIB, 2022). 2023 yılında Türkiye, demir cevheri ihracatında oldukça etkileyici bir performans sergilemiştir. Toplamda 6.307.373,5 ton demir cevheri ihraç edilmiş ve bu ihracatın değeri, 1,94 milyar dolar olarak kaydedilmiştir. Bu, ülkenin demir cevheri ticaretindeki güçlü ve istikrarlı pozisyonunu bir kez daha vurgulamaktadır (Int. Kyn. 19). Şekil 10’da yıllara göre demir cevheri fiyat değişim grafiği verilmektedir (Int. Kyn. 20).



Şekil 10. Yıllara göre demir cevheri fiyatı (İnt.Kyn. 20).

7.4. Demir Kullanım Alanları

Demir, tüm metaller içinde en çok kullanılanıdır ve dünyada üretilen metallerin ağırlıkça %95'ini oluşturur. Demir cevherinin tüketildiği iki ana üretim dalı; yüksek fırın pik demir üretimi ile direkt redüksiyon tesisleridir. Bazı demir mineralleri katkılı çimento üretiminde kullanılmaktadır. Manyetit; demir cevherinin manyetik özelliği ve yüksek yoğunluğu nedeniyle, belirli boyuta indirilmiş konsantresinden, diğer minerallerin zenginleştirilmesi için “ağır ortam” hazırlanmasında ve bazı sanayi uygulamalarında “ağırlık” olarak yararlanılmaktadır. Ayrıca, demir oksitlerin çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır. Başlıca kullanım alanları; boya, plastik, seramik, kağıt sanayidir. Özellikle boya endüstrisinde, suda çözünebilen farklı renklerin üretilebilmesinde önem kazanmaktadır. Doğal demir oksit ucuz pigment olarak çeşitli boyalarda; mürekkep, plastik, lastik, kağıt, yapı malzemeleri, harç, tuğla, fayans, hayvan yemi, ilaç ve kozmetik ürünleri üretiminde kullanılır (Tuncel vd., 2017).

7.5. Demir Cevherlerinin Zenginleştirilmesi

Fe- tenörünü yükseltmek için zenginleştirme işlemi zengin cevherlere de uygulanmaktadır. Bu işlemlerdeki amaç açık ve kapalı işletmelerden gelen, 1 metreden iri olabilen, zengin demir cevherlerini yüksek fırın için gerekli tane iriliklerine koruyucu olarak boyutunun küçültülmesidir. Bunun için cevher kademeli olarak, belirli bir akış şemasına göre kırıcılardan ve eleklerden geçirilir. Genelde cevherdeki Fe-minerali cinsine göre -100+5 mm tane boyutuna indirildikten sonra, kırılmış ürün sınıflandırılarak -10+0,150 mm tane boyutunda sinterlik ürün ve -0,150 mm tane boyutunda peletlik ürün üretilir. Sinterlik ve peletlik ürünler maden ocağı yakınındaki peletleme veya izabehane yanındaki peletleme-sinterleme tesislerinde değerlendirilirler. Cevherde az miktarda ve iri tanede serbestleşen gang mineralleri varsa ve tesis kapasitesi küçükse, tesisin bulunduğu yöre nin işçilik durumu uygun ise, cevherin hazırlama işleminde elle ayıklama yöntemi uygulanarak parça cevherin Fe-tenörü daha da yükseltilebilir.

Düşük tenörlü demir cevherlerine uygulanan zenginleştirme yöntemlerinden biri olan elle ayıklama yönteminde demir minerallerinin gang minerallerinden farklı renk ve yoğunlukta oluşundan yararlanır. Özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme yöntemi genelde özgül ağırlığı yüksek olan demir minerallerini ve özellikle hematit içeren cevherlerin zenginleştirilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İşlemden demir mineralleri ile cevherdeki gang mineralleri arasındaki özgül ağırlık farkının oldukça fazla olmasından yararlanılmaktadır. Özgül ağırlığa dayalı zenginleştirmede en yaygın kullanılan cihaz Humphrey Spiralidir. Bunu önem sırasına göre ağır ortam yüzdürme batırma konsantratörleri, Reichert Konileri, jigler ve sarsıntılı masalar izlemektedir.

Demir cevherleri manyetik alanda yaygın bir şekilde, yüksek kapasiteli tesislerde kolay ve ucuz olarak zenginleştirilmektedir. Demir cevherlerinin manyetik zenginleştirilmesinde %60-95 arasında değişen metal verimlerine ulaşılabilmektedir. Cevherlerin killenmiş olmaları ve tam serbestlik tane iriliğine kadar ulaşılması halinde %95'lik verimlerle, çok yüksek tenörlü konsantreler (%65-69 Fe) üretilebilmektedir. Manyetik alandan çok etkilenen manyetit gibi mineraller zayıf manyetik alanda (500-1.500 Gauss) zenginleştirilirken, hematit gibi az etkilenen mineraller yüksek alan şiddetli (10.000-25.000 Gauss) manyetik ayırıcılarda zenginleştirilirler.

Kalsinasyon işleminde cevherdeki demir karbonatların CO₂'i ve demir hidroksitlerin suyu uçurularak Fe tenörü yükseltilir.

Demir cevherlerinin tuvenan üretiminde gang minerali olarak kuvars, kalsit, çört, kil, klorit ve granatlar bulunur. Bunlardan bilhassa kil ve kuvars demir konsantrelerinin kalitesini bozar. 40-50 µm altında serbestleşebilen veya öğütme anında bu tane iriliklerine ufanan cevherin diğer zenginleştirme yöntemleri ile değerlendirilmesi güçleştiğinden flotasyon işlemi uygulanır.

Son zamanlarda Fe-minerallerini bastıran doğal ve yapay reaktiflerin saptanması sonucu indirekt flotasyon tercih edilmiştir. Her iki flotasyon uygulamasında da gang mineral tanelerinin Fe-iyonları ile kirlenmiş olması flotasyon başarısını olumsuz yönde etkiler. Gangin büyük kısmını kalsit oluşturursa, bazik ortamda çalışmak gerekir. Manyetik alanda zayıf etkilenen Fe-minerallerinin zenginleştirilmesi için geliştirilen Jones ayırıcısının geliştirilip başarıyla uygulamaya konulmasından sonra, burada üretilen konsantreleri iyice aratarak süper konsantreler üretmek için ters flotasyon yöntemi uygulanmaktadır (Yıldız, 2010).

8. TİTANYUM

Titanyum, özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları gerektirebilecek Li iyon pil tasarımlarında LiTiO₂ esaslı anot aktif malzemelerin üretiminde gereklidir. Atom numarası 22 olan ve periyodik cetvelde Ti sembolü ile yer alan element, 4,506 g·cm⁻³ özgül ağırlığa sahiptir. Yüksek korozyon dayanımı, hafiflik, mukavemet/özgül ağırlık oranı sebebiyle geniş kullanım alanına sahiptir. Titanyum, hem titanyum metalinin (ve alaşımlarının) hem de TiO₂ pigmentinin benzersiz özellikleri nedeniyle kritik ve stratejik bir mineral olarak kabul edilir (Woodruff vd., 2017).

Dünya yüzeyinde çok fazla ve yaygın şekilde olan titanyum, birçok mineralle beraber yataklanmaktadır. Bu minerallerin en önemlisi ilmenit (FeTiO₃)'tir. İlmenitten sonra en önemli titanyum minerali olarak bilinen rutil, TiO₂ kimyasal formülüne sahiptir. Bununla birlikte rutil ile aynı kimyasal formüle sahip, fakat farklı kristal yapılarında bulunan anataz, brokit mineralleri de titanyum minerali olarak bilinmektedir. Diğer daha az yaygın titanyum oksit içeren mineraller psödobrokit (Fe₂TiO₅), perovskit (CaTiO₃), geikielit ((Mg, Fe) TiO₃) ve ana bileşen olarak titanyum içeren tek silikat minerali (CaTiSiO₅) sfen olarak da bilinen titanittir. Titanyum minerallerini içeren cevherler özel jeolojik koşullarda ve çok seyrek olarak yataklanmaktadır ve kayaçlardan (primer yataklar) ve plaserlerden (ikincil yataklar) elde edilmektedir.

8.1. Türkiye'de Titanyum Madenleri

Türkiye'de bilinen titanyum yatakları ağırlıklı İstanbul ve Şile civarı ile Menderes Masifi bölgesinde yer almaktadır (Polat, 1968). Türkiye'nin görünür ve muhtemel titanyum rezervleri sırasıyla Tablo 28 ve 29'da verilmektedir (Yücel, 2018).

Tablo 28. Türkiye Görünür TiO₂ Rezervleri (Yücel, 2018).

Yer	Görünür Rezerv (milyon ton)	Ortalama Tenör (%TiO ₂)	TiO ₂ (milyon ton)
Sakarya-Karasu	161,35	0,93	1,50
Manisa	111,54	0,85	0,95
Manisa-Alaşehir	5,13	4,95	0,25
Afyon	1,31	0,85	0,01
Manisa-Gördes	1,27	1,11	0,01
Toplam	280,6	0,97	2,72

Tablo 29. Türkiye Muhtemel-Mümkün TiO₂ Rezervleri (Yücel, 2018).

Yer	Muhtemel-Mümkün Rezerv (milyon ton)	Ortalama Tenör (%TiO ₂)	TiO ₂ (milyon ton)
İzmir-Aktaş	3,2	1,2	0,04
İzmir-Rahmanlar	7,2	1,1	0,08
İzmir-Işıkderesi	0,6	1,8	0,01
Manisa-Benlieli	45,0	0,5	0,23
Manisa-Demirciçayı	1,7	0,5	0,01
Manisa-Gördesçayı	6,8	0,5	0,03
Manisa-Turgutlu	30,0	1,0	0,30
Uşak-Eşme	12,0	1,5	0,18
Toplam	106,5	0,82	0,88

8.2. Dünya'da Titanyum Rezervleri

Dünya metal titanyum rezervinin toplamı 820 milyar ton, görünür ve muhtemel rezerv toplamı ise 2 milyar tondur. Bunun yaklaşık %89'u ilmenit, %11'i ise rutildir (USGS, 2022). Avustralya ve Çin toplam ilmenit rezervlerinin %60'ına sahiptir. Dünya ilmenit ve rutil rezerv miktarları sırasıyla Tablo 30 ve 31'de verilmektedir.

Tablo 30. Dünya İlmenit Rezervleri (milyar ton) (USGS, 2022).

İlmenit	2017	2018	2019	2020	2021
Çin	840	2.100	2.300	2.800	3.000
Güney Afrika	550	765	1.100	1.020	1.000
Mozambik	600	575	590	965	970
Kanada	880	630	680	595	600
Avustralya	730	720	840	480	480
Norveç	220	236	400	444	440
Ukrayna	230	373	490	464	430
Senegal	300	297	310	300	360
Madagaskar	110	228	280	254	310
Vietnam	200	105	160	138	220
Kenya	280	272	210	201	190
Hindistan	300	319	162	174	180
ABD	100	100	100	100	100
Brezilya	50	66	25	34	66
Diğer Ülkeler	150	83	74	67	67
Toplam	7.557	8.887	9.740	10.056	10.434

Tablo 31. Dünya Rutil Rezervleri (milyar ton)

Rutil	2017	2018	2019	2020	2021
Avustralya	290	141	200	190	200
Sierra Leone	160	114	129	114	120
Ukrayna	95	94	94	95	95
Güney Afrika	95	103	110	86	90
Kenya	87	90	74	73	71
Hindistan	10	15	11	11	11
Senegal	10	9	9	9	10
Mozambik	9	8	6	6	9
Diğer Ülkeler	13	21	21	21	23
Toplam	769	595	654	605	629

8.3. Türkiye ve Dünya’da Titanyum Ticareti

Dünya titanyum cevheri pazarı 2,6 milyar ton’dur. En önemli ihracatçılar G. Afrika, Avustralya ve Mozambik’tir ve bu ülkeler toplam ihracatın yaklaşık %50’sini gerçekleştirmektedir. Türkiye yaklaşık 50.000 \$ ihracat ile 42. sıradadır. Dünya titanyum cevheri ithalatı oldukça homojen bir yapıya sahiptir. Türkiye 33 milyon \$’lık ithalat ile 15. sıradadır. Dünya titanyum metali pazarı 6,2 milyar \$’lık bir hacme sahiptir. ABD dünya ihracatının 1/3’ünü karşılamaktadır. Türkiye 34,2 milyar \$’lık ihracat ile 19. sıradadır.

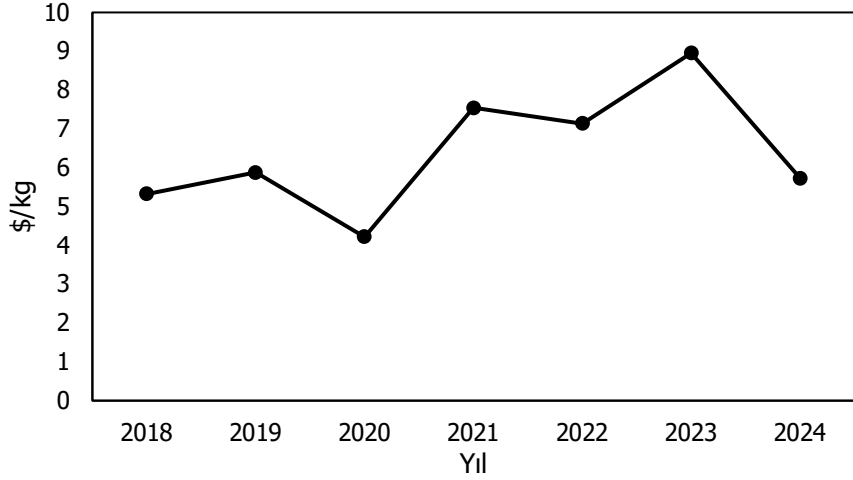
2019 ve 2020 arasında Titanyum cevherleri ve konsantrelerinin ihracatı 2,4 milyar \$’dan 2,39 milyar \$’a %-0,21 oranında azalarak düşmüştür. Titanyum cevherleri ve konsantreleri ticareti, toplam dünya ticaretinin %0,014’ünü temsil etmektedir.

Titanyum, toplam 4,7 milyar \$’lık ticaretle dünyanın en çok ticareti yapılan 499. ürünüdür. 2019 ve 2020 arasında Titanyum ihracatı %28,2 azalarak 6,54 milyar \$’dan 4,7 milyar \$’a düşmüş olup titanyum ticareti, toplam dünya ticaretinin %0,028’ini temsil etmektedir.

2019 ve 2020 arasında, Titanyum cevheri ihracatı en hızlı ABD (33,6 milyon \$), Norveç (23,8 milyon \$), Hindistan (21,7 milyon \$), Belçika (15,2 milyon \$) ve Vietnam’da (12,7 milyon \$) artmıştır. 2019 ve 2020 arasında en hızlı büyüyen Titanyum cevheri ithalatçıları, Meksika (49,3 milyon \$), Belçika (48,3 milyon \$), Çin (37 milyon \$), Malezya (30,8 milyon \$) ve Kanada (25 milyon \$) olarak sıralanmaktadır.

2021’de titanyum mineral konsantrelerinin yerel görünür tüketiminin, görünür tüketimin küresel COVID-19 pandemisi nedeniyle ekonomik aktivitedeki düşüşten etkilendiği 2020 yılına göre önemli ölçüde arttığı tahmin ediliyor. Titanyum mineral konsantrelerinin ihracatı, görünen tüketimle karşılaştırıldığında küçüktür.

2021’de Çin, küresel ilmenit üretiminin %37’sini oluşturan titanyum mineral konsantrelerinin lider üreticisi ve tüketicisi olmaya devam etmiştir. Mozambik ve Güney Afrika da titanyum mineral konsantrelerinin önde gelen üreticileridir. Çin’in titanyum mineral konsantreleri ithalatı, 2020 yılına kıyasla %21 artışla brüt ağırlık olarak yaklaşık 3,6 milyon ton olmuştur. Ekim ayı itibarıyla Mozambik (%32), Avustralya (%14), Vietnam (%13) ve Kenya (%9) Çin’e titanyum mineral konsantrelerinin önde gelen kaynakları olarak dikkat çekmektedir (IMIB, 2022). Yıllara göre titanyum fiyatları Şekil 11’de verilmektedir (Int. Kyn. 21).



Şekil 11. Yıllara göre titanyum fiyatları (Int.Kyn. 21).

8.4. Titanyum Kullanım Alanları

Sahip olduğu kendine özgü birçok özellikleri nedeniyle oldukça geniş kullanım alanına sahip olan titanyum metal ve alaşım halinde kullanılabilirken oksit formunda (TiO_2) pigment olarak kullanılmaktadır. Toplam üretimin sadece %6'sı titanyum metal endüstrisinde kullanılmaktadır.

Parlak ve grimsi bir geçiş metali olan titanyum Fe, Al, V ve Mo gibi elementler ile alaşım yapabilme özelliğine sahiptir. Ayrıca titanyum, çelik kadar dayanıklı, ancak ondan %45 daha hafiftir. Alüminyumdan ise %60 daha ağır olmasına karşın, 2 kat daha dayanıklıdır (Zhang vd., 2011).

Titanyumun en geniş kullanım alanı titanyum dioksit pigmenti şeklindedir. Titanyum oksit, şu anda bilinen en beyaz boya pigmentidir. Günümüzde dünyada üretilen titanyum cevherinin yaklaşık %91' i pigment endüstrisinde tüketilmektedir. Bunun dışında titanyum oksitler kozmetik endüstrisi, linolyum (muşamba), yapay ipek, beyaz mürekkep, renkli cam, seramik sırası, deri ve kumaş boyanması ve kağıt endüstrisi gibi pek çok alanda da kullanılmaktadır. Bu kadar çok kullanım alanları olmasına karşın, üretilen tüm titanyum oksit pigmentinin % 53'ü boya endüstrisi tarafından tüketilir.

Tablo 32'de, genel olarak dört ana pazar segmenti tanımlanmıştır; boyalar (fonksiyonel kaplamalar ve yapı ürünlerini içeren), plastikler, kağıt ve mürekkepler. Bunlar dünyadaki toplam TiO_2 pigment tüketiminin %90'ından fazlasını oluşturmaktadır. Bunlar aşağıda TiO_2 'nin "Toplu (kitle) uygulamaları" olarak tanımlanmakta olup, geri kalanlar "özel uygulamalar" altında gruplandırılmıştır.

Tablo 32. Son kullanım alanına göre TiO_2 pigment tüketimi dağılımı.

Sektör	Kullanım Oranı
Boya	% 53 (inşaat ve yapıda % 36; endüstride % 17)
Plastik	% 25
Kağıt	Laminat (% 10 ve kağıt % 2)
Mürekkep	% 4
Özel Uygulamalar	Gıda, Eczacılık vb., %1; Katalizör: %1; diğer (kozmetik gibi): %4

8.5. Titanyum Cevherlerinin Zenginleştirilmesi

Titanyum minerallerinin zenginleştirilmesi ve kazanılmasında uygulanan başlıca cevher hazırlama yöntemleri; gravite zenginleştirme, elektrostatik zenginleştirme, manyetik zenginleştirme, flotasyon ve kimyasal zenginleştirme.

Mineral tanelerinin aralarındaki özgül ağırlık farkından yararlanılarak, akışkan ortamdaki hareket farklılığına dayanarak birbirlerinden ayrılması ile gerçekleştirilen zenginleştirmeye gravite zenginleştirme denir. Titanyum minerallerinin gravite yöntemleri ile zenginleştirilmesinde çoğunlukla spiraller, sarsıntılı masalar, daralan oluklar, jigler ve MGS (Multi Gravity Separator) kullanılmaktadır (Terzi, 2012). Gravite zenginleştirmesine tabi tutularak elde edilen ağır mineral konsantresi kurutulduktan sonra elektrostatik ayırmaya tabi tutulur. Bu ayırma yöntemiyle, iletken özelliğe sahip rutil,

manyetit ve ilmenit, iletken özellik göstermeyen zirkon, monazit, silikat ve garnetten ayrılır (Terzi, 2012). Elektrostatik ayırma ile elde edilen rutil-ilmenit-manyetit içeren konsantreye uygulanan manyetik ayırma sonucunda ferromanyetik özellik gösteren manyetit, orta derecede manyetik özelliğe sahip olan ilmenit ve çok zayıf manyetik özellik gösteren rutilden ayrılır. Rutil-ilmenit konsantresine uygulanacak ikinci ve daha güçlü bir manyetik ayırmayla rutil ve ilmenit birbirinden ayrılır. Böylece saf olarak manyetit, ilmenit ve rutil konsantreleri ayrı ayrı elde edilmiş olur.

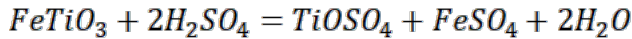
Rutilin zenginleştirilmesindeki en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olan flotasyon genel olarak “fiziksel adsorbsiyon” esasına dayanmaktadır. Rutilin sıfır yük noktası (zpc) 6,7’dir. pH: 6,7’nin üzerindeki pH değerlerinde ise rutil yüzeyi negatif yük taşımakta, bu durumda ise rutil flotasyonu katyonik kolektörler ile yapılabilir (Terzi, 2012).

Titanyum minerallerinin kimyasal zenginleştirilmesinde HCl, H₂SO₄ ve NaOH liçi yöntemleri uygulanmaktadır. Bu liç yöntemlerinin seçiminde titanyum cevherinin ve yantaşlarının cinsi önemli olmaktadır.

Titanyum dioksit pigment üretimi için; sülfat ve klorit prosesi olmak üzere iki farklı proses uygulanmaktadır. Dünya çapında ergitme prosesleri yoluyla üretilen tüm yüksek titan curufları bu iki prosesten birine besleme stoğu olarak kullanılmaktadırlar.

Sülfat prosesi, bir dizi şeklinde olup, çeşitli ünite işlemlerini içermektedir. Ana prosesin uygulama adımları şu şekildedir:

a) Prose beslenen titanifer malzeme sülfürik asit ile tepkimeye sokularak titanil sülfat üretilmektedir. Beslenen ürünün ilmenit olması durumunda gerçekleşen reaksiyon Denklem 1’de verilmiştir.



Denklem 1

Bu yüksek derecede ekzotermik reaksiyon, aynı zamanda çeşitli yan reaksiyonlar sonucunda hidrojen sülfid ve kükürt dioksit gibi kirleticilerin salınımına da yol açmaktadır. Demir sülfat çözüldüden katı halde ayrılmaktadır (FeSO₄.7H₂O).

b) Demir uzaklaştırıldıktan sonra titanil sülfat hidrolize edilerek titanyum dioksit hidrat üretilmektedir.

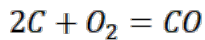
c) Daha sonra ise çöken kısım kimyasal olarak saflaştırılmakta, filtre edilmekte ve 800-1100 °C’de kalsine edilerek titanyum dioksit üretilmektedir.

Bu işlemlerden sonra TiO₂ ürünün bir pigment niteliği kazanması için bir dizi ek prosese ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar; tanelerin istenen boyutlara öğütülmesi ve pigment tanelerine gerekli optik ve fiziksel özellikleri kazanması amacıyla çeşitli kimyasallar eklenmesi aşamalarını içermektedir. Bu işlemler hem sülfat hem de klorit prosesleri ile üretilen pigmentler için benzer olmaktadır.

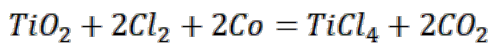
Sülfat prosesinin avantajları düşük sermaye yatırımı ve düşük enerji tüketimidir. Prosesin en büyük dezavantajı ise yüksek miktarlarda kirletici yan ürün oluşumuna neden olmasıdır.

Klorinasyon prosesi, sürekli bir proses olup bir akışkan yatak reaktöründe gerçekleştirilmektedir.

a) Titanyum besleme stoğuna klor gazı ve kok kullanılarak klorinasyon uygulanır ve çeşitli klorit türlerinin oluşumu sağlanır. Klorinasyon tepkimesi ekzotermiktir ve indirgeyici bir atmosfer altında yaklaşık 900 °C’de gerçekleştirilir. Bu aşamadaki temel tepkimeler Denklem 2 ve 3’de verilmiştir:



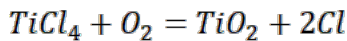
Denklem 2



Denklem 3

b) Uçucu klorit türleri fraksiyonel distilasyon yolu ile düşük, orta ve yüksek kaynar kloritlere ayrıştırılmaktadırlar.

c) Daha sonra titanyum tetraklorit aşağıdaki tepkimeye göre oksijen ile reaksiyona girmektedir (Denklem 4).



Denklem 4

Ticari ve çevresel sebepler dolayısıyla klorinasyon prosesi sülfat prosesine nazaran daha çok tercih edilmektedir. Dünya çapında üretilen titanyum dioksit pigmentlerinin yaklaşık olarak %57’si klorinasyon prosesi ile üretilmektedir. Klorinasyon prosesinin sermaye yatırımı sülfat prosesine nazaran 1,7 kat daha fazla olmakla birlikte prosesin yüksek kaliteli ürün elde edilmesi, daha çevre dostu bir proses olması ve daha düşük miktarlarda atık ürün oluşumuna neden olması gibi avantajları mevcuttur (Terzi, 2012).

9. SİLİSYUM

Silisyum, Li iyon pillerde anot malzemesi olan grafitte alternatif olarak kullanılabilen hali hazırda bazı pil tasarımlarında grafit ile karıştırılarak kullanılan malzemelerdendir. Atom numarası 14, atom ağırlığı 28,08553 g·mol⁻¹ ve yoğunluğu 2,33 g·cm⁻³ olan bir elementtir. Kuvars, kuvarsit ve kuvars kumu doğadaki silisyum kaynaklarıdır.

Kuvars: SiO₂ formülüne sahip olan silikat minerali kuvars mohs sertlik skalasına göre 7 sertlikte olup 2,65 g·cm⁻³ özgül ağırlığa sahiptir. Saf halde %46,5 Si ve %53,3 O₂ içeren kuvars minerali yer kabuğunda sık görülen minerallerdendir. Genellikle fay zonlarında, çatlaklarda, filonlarda ve cevher yataklarında gang minerali olarak bulunmaktadır. Doğal kuvars içerisinde katı eriyik halinde bulunan başlıca elementler; Li, Na, Al, Ti ve Mg'dur. Kuvars minerali ergime sıcaklığı çok yüksek olup, sadece hidroflorik asitte çözünür. Piezoelektrik ve piroelektrik özellikler gösterir (Int. Kyn. 22).

Kuvarsit: Kuvars taneli, silis çimentolu kumtaşlarına "kuvarsit" denir. Sedimanter ve metamorfik olmak üzere iki çeşidi vardır. Bileşiminde %95'den fazla SiO₂ bulunan kuvarsitlere "Ortokuvarsit" denir. Bu tür kuvarsitin doğal çimentosu çoğunlukla amorfür. Kuvarsitlerin metamorfizma geçirmesi durumunda çimento maddesi olan amorf kuvars tamamen kristalleşerek "Parakuvarsit" olarak adlandırılan ikinci tür kuvarsit meydana gelir (Tuğrul ve Avcı, 2023). Kuvarsitler, az miktarda feldspat, mika, manyetit, hematit, granat, rutil, kil vd. mineralleri içerebilir. Kuvarsitlerin sanayide endüstriyel hammadde olarak kullanılabilmesi için minimum %90 SiO₂ içermeleri gereklidir. Kuvarsit sert, sağlam ve aşındırıcı bir kayadır. Bu nedenle istihracı ve öğütülmesi oldukça güç ve pahalıdır. Bu sebeple kuvarsit üretimi, aynı kimyasal bileşimde bulunan kuvars kumu ve kumtaşından ayrıca daha saf olan kuvarstan sonra tercih edilmektedir (DPT, 2001).

Kuvars kumu: Kuvarsa zengin magmatik, metamorfik kayaların ayrışması sonucu oluşan 2 mm'den küçük kuvars partikülleridir. Silisten (SiO₂) oluşan kuvars kumu az miktarda kil, feldspat, demir oksitler, karbonatlar ihtiva edebilir. Doğada saf olarak buldukları gibi istenmeyen safsızlıklar ile karışmış olarak da bulunabilir. Kuvars kumları oluşumları açısından ikiye ayrılırlar. Birincisi allokton oluşum dediğimiz, kuvarsa zengin magmatik ve metamorfik kayaların ayrışmasından sonra serbest kalan kuvarsların taşınarak, killi gevşek bir çimento ile istiflenmesinden meydana gelir. İkincisi otokton oluşumdur. Bunlar silisçe zengin kayaların bir faylanma veya metamorfizmanın etkisiyle yerinde ayrışmasıyla meydana gelirler. Bu tip kuvars kumları allokton oluşumlara göre daha az impürite içerirler (DPT, 2001).

Silika yatakları genellikle magmatik ve metamorfik kayaların aşınmasından kaynaklanan kuvars parçacıklarından oluşur. Granüler kum ve/veya çakıl taşları başka bir yerde yeniden biriktirildikten sonra ya 1) zayıf biçimde konsolide olmuş kuvarslı kum ve çakıl olarak kalabilir ya da 2) kumtaşı veya kuvarsite dönüşecek şekilde sıkışabilir. Daha az yaygın olarak silika yatakları hidrotermal kuvars damarları halinde ortaya çıkar (Allard, 2008).

9.1. Türkiye'de Silisyum Madenleri

Dünya'da ve Türkiye'de kuvars, kuvarsit ve kuvars kumu rezervi için kesin bilgiler bulunmamakla beraber rezervlerin oldukça yaygın ve yüksek miktarlarda olduğu bilinmektedir. Türkiye'de bulunan yataklar ise Tablo 33'de verilmektedir.

Tablo 33. Türkiye'deki silisyum içeren bazı yataklar (DPT, 2018)

Konum	İçerik	Toplam rezerv*	
Kuvars	Aydın (Çine)	%78-98 SiO ₂	423 milyon ton (Görünür+Muhtemel)
	Aydın (Söke)		
	Adana (Feke)		
	Adana (Tufanbeyli)		
	Adana (Kozan)		
	Antalya (Gazipaşa)		
Kuvarsit	Kastamonu (Daday)	%90 üzerinde SiO ₂	7,6 milyar ton (Görünür+Muhtemel)
	Zonguldak (Kurucaşile)		
	Zonguldak (Eflani)		
	Zonguldak (Şapça)		
	Denizli (Merkez)		
	İstanbul (Şile)		
Kuvars kumu	İstanbul (Çatalca)	%90 üzerinde SiO ₂	1,88 milyar ton (Görünür+Muhtemel)
	Tekirdağ (Safaalan)		
	Sinop (Sarıkum)		
	Zonguldak (Kilimli)		
	Bartın		



Türkiye’de cam kalitesinde üretim İstanbul (Yalıköy) ve Kırklareli bölgelerinde Camiş Madencilik A.Ş. tarafından gerçekleştirilmektedir. Matel A.Ş. (Bilecik), ESAN A.Ş. (Bilecik) ve Kale Maden A.Ş. (Şile) ise seramik kalitesinde kuvars kumu üreten şirketlerdir. Döküm kalitesinde kuvars kumu üreten şirketlerin hepsi İstanbul’da olup Kumsan A.Ş., Çelikaş A.Ş., Erbatu A.Ş. olarak sıralanabilmektedir. Son olarak inşaat dolgu malzemesi olarak kuvars kumu üreten şirketler Trakya Silis Ltd. ve Marmara Silis A.Ş.’dir (DPT, 2001). Kaltun Madencilik A.Ş. ise cam, seramik, kompoze taş, boya, plastic gibi birçok sektöre çeşitli kalitelere kuvars tedariği sağlamaktadır. Türkiye kuvars, kuvarsit ve kuvars kumu üretim değerleri yıllara göre Tablo 34’te verilmektedir.

Tablo 34. 2018-2022 Türkiye silisyum üretim değerleri (Mapeg, 2023)

Yıllar	2018	2019	2020	2021	2022
Kuvars (1.000 ton)	1.525,2	1.899,2	2.150,0	1.537,2	2.030,2
Kuvarsit (1.000 ton)	10.035,0	8.395,8	9.770,9	9.700,2	12.595,9
Kuvars kumu (1.000 ton)	2.612,1	2.766,3	2.265,2	3.022,2	3.585,9

9.2. Dünya’da Silisyum Rezervleri

Kaliteli kuvars bakımından Brezilya, dünyada en büyük rezerve sahiptir. Bilinen yüksek saflıktaki kuvars rezervleri Brezilya, ABD, Namibya, Angola, Madagaskar, Çin ve Hindistan’da bulunmaktadır. Bu rezervler birincil ya da ikincil oluşumlar olup, devamlılık göstermezler. Bu tür kuvarslar elektronik sanayinde kullanılacak kadar iyi özelliktedir. Amorf veya kriptokristalin kuvars yatakları ise Arjantin, Avusturya, Belçika, Lüksemburg, Macaristan, Güney Afrika Cumhuriyeti, İspanya ve Norveç’te bulunmaktadır. Dünya kuvars rezervleri ile ilgili güvenilir kaynaklara bulunmamaktadır (DPT, 2001).

Tablo 35. Dünya’daki kum ve çakıl rezervleri ve üretimleri (ton) (USGS, 2021-2023)

Ülkeler	Üretim (ton)			
	2019	2020	2021	2022 ^t
ABD	114.000	70.000	74.600	97.000
Çin	-	-	87.700 ^t	88.000
Hollanda	54.000	54.000	54.000 ^t	54.000
İtalya	14.000	10.000	13.000 ^t	14.000
Hindistan	11.900	11.900	11.900 ^t	12.000
Fransa	9.310	11.000	11.000 ^t	12.000
Türkiye	9.100	10.300	11.200	11.000
Almanya	7.500	-	9.870 ^t	11.000
Bulgaristan	7.650	8.350	8.150 ^t	8.600
Rusya	-	-	7.300 ^t	7.300
İspanya	35.500	5.700	5.990 ^t	6.000
Polonya	5.110	5.490	5.180 ^t	5.500
İngiltere	4.000	4.400	5.300 ^t	5.300
Kanada	2.800	4.700	4.650	5.000
Malezya	10.000	3.700	3.900 ^t	4.500
Avustralya	3.000	3.000	4.000 ^t	4.000
Arjantin	-	2.500	3.600 ^t	3.900
Endonezya	5.540	2.640	3.540 ^t	3.500
Meksika	2.360	2.700	2.500 ^t	2.700
Güney Afrika	2.300	2.300	2.080 ^t	2.300
Japonya	2.270	1.920	-	-
Diğer ülkeler	24.770	20.370	23.200 ^t	25.000

t: tahmini, -: üretim verileri mevcut değildir.

En büyük rezerve sahip olan Brezilya yatakları çoğunlukla kristal kuvarstan oluşmaktadır. Kuvars kristalleri ve bunların birçok çeşidinin (ametist, pembe kuvars, rutil kuvars, sitrin ve dumanlı kuvars) ana kaynağı Brezilya'dır (Int. Kyn. 23). Bu nedenle USGS tarafından sağlanan kuvars kumu üretim listesinde yer almamaktadır.

9.3. Türkiye ve Dünya'da Silisyum Ticareti

2021'de dünyada kuvars kumu ihracatının başında Amerika (476 milyon \$), Avustralya (186 milyon \$), Belçika (114 milyon \$), Almanya (88,1 milyon \$) ve Mısır (55,8 milyon \$) gelirken kuvars kumu ithalatında önde gelen ülkeler Çin (238 milyon \$), Kanada (218 milyon \$), Japonya (114 milyon \$), İtalya (79,7 milyon \$) ve Tayvan (69,7 milyon \$)'dır (Int. Kyn. 20). 2021'de dünyada kuvars ihracatının başında ise Türkiye (282 milyon \$), Çin (270 milyon \$), Hindistan (215 milyon \$), Moğolistan (190 milyon \$) ve Meksika (129 milyon \$) gelirken kuvars ithalatında önde gelen ülkeler Amerika (271 milyon \$), Çin (251 milyon \$), İtalya (186 milyon \$), İspanya (113 milyon \$) ve Rusya (101 milyon \$)'dır (Int. Kyn. 24). Aralık 2023 tarihine kadar Türkiye için ürün bazında ithalat ihracat verileri Tablo 36'da verilmektedir. Türkiye'de kuvars ihracatı için ana destinasyon Amerika (27,3 milyon \$), İspanya (25,8 milyon \$), İsrail (18,7 milyon \$), İzlanda (12,5 milyon \$) ve İtalya (3,05 milyon \$) iken İtalya (90,6 bin \$), Almanya (83,1 bin \$), Hindistan (55,9 bin \$), İspanya (27,6 bin \$) ve Brezilya (14,4bin \$)'lık kuvars ithal etmektedir (Int. Kyn. 25).

Tablo 36. Ürün bazında Türkiye kuvars ithalat ve ihracat değerleri (TÜİK, 2023)

GTİP No	Ürün	İthalat		İhracat	
		Miktar (kg)	Değer (₺)	Miktar (kg)	Değer (₺)
25.06.10.00.00.11	Ham kuvars	37.704	534.989	489.941	2.643.271
25.06.20.00.00.11	Kuvarsit - ham ve kabaca yontulmuş	24.210	502.229	37.144.820	21.255.802
25.06.10.00.00.14	Mikromize kuvars; 10-20 mikron çaplı	182.618	1.450.637	1.120.850	3.417.442

Türkiye'de ise 2022 yılı ocak başı silisyum fiyatları aşağıda verilmektedir (Mapeg, 2022).

- Kuvars 300 ₺·ton⁻¹
- Kuvarsit 200 ₺·ton⁻¹
- Kuvars kumu 55 ₺·ton⁻¹

Dünyada kuvars üretimi yapan birçok firma bulunmaktadır. Tablo 37'de silisyum üretimini yapan birkaç şirket verilmektedir.

Tablo 37. Silisyum üretimi yapan bazı şirketler (Int. Kyn. 26)

Şirket	Ülke	Şirket	Ülke
U.S. Silica	Amerika	Pum Group	Malezya
Sibelco	Belçika	Badger Mining Corporation	Amerika
Covia Holdings LLC.	Amerika	Mitsubishi Chemical Corporation	Japonya
JFE Mineral&Alloy Company Ltd.	Japonya	Preffered Sands	Japonya
Quarzwerke GmbH	Almanya	Aggregate Industries	İngiltere

9.4. Silisyum Kullanım Alanları

Kuvarsit sert, sağlam ve aşındırıcı, Wi değeri 13 civarında bir kayaç olup özellikle öğütülmesi zor ve öğütme maliyeti yüksektir. Bu nedenle olanaklar dahilinde kuvarsit yerine aynı kalitedeki kuvars ya da kuvars kumu kullanılmaktadır (Yıldız, 2014).

Kuvars, kuvarsit ve kuvars kumu cam, refrakter, döküm, seramik, kozmetik, elektrik, aşındırıcılar, boyalar vb. gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Silikanın birincil kullanım alanı hemen hemen her tür cam eşya, seramik ve seramik sırların üretimidir. Diğer başlıca kullanım alanları ise metalurji (silikanın refrakter, döküm kalıbı, flaks ve silikon metal, ferro-silikon ve diğer ferro-alaşımın üretimi için silikon kaynağı olarak kullanıldığı), silisyum karbür üretimi, kimya ve inşaat sektörleri ve doğal aşındırıcıdır. Piezoelektrik özellikleriyle bilinen yüksek kaliteli kuvars kristali elektronik

cihazlarda, çoklu telefon hatlarında, derinlik ölçen cihazlarda, mesafe ölçerlerde, kronometrelerde vb. kullanılır (Bhavan, 2015).

Kum ayrıca yanmaz bir malzeme olarak, madenlerde kum istifleme için, ses yalıtım malzemesi ve dolgu maddesi olarak kullanılır. Silis kumu ayrıca petrol ve gaz içeren oluşumların geçirgenliğini korumak veya artırmak için kullanılır; aside dayanıklı çimentolarda, macunlarda, boyalarda, epoksi ve polyester reçinelerde dolgu maddesi olarak uygulanması kaçınılmazdır. Ayrıca, bahçecilikte, filtrasyon ortamı olarak ve süs amaçlı olarak da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Silika unu plastik ve kauçuk ürünlerde dolgu maddesi olarak kullanılır (Bhavan, 2015).

Son zamanlarda yapılan çalışmalar kapsamında ise kuvarsın yeni kullanım alanı olarak Li iyon pilleri karşımıza çıkmaktadır. Anot aktif malzemesi olarak istenilen silisyumun metalik nano boyutlu partiküller olarak kullanılmasıdır. Si metali üretimi ve oksitlenmesinden korunmasının üretim ve depolama esnasında oldukça zor olması ve anot olarak kullanıldığında ise pil çalışırken oluşan Li ve Si bileşikleri nedeniyle anot hacminin %200-300 oranında artması nedeniyle grafit toza ek olarak katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Silika yani stokiometrik SiO₂, Li ile reaksiyona girmez ve Li ikincil piller için anot malzemesi olarak kullanılamaz. Ancak, son yıllarda stokiometrik olmayan SiOx ler üzerine çalışmalar sürmektedir (Chang vd., 2012).

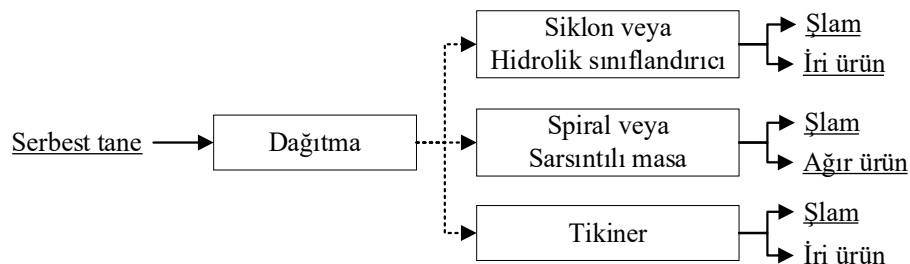
9.5. Silisyum Cevherlerinin Zenginleştirilmesi

Silisyum metalinin üretimi için gerekli kuvars kumunun zenginleştirilmesi birçok yöntemin bir arada kullanılması ile gerçekleştirilmektedir. Kuvars kumunun zenginleştirilmesinde fiziksel, fiziko-kimyasal ve kimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Kuvars kumunun içerdiği rutil, ilmenit, zirkon, monazit ve feldspat gibi safsızlıklardan ötürü özgül ağırlık farkına göre ayırma, manyetik ayırma, elektrostatik ayırma, dağıtma ve sınıflandırma ile ayırma gibi yöntemler kullanılabilir. Kuvars kumu içerisinde bulunan gang minerallerinin fiziksel özellikleri Tablo 38'de verilmektedir.

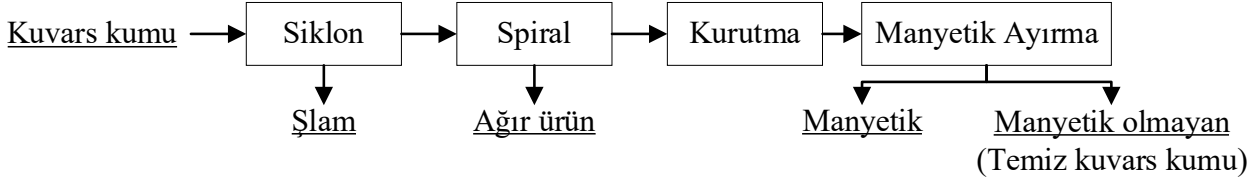
Tablo 38. Kuvars kumunda bulunan gang minerallerinin fiziksel özellikleri

Mineral	Kimyasal formülü	Renk	Özgül ağırlığı, (g.cm ⁻³)	Manyetik duyarlılık	Elektrik iletkenliği
Kuvars	SiO ₂	Beyaz	2,65	-0,2 Diamanyetik	Yalıtkan
Rutil	TiO ₂	Kahverengi	4,2	2,0 Paramanyetik	İletken
İlmenit	FeTiO ₃	Siyah	4,75	162,0 Paramanyetik	İletken
Zirkon	ZrTiO ₂	Beyaz	4,7	-0,3 Diamanyetik	Yalıtkan
Monazit	(La, Ce, Th) PO ₄	Kırmızı- Kahverengi	5,1	15,0 Paramanyetik	Yalıtkan
Feldspat	(K, Na, Ca) Al ₍₁₋₂₎ Si ₍₃₋₂₎ O ₈	Beyaz-Gri- Pembe vs.	2,5-2,7	Diamanyetik	Yalıtkan

Hafif bir mineral olan kuvars sınıflandırma ve özgül ağırlık farkından yararlanılarak gang minerallerinden ayrılabilir. Şlam olarak nitelendirilen ince boyutlu kil mineralleri dağıtma ve sınıflandırma ile kuvars yüzeyinden ayrılarak zenginleştirilmesi sağlanabilmektedir. Kuvars kumu içerisinde bulunan manyetik özelliğe sahip hematit, manyetit, ilmenit gibi mineraller ise özgül ağırlık farkına dayanan yöntemler ve manyetik ayırma yöntemi kullanılarak kuvars mineralinden ayrılabilir. Bu iki yöntem için önerilen akış şemaları sırasıya Şekil 12 ve Şekil 13'de verilmektedir.



Şekil 12. Şlam atarak kuvars zenginleştirilmesi (Yıldız, 2014)



Şekil 13. Kuvars kumunun demir minerallerinden arındırılması (Yıldız, 2014)

Kuvars çeşitli metalik minerallerin yanında gang minerali olarak bulunmakla beraber çeşitli endüstriyel mineraller içeren yataklar da bulunmaktadır. Bu tarz yataklarda kuvars flotasyon yöntemi kullanılarak zenginleştirilmektedir. Kuvars, silika tetrahedronundaki dört oksijenin kovalent bağlarla silisler arasında paylaşılması ile üç boyutlu kafes yapısı göstermektedir. Saf kuvars anyonik kollektörler kullanılarak yüzdürülemez. Kuvarı canlandırmak için kalsiyum, baryum, demir, kurşun, bakır, alüminyum vs. tuzları kullanılmaktadır. Metal iyonlarının hidrolizi ile oluşan metal-hidroksit iyonları kuvarı canlandırır ve sabun, ksantat veya sülfonat gibi anyonik iyonlar kullanılarak kuvars yüzdürülebilmektedir. pH'ın yükselmesiyle metal iyonları nötr hidroksit bileşiği oluşturduğundan belirli pH değerinin üzerinde kuvarın canlandırılması mümkün değildir. pH değerinin yüksek olduğu (pH:8-10,5) durumlarda ise kuvars katyonik kollektörler kullanılarak yüzdürülebilmektedir. Ters flotasyon yapmak istendiğinde ise kuvarı bastırmak için ise H_2SO_4 , Na_2SiO_3 ve HF kullanılabilir (Atak, 2017).

Kuvars kumlarının zenginleştirilmesinde kimyasal bağlarla bağlanmış ve mineral kafesi içinde yer alan yeterince serbestleşmemiş safsızlıkların giderilmesinde fiziksel ve fiziko-kimyasal yöntemler etkili olmamaktadır. Bu nedenle yüksek saflıkta kuvars üretmek için liç gibi çeşitli asit ve alkali çözeltilerin kullanıldığı kimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Kimyasal zenginleştirme yönteminde silis kumu sulu bir ortamda uygun çözücü kimyasal ile muamele edilir ve demir bileşikleri çözeltiye alınır. Katı-sıvı ayrımı yapıldıktan sonra saf kuvars kumu elde edilmektedir. Bazı liç uygulamalarında ise ağır metaller aktif karbon ile adsorbe edilir ve sonrasında sınıflandırma işlemi ile temiz kuvars konsantresi elde edilmektedir (Hacıfazlıoğlu, 2011).

Silisyumun Li iyon bataryalarında kullanılması için metal formunda (Si) olması gerekmektedir. Cevher hazırlama işlemleri kullanılarak elde edilen ürün ise silisyum dioksit (SiO_2) formundadır. Bu durumda metalurjik işlemler kullanılarak SiO_2 'nin indirgenmesi gerekmektedir. İndirgenme için magnezyotermik indirgenmesi, magnezyum öğütme indirgenmesi ve erimiş tuz indirgenmesi reaksiyonları ile Si metali haline dönüştürülebilmektedir. Bu reaksiyonların yanı sıra yeni bir yöntem olarak elektrokimyasal indirgenme (ECR) prosesi de kullanılabilir.

Magnezyotermik indirgenme reaksiyonunda (MRR), düşük reaksiyon sıcaklığında (500-900 °C) magnezyum (Mg) buharı ile silisyum oksitin tepkimeye girmesiyle katı formda magnezya (MgO) ve Si oluşur. Oluşan MgO çözündürülerek sistemden ayrılırken Si metali elde edilir. Magnezyotermik indirgenme yönteminin basınç kontrolünün zor olmasından dolayı bir diğer indirgenme yöntemi olan magnezyum öğütme indirgenmesi (MMR) geliştirilmiştir. Bu proseste öğütme hücresinin içerisine SiO_2 partikülleri ve Mg tozu tekrar tekrar katılarak malzemenin öğütülmesi sağlanmıştır. Öğütme ilerledikçe, öğütme bilyalarından sürekli olarak aktarılan kinetik enerjinin tetiklediği artan "aktif" arayüzler ve kafes kusurları, öğütme ünitesi içindeki sıcaklığın artmasını neden olur. Reaksiyon aktivasyon bariyerinin üstesinden gelebilecek belirli bir kritik noktaya ulaşıldığında, indirgenme kendiliğinden başlamaktadır. Erimiş tuz indirgenmesi (MSR), 200-900 °C'lik düşük sıcaklık bölgesinde bulunan, inert kimyasal karaktere sahip ve düşük maliyetli alkali veya toprak alkali metal klorürler gibi klorür tuzlarını kullanarak SiO_2 'nin indirgenmesini gerçekleştirir. Klorür tuzları çözündürülerek iyonlaşmış forma getirildikten sonra SiO_2 ile tepkimeye girer. Bu çözünmüş elektronlar güçlü indirgenme gücüne sahiptir. SiO_2 yüzeyinde adsorbe olabilir ve Si-O bağı kırarak tam indirgenme gerçekleştirebilir. SiO_2 , alkali (Na, K) veya toprak alkali (Ca, Mg) metallerin çoğu tarafından Si'ye indirgenebilir (Zhu vd., 2019).

10. ALÜMİNYUM

Alüminyum, Li iyon bataryalarda alüminyum folyo olarak katot aktif malzemenin iletken taşıyıcısı olarak kullanılır. Bazı katot aktif malzemelerin içeriğinde de yer alır (ör: NCA, Nikel Kobalt Alüminyum katotlar). Alüminyumun atom numarası 13 olup, yoğunluğu ise $2,70 \text{ g-cm}^{-3}$ 'tür. Rengi gümüş olan hafif bir metaldir, simgesi ise Al olarak gösterilmektedir. Alüminyum, yerkabuğunda bulunma sıklığı açısından en çok bulunan elementlerden biri olup, oksijen ve silisyumdan sonra gelmektedir (Eroğlu ve Şahiner, 2018). Ergime noktası $660,323 \text{ °C}$ olup, kaynama noktası ise 2.519 °C 'dir. Atom kütlesi ise $26,98$ 'dir (Int. Kyn. 27). Metal alüminyum üretimi için başlıca iki kaynak mevcut olup bunlar, birincil olarak boksit cevherlerinden alüminyum üretimi, ikincil olarak da hurdalardan geri dönüşüm ile kazanılan alüminyum

üretimidir. Tuvenan boksit cevherinin %30-60 arasından alüminyum içermesi halinde işletilebilir ve ekonomik cevher olarak nitelendirilmektedir. Dünyada bulunan boksit rezervlerinin yaklaşık olarak %90'ı alüminyum eldesinde kullanılmakta iken, geri kalanı da kimya, refrakter, aşındırıcı ve çimento sanayinde kullanılmaktadır (Eroğlu ve Şahiner, 2018). Alüminyum üretim geçmişine bakıldığında ise, 1886'da yılında elektroliz yönteminin kullanılmaya başlaması ilse ilk kez endüstriyel anlamda alüminyum üretimi yapılmıştır. Başlangıçta, elektrik kabloları ve ev dekorasyonlarında kullanılmakta ve daha sonrasında ise 2. Dünya Savaşı döneminde, savaş esnasında uçaklarda kullanılmıştır. Ardından, alüminyumdan üretilen sac ve levhalar inşaat sanayinde 1960'larda, 1970 ve 1980'lerde ise Amerika Birleşik Devletleri'nde kutu üretiminin başlamasıyla alüminyumda olan talep gittikçe artmıştır. Bunun yanı sıra, bakır, çelik ve dökme demirin kullanıldığı araba sektöründe, petrol sorunları sebebiyle hafif araba üretime yönelim artmış ve dolayısıyla da alüminyum bu hammaddelerin yerini almıştır.

Alüminyuma yüksek talep olmasının başlıca sebepleri, diğer metallerden daha hafif olması, mukavemeti, korozyon direncinin yüksek olması, yüksek termal ve elektrik iletkenliği, kolay şekil alabilmesi ve ısıtma işlemlerinin uygulanabilirliğidir. Bu özelliklere sahip olması sebebiyle de inşaat, otomotiv, ambalaj, savunma sanayi, boya ve taşımacılık gibi birçok alanda talep gören bir hammadde haline gelmiştir. Bu özellikleri göz önüne alındığında, demir-çelikten sonra en çok kullanılan metal olmuştur. Üretimine cevherden yapılması halinde kullanılan cevher tipi boksit cevherleridir. Boksit cevherlerinden alüminyum üretiminin yapılabilmesi için birçok yöntem mevcut olsa da en yaygın olarak kullanılan yöntem, Carl Bayer tarafından sunulmuş Bayer metodudur. Bu proses iki aşama içermekle birlikte, birinci aşama cevherden alümina (Al_2O_3) üretimi olup, ikinci aşama ise alüminadan elektroliz yöntemi ile alüminyum metalinin üretilmesidir. Bu yöntem ile 4 ton boksitin prosese beslenmesi halinde 2 ton alümina, üretilen 2 ton alüminadan da 1 ton alüminyum üretimi yapılmakla birlikte, beslenen malzemenin yaklaşık çeyreği kadar bir alüminyum metal üretimi yapılmaktadır. Yaygın olarak alüminyum metalinin üretiminin hurdalardan geri dönüşüm ile yapılması ile büyük oranda enerji maliyeti düşürülmektedir. Cevherden üretimin yapıldığı proses esnasında %40 olan enerji maliyeti, hurdalardan geri dönüşüm ile kazanılması halinde %5'e düşmektedir. Bu sebeple de ikincil alüminyum üretimine olan talep artmaktadır (Eroğlu ve Şahiner, 2018). Alüminyum üretiminin yapılacağı boksit yataklarının rezerv miktarının USGS (2022) raporuna göre, 55 ile 75 milyar ton arasında olduğu belirtilmektedir. Türkiye'de ise, geneli Toros kuşağı içinde olan toplam rezerv miktarı 422 milyon ton olup, bu miktarın 63 milyon tonu işletilebilir rezervdir. En zengin ve yüksek tenörlü boksit yatakları ise, Konya'da bulunan Seydişehir ve Antalya'da bulunan Akseki olmakla birlikte işletilebilir rezerv 31 milyon tondur (Eroğlu ve Şahiner, 2018). Boksit yatakları genel olarak, tropikal ve subtropikal iklimde olan lateritleşme sonucunda oluşmaktadır. Oluşum şekillerine göre, içerdikleri minerallere göre üç gruba ayrılmaktadırlar (Eroğlu ve Şahiner, 2018).

A. Oluşum şekillerine göre sınıflandırma

Lateritik/Silikatlı Boksitler: Çoğunlukla alüminyum bakımından zengin silikat kayaların aşınması ve yıkanması sonucu oluşmaktadır. Yağışlı, sıcak, tropikal iklimler, geçirgenliği ve tektonik duyarlılığı olan kayaçlar en elverişli ortamlar olmaktadır. Diğer elementlerin yüzey akıntıları ile yıkanması alüminyumca zengin bir kayaç olmasını sağlamaktadır.

Karstik Boksitler: Karstik boşluklarda kireçtaşı ve dolomit ($CaMg(CO_3)_2$) gibi oluşmaktadır. Diğer ortamlarda alüminyum çözmüş olan asidik yüzey sularının kireçtaşlarında nötrleşerek alüminyumca zenginleşmiş olmasına neden olduğu bilinmektedir.

B. Mineralojik bileşiklerine göre boksitler

Mineralojik bileşiklerine göre boksitler üçe ayrılmaktadırlar; diyasporik boksitler ($\gamma-Al_2O_3 \cdot 3H_2O$), böhmitik boksitler ($\gamma-Al_2O_3 \cdot H_2O$) ve gibsitik ($\alpha-Al_2O_3 \cdot H_2O$) boksitlerdir. Jeolojik oluşumları olarak sırasıyla, Triyas kuşağı, Kretase kuşağı ve Eosen kuşağına aittirler. Tablo 39'da özellikleri verilmektedir (Gök, 2019).

Tablo 39. Mineralojik bileşiklerine göre boksitler ve özellikleri (Gök, 2019).

Özellik	Gipsit	Böhmit	Diyaspor
Bileşim	(α -Al ₂ O ₃ .H ₂ O)	(γ -Al ₂ O ₃ .H ₂ O)	(γ -Al ₂ O ₃ .3H ₂ O)
Yoğunluk (g/cm ³)	2,3-3,4	3,0-3,2	3,3-3,5
Mohs Sertliği	3,0-3,5	3,5-4,0	6,5-7
Kristal yapısı	Monoklinik	Ortorombik	Ortorombik
Renk	Toprak rengi, beyaz, gri	Kahverengi, kırmızı, gri	Beyaz, yeşil, sarı, leylak, kahverengi
Çizgi rengi	Beyaz	Beyaz	Beyaz
Kostik Çözünme sıcaklığı (°C)	>100	>250	>260
Çözünme basıncı (atm)	~8	~54	~60

C. Silis modülü ve demir içeriklerine göre boksitler

Al₂O₃/SiO₂ modül değerine göre ve Fe₂O₃ tenör değerine göre gruba ayrılmaktadırlar. Tablo 40'da modül değerine ve Fe₂O₃ içeriğine göre boksit cevherlerinin özellikleri verilmiştir (Gök, 2019).

Tablo 40. Silis modül değerine ve Fe₂O₃ içeriğine göre boksit cevherlerinin özellikleri

Modül Değeri	Cevher Tipi	Fe ₂ O ₃ içeriği	Cevher Tipi
Al ₂ O ₃ /SiO ₂ >20	Yüksekl alüminalı cevher	% Fe ₂ O ₃ >25	Çok demirli cevher
Al ₂ O ₃ /SiO ₂ :10-20	Alüminalı cevher	% Fe ₂ O ₃ : 10-25	Demirli cevher
Al ₂ O ₃ /SiO ₂ :4-10	Silisli Cevher	% Fe ₂ O ₃ <10	Az demirli cevher
Al ₂ O ₃ /SiO ₂ <4	Yüksek silisli cevher		

10.1. Türkiye'de Alüminyum Madenleri

MTA tarafından belirlenen toplam boksit rezervi 422 milyon ton olup, işletilebilir rezerv miktarı 63 milyon ton'dur. Türkiye'de bulunan boksit yatakları, dünya boksit yataklarının %0,4'üne karşılık gelmektedir. En önemli boksit yatakları Konya-Seydişehir ve Antalya-Akseki'de bulunmaktadır. Bu iki sahadaki toplam rezerv 36,5 milyon ton olup, işletilebilir rezerv miktarı ise 31 milyon ton olduğu yapılan araştırmalar tarafından belirlenmiştir. Bu rezervler dışında, Türkiye'de bulunan diğer rezervler ise, Milas-Muğla, Tufanbeyli-Saimbeyli, Karasu-Zonguldak, Isparta-Yalvaç, İslahiye-Payas, Bolkardağı ve Antalya-Alanya'da bulunmaktadır.

Tablo 41'de Türkiye'de bulunan görünür, muhtemel+mümkün, toplam ve işletilebilir rezerv miktarı ile bölgelerde bulunan boksit mineralinin bulunduğu cevher tipleri belirtilmektedir (Eroğlu ve Şahiner, 2018; Tutay, 2023; Gök, 2019).

Tablo 41. Türkiye'de bulunan görünür, muhtemel+mümkün, toplam ve işletilebilir rezerv miktarı ile bölgelerde bulunan boksit mineralinin bulunduğu cevher tipleri (ton) (Eroğlu ve Şahiner, 2018; Tutay, 2023; Gök, 2019).

Bölge	Görünür	Muhtemel+ Mümkün	Toplam	İşletilebilir	Cevher Tipi	Al ₂ O ₃ (%)
Seydişehir-Konya	35.251	1.253	36.504	31.000	Karstik, Lateritik, Böhmit	53-58
Muğla-Milas-Yatağan	9.400	11.200	20.600	17.500	Karstik Diyasporitik Böhmit	50-57
Tufanbeyli-Saimbeyli	5.500	6.000	11.500	9.800	Karstik, Diyasporit, Böhmit	50-52
Zonguldak-Kokaksu	5.900	3.400	9.300	5.000	Karstik, Diyasporit, Böhmit	44-56
Yalvaç-Şarkikaraağaç	0	115.600	115.600	0	Lateritik, Böhmit	35-41
İslahiye- Gaziantep	0	215.500	215.500	0	Karstik, Fe-Diyasporitik	25-68
Bolkardağı-Mersin	0	3.900	3.900	0	Lateritik ve karstik, Diyasporit, nadir böhmit	55-56
Alanya-Akseki	1.300	7.700	9.000	0	Karstik tip, Böhmit, Diyasporit	27-67
Toplam	57.351	364.553	421.904	63.300		



Muğla-Milas-Yatağan boksitleri, yüksek bir metamorfizmaya uğrayarak oluşmuş dijasporik boksitlerdir. Bu bölgede yapılan incelemeler sonucunda, yüksek oranda bulunan dijasporit haricinde, daha az miktarlarda hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), periklas (MgO), kuvars (SiO_2), kalsit ($CaCO_3$), korund (Al_2O_3), rutil (TiO_2) ve ilmenit ($FeTiO_3$) bulunmaktadır. Dijasporitler hematit ile iç içe oluşmuş submikroskopik hematit sebebiyle kırmızı renktedirler. Yatakta, bazı bölgelerde kristal halinde dijasporitlerin de varlığı incelenmiştir. Ana boksit mineralinden sonra, yatakta en fazla hematit ve hematitin içerisinde az miktarda manyetit bulunmaktadır. Al_2O_3 tenörü %55,8, SiO_2 içeriği ise %10,2'dir.

Isparta-Şarkikaraağaç boksit yataklarına bakıldığında ise, bölgedeki oluşumun mineralojik kökeni, kimyasal bileşimi ve oluşum yaşları arasında ilişki bulunmayan tabakalı bir cevher kuşağının olduğu görülmektedir. Alt tabaka genelde dolomitte oluşurken, üst tabaka demirli boksit cevherinden oluşmaktadır. Birincil boksit minerali dijasporit olup, hematit, böhmite, şamozit, kaolinit, pirokroit ve götite takip etmektedir. Lateritik bir yatak olup, %33,32 Al_2O_3 , %14,79 SiO_2 , %38,48 Fe_2O_3 ve %4,21 TiO_2 içermektedir.

Bolkardağı-Karaman Ayrancı ilçesinde bulunan boksit yatağında ise, başlıca boksit minerali dijasporitdir. Bununla birlikte, hematit, anataz, kaolinit, rutil, kalsit, muskovit, manyetit, kuvars, götüt, klorit, alüminyum hidroksit, gibsite, böhmite ve illit bulunmaktadır. Ortalama kimyasal içerikleri, %55 Al_2O_3 , %26 Fe_2O_3 , %3,5 SiO_2 ve %3,5 TiO_2 şeklindedir.

Bir başka boksit yatağı ise Kokaksu-Zonguldak'ta bulunmaktadır. Dolomitik kireçtaşları içinde bulunan boksitler kumtaşları ile örtünmüştür. Yatak içerisinde, çok miktarda dijaspor, böhmite, limonit, ve az miktarda ise, hematit, rutil, anataz ve kil mineralleri vardır. Yatakta, demir miktarının azaldığı bölgelerde kırmızı-kahverengi, sarımsı, yeşilimsi ve griye geçişli olduğu görülmektedir. Cevher, %54 Al_2O_3 , %24 Fe_2O_3 , %6 SiO_2 ve %2,3 TiO_2 içermektedir.

Hayat-Payas boksit yataklarında ise, killi kireçtaşları ve yaşlı kireçtaşlarının yataklanmış olduğu görülmektedir. Bu bölgedeki boksitler, hematit ve limonitten ötürü kahverengi ve kırmızı renge bürünmüşlerdir. En çok görülen boksit minerali dijasporitdir. Dijasporit ve demir mineralleri haricinde, az miktarda, kaolinit, böhmite, gibsite mevcuttur. Yatak, %7-35 Al_2O_3 , %13-25 SiO_2 ve %38 Fe_2O_3 içermektedir (Gök, 2019).

MTA'nın araştırmaları sonucu %50'den fazla Al içeriği olan Seydişehir-Akseki bölgeleri 2005 yılına kadar Etibank tarafından işletilmiş olup, 2005 yılından beri Cengiz Holding tarafından işletilmektedir. Tesiste, birincil alüminyum, külçe, ingot çeşitleri, alaşımli külçe, sıcak rulo, levha, şerit gibi ürünler üretilmektedir (Eroğlu ve Şahiner, 2018). Türkiye'de birincil kaynakların kullanılarak alüminyum üretimi yapan tek tesis Seydişehir-Konya'da bulunmaktadır. Daha öncelerde de, yeraltı ve açık ocak madencilği ile boksit cevherinin üretildiği Milas Boksit İşletmeleri faaliyetlerine son vermiştir. Seydişehir, 200.000 ton/yıl alümina üretim kapasitesine sahiptir. Alümina tesisinde beslenecek boksit miktarı maksimum yıllık 450.000 ton olmaktadır. Ancak normal kapasite 400.000 ton/yıl olarak belirtilmiştir. Tenör, modül vb. gibi parametrelere bağlı olarak bu miktar 500.000 ton/yıl'a da ulaşabilmektedir. 200.000 ton/yıl üretimin yapılması halinde, 120.000 ton sıvı alüminyuma, 80.000 tonu ise spot piyasalarda ve uzun vadeli sözleşmeler ile piyasaya sunulmaktadır (Gök, 2019).

ETİ Alüminyum'un verilerine göre, yılda 500.000 ton boksit cevheri işlenmekte olup, 340.000 ton nemli alüminyum hidroksit, 13.600 ton kuru alüminyum hidroksit üretimi yapılmaktadır. Ticari olarak Etifine olarak adlandırılan özel hidrat ürünün üretim miktarı 3.600 ton, Al_2O_3 üretimi 200.000 tondur. Ham alüminyum miktarı 105.000 ton, diğer döküm ürünlerinin üretim miktarı ise 150.243 ton şeklindedir.

Hali hazırda üretimin yapıldığı, Seydişehir-Konya'da bulunan boksit yatakları, Türkiye'nin en önemli boksit yatakları olup, karstik tipi boksit yataklarıdır. Bu bölgedeki yataklarda, böhmite, dijaspor, hematit, rutil, smektit, pirit, kuvars, kalsit, markazit ve götite bulunmaktadır. Renk, kahverengi ve kırmızı arasında değişmekte olan boksit mineralleri masif, oolitik ve pizolitik dokuludur. Bölgede iki yatak mevcut olup; bunlar, Doğankuzu ve Mortaş yatağıdır. Mortaş yatağı, ortalama %50 Al_2O_3 içermekte ve 5 milyon ton rezerv bulunmaktadır. Doğankuzu yatağı ise, Mortaş yatağının 2 km güneybatısında olup, yaklaşık %61 Al_2O_3 içermekte ve 15 milyon ton rezerv bu yatakta mevcuttur. Bölgede işletilen boksit cevherinin ortalama içeriği ise, %59 Al_2O_3 , %16 Fe_2O_3 , %8 SiO_2 , %2,5 TiO_2 ve %12 kızdırma kaybıdır. Mortaş boksitleri ve Doğankuzu boksitleri kıyaslandığında, Doğankuzu boksitlerinin Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O ve TiO_2 içeriklerinin daha yüksek olduğu ve buna karşılık, SiO_2 , CaO ve K_2O içeriklerinin ise daha düşük olduğu belirtilmektedir (Gök, 2019).

Diğer bölgelerde ise teknolojik ve ekonomik sebepler dolayısıyla günümüzde üretim yapılmamaktadır. Ancak Yalvaç bölgesinde bulunan düşük tenörlü dijasporitik boksitler Seydişehir bölgesindeki yataklara alternatif bir rezerv konumunda olabilmektedir.

Alüminyum kritik malzemeler listesine girmiş metaller arasında olup, ülkemizde metalik olarak cevherlerden üretilmektedir ve pek çok alüminyum üreticisi de yurt içi ve dışından sağladıkları alüminyum ingotları işleyerek alüminyum folyo üretimini gerçekleştirmektedir. Bu konu ile ilgili detaylı bilgi bu kitabın ilgili bölümünde verilecektir.

10.2. Dünya’da Alüminyum Rezervleri

USGS (2023) raporuna göre, dünya boksit rezervi 31 milyar ton olup tahmin edilen rezervin ise 55 ile 75 milyar ton arasında olduğu belirtilmektedir. Global rezerv dağılımına bakıldığında ise, %32 oranında Afrika’da, %23 oranında Avustralya’da, %21 oranında Güney Amerika ve Karayipler bölgesinde, %18 oranında Asya’da ve %6’lık kısım ise geri kalan bölgeleri kapsamaktadır. Tablo 42’de, dünya boksit rezervlerinin ülke bazındaki tablosu verilmektedir (USGS, 2023). Tablo 43’de ise, boksit üretiminde alümina üretiminde başı çeken ülkelerin yıllar bazında üretimleri verilmektedir (USGS, 2019; USGS, 2020; USGS, 2021; USGS, 2022; USGS,2023).

Tablo 42. Global boksit rezerv miktarları (USGS, 2019; USGS, 2020; USGS, 2021; USGS, 2022; USGS,2023).

Ülkeler	Rezerv (.10 ⁶ ton)	Ülkeler	Rezerv (.10 ⁶ ton)
ABD	0,02	İspanya	-
Almanya	-	Jamaika	2
Avustralya	5,1	Kanada	-
Birleşik Arap Emirlikleri	-	Kazakistan	0,16
Brezilya	2,7	Rusya	0,5
Çin	0,71	Suudi Arabistan	0,18
Endonezya	1	Ukrayna	-
Gine	7,4	Vietnam	5,8
Hindistan	0,66	Diğer	5,1
İrlanda	-		
Toplam	31		

-:üretim verileri mevcut değildir.

Tablo 43. Başlıca boksit üreticisi olan ülkelerin yıllar bazında üretim miktarları (.10⁶ ton)

Ülkeler	2017	2018	2019	2020	2021	2022 ^t
ABD	-	-	-	-	-	-
Almanya	-	-	-	-	-	-
Avustralya	87,9	86,4	105	104	103	100
Birleşik Arap Emirlikleri	-	-	-	-	-	-
Brezilya	38,5	29	34	31	33	33
Çin	70	79	70	92,7	90	90
Endonezya	2,9	11	17	20,8	21	21
Gine	46,2	57	67	86	86	86
Hindistan	22,9	23	23	20,2	17,4	17
İrlanda	-	-	-	-	-	-
İspanya	-	-	-	-	-	-
Jamaika	8,25	8,9	9	7,55	5,95	3,9
Kanada	-	-	-	-	-	-
Kazakistan	-	-	5,8	5	4,37	4,4
Rusya	5,52	5,65	5,5	5,5	5,68	5
Suudi Arabistan	-	3,89	4	4,4	4,78	4,8
Ukrayna	-	-	-	-	-	-
Vietnam	2,4	4,1	4	3,5	3,83	3,8
Diğer	24,5	17,5	12,9	10,5	9,33	8,9
Toplam	311	327,5	358,9	391	384	380

t: tahmini, -:üretim verileri mevcut değildir.

10.3. Türkiye ve Dünya’da Alüminyum ve Boksit Ticareti

Dünya boksit piyasasına bakıldığında, ön plana çıkan ürün elde edilen birincil alüminyum metalidir. Alışım halinde olmayan metal alüminyum, 2020 yılındaki ihracat değerine 76 ülke bazında bakıldığında 21 milyar \$, 2019 yılına bakıldığında ise bu değer 75 ülke bazında 19,3 milyar \$ olduğu görülmektedir. İthalat değeri ise, 2020 yılında 111 ülke bazında 24 milyar \$’a ulaşmıştır. Bu değer 2019 yılında 109 ülke bazında elde edilen değer ile aynı olmaktadır. 2020 yılına göre alüminyum metalinin ihracatını ve ithalatını en çok yapan ülkeler, % payları ve ihracat-ithalat değerleri Tablo 44’te verilmiştir (Int. Kyn. 28).

Tablo 44. 2020 yılına göre ham alüminyum ihracatını en çok yapan ülkeler, % payları ve ihracat değerleri (Int. Kyn. 28).

Ülkeler	İhracat payı (%)	İhracat değerleri (\$)	Ülkeler	İthalat Payı (%)	İthalat, değerleri (\$)
Kanada	16,3	3,47 milyar	ABD	14,8	3,60 milyar
Hindistan	15,5	3,30 milyar	Malezya	11,3	2,74 milyar
Rusya	13,6	2,89 milyar	Japonya	8,63	2,08 milyar
Avustralya	9,72	2,06 milyar	Çin	7,99	1,93 milyar
Malezya	6,47	1,37 milyar	Güney Kore	7,7	1,86 milyar

2022 yılının ikinci çeyreğinde, nem içermeyen boksit ithalatı 644.000 ton olup, birinci çeyreğe göre yaklaşık %13, 2021 yılının ikinci çeyreğine göre %12 ve 2020 yılının ikinci çeyreğine göre %23 daha az olduğu gözlemlenmiştir. Jamaika, 2022 yılının ikinci çeyreğine göre, nem içermeyen boksitin %99 oran ile neredeyse ana kaynağı olarak büyük bir paya sahip olmasıyla, Türkiye, Brezilya ve Sierra Leone da ihracat yapan önemli ülkeler arasında yer almaktadır. Türkiye’nin, alüminyum ithalatçısı konumunda olmasına karşın son yıllarda, özellikle de 2021 yılında ihracat değerleri yükselmiştir. (Int. Kyn. 29).

Tablo 45. Boksit ve Alüminanın özelliklerine bağlı olarak satış fiyatları Int. Kyn. 30; Int. Kyn. 31).

Ürün	Özellik	Fiyat (\$·ton ⁻¹)	Ürün	Özellik	Fiyat (\$·ton ⁻¹)
Boksit-Avustralya (CIF)	%48-51 Al, %7-12 Si	48	Boksit-Malezya (CIF)	%37-41 Al ₂ O ₃ %5-6 Si	44
Boksit-Çin-Henan	4,5<Al/Si<5,5 %60 Al	64,75	Alümina-Bayuquan-Çin	>%98,4 Al ₂ O ₃ <%0,06 SiO ₂ <%0,03 Fe ₂ O ₃	409,5
Boksit-Çin-Shanxi	4,5<Al/Si<5,5 %60 Al	63	Alümina-Guangxi-Çin	>%98,4 Al ₂ O ₃ <%0,06 SiO ₂ <%0,03 Fe ₂ O ₃	378,7
Boksit-Çin-Guangxi	5,5<Al/Si<6,5 %53 Al	44,45	Alümina-Guizhou-Çin	>%98,4 Al ₂ O ₃ <%0,06 SiO ₂ <%0,03 Fe ₂ O ₃	382,2
Boksit-Çin-Guizhou	5,5<Al/Si<6,5 %58 Al	50,4	Alümina-Henan-Çin	>%98,4 Al ₂ O ₃ <%0,06 SiO ₂ <%0,03 Fe ₂ O ₃	403,2
Boksit-Çin-Henan	6<Al/Si<7 %62 Al	81,2	Alümina-Lianyungang-Çin	>%98,4 Al ₂ O ₃ <%0,06 SiO ₂ <%0,03 Fe ₂ O ₃	407,4
Boksit-Çin-Shanxi	6<Al/Si<7 %62 Al	81,2	Alümina-Shandong-Çin	>%98,4 Al ₂ O ₃ <%0,06 SiO ₂ <%0,03 Fe ₂ O ₃	380,8
Boksit-Çin-Guangxi	6,5<Al/Si<7,5 %53 Al	51,1	Alümina-Shanxi-Çin	>%98,4 Al ₂ O ₃ <%0,06 SiO ₂ <%0,03 Fe ₂ O ₃	387,8
Boksit-Çin-Guizhou	6,5<Al/Si<7,5 %60 Al	66,5	Alümina-Avustralya (FOB)	>%98,4 Al ₂ O ₃ <%0,06 SiO ₂ <%0,03 Fe ₂ O ₃	316
Boksit-Gine (CIF)	%47-50 Al ₂ O ₃ %5-6 Si	71	Alümina (Ortalama satış fiyatı-Shandong, Henan, Shanxi, Guangxi, Guizhou)	>%98,4 Al ₂ O ₃ <%0,06 SiO ₂ <%0,03 Fe ₂ O ₃	389,48

Alümina ithalat miktarına bakıldığında ise, 2022 yılının ikinci çeyreğinde 484.000 ton olduğu ve bu değer 2022 yılının ilk çeyreğinde %9 daha fazla, 2021 yılının ikinci çeyreğinden %26 daha fazla ve 2020 yılının ikinci çeyreğinden ise %34 daha fazla olduğunu göstermektedir. 2022 yılının ikinci çeyreğine göre, alüminanın ithal edildiği ülkelerin başında %76 oranıyla Brezilya gelmekte iken, %5 oran ile İspanya, %4 oran ile Kanada ve %2 oran ile Jamaika takip eden ülkelerdir.

Alüminanın ihracat değerlerine bakıldığında ise 2022 yılının ikinci çeyreğinde 44.400 ton olduğu ve 2022 yılının ilk çeyreğinden, 2021 yılının ikinci çeyreğinden ve 2020 yılının ikinci çeyreğinden sırasıyla %9, %9 ve %23 oranında fazla olduğu görülmektedir. Alüminayı en çok ithal eden ülkelerin başında %39 ile Meksika ve onu %15 ile Kanada, %8 ile Çin ve %5'er oranları ile Belçika ve Fransa takip etmektedir (USGS, Mineral Industry Surveys, 2022).

2022 yılının Kasım ayında belirlenmiş boksit ve alüminyum fiyatları Tablo 45'de verilmiştir (Int. Kyn. 30; Int. Kyn.31).

%99,99 saflıktaki metal alüminyumun 2024-Şubat fiyatlandırmasına bakıldığında, 3.600-3.700 \$-ton⁻¹ iken; %99,996 saflıktaki metal alüminyumun fiyatı 3.750-3.860 \$-ton⁻¹'dur (Int. Kyn. 32).

10.4. Alüminyum Kullanım Alanları

Alüminyumun kullanım alanları çok geniş olmakla birlikte, endüstriyel anlamda yaygın olarak kullanılan çok önemli bir hammaddedir. Prosesler sonucunda elde edilen birçok çeşitte olup, hepsinin farklı kullanım alanları mevcuttur. ETİ Alüminyum'un Seydişehir'de yapmış olduğu üretim sonucunda ürünler, ham alüminyum, alüminyum hidroksit, alüminyum oksit, öğütülmüş alüminyum hidroksit, kuru alüminyum hidroksit, ince alüminyum hidroksit ve viskozitesi ayarlanmış alüminyum hidroksit olarak pazarlanmaktadır.

Ham alüminyum ikiye ayrılmakla birlikte, işlem ürünleri ve dökümhane ürünleri olarak sınıflandırılabilir. İşlem ürünleri içerisinde, yuvarlak ve yassı ingot üretimi yapılmaktadır. Yuvarlak ingot, ekstrüzyon teknolojisi ile alüminyum profil üretiminde hammadde olarak kullanılabilir. Yassı ingot ise, levha üretiminde hammadde olarak kullanılabilir. En önemli kullanım alanlarından biri ise, Li iyon pillerde katot malzemesi olarak kullanımınıdır. NCA pilleri olarak bilinen ve katot malzemesi LiNi_xCo_yAl_zO₂ bileşiğinden oluşan pillerde kullanılmaktadır. Li iyon pillerde alüminyum folyo katot elektrot folyosu olarak kullanılmaktadır.

10.5. Boksit'in Zenginleştirilmesi ve Alüminyum Kazanımı

Alüminyum, Hall-Héroult prosesi kullanılarak alüminadan elektrokimyasal olarak üretilmektedir. Alümina ise, Bayer prosesi kullanılarak boksit cevherinden elde edilmektedir. Alüminyumun elementel özellikleri çok detaylı tanımlanmış olup, hafifliği, düşük erime noktası, korozyon direnci, iyi termal ve elektrik iletkenliği ve yüksek yansıtıcılığı ile ön plana çıkmaktadır. Buna ek olarak, alüminyumun fiziksel özellikleri alaşımlama, mekanik işleme ve ısıl işlem yoluyla geliştirilebilir. Alüminyumun bu nedenle dünya çapında hafif, yüksek gerilme mukavemetli alaşımlarda (manganez, nikel, bakır, çinko ve diğer metalleri de içerebilir) yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Hind vd., 1999). Ekonomik bir şekilde Bayer prosesinin gerçekleştirilebilmesi için, cevherin silis modülünün (%Al₂O₃:%SiO₂), cevher tipine, teknik-ekonomik koşullara bağlı olarak, alt sınırının ortalama 7-8 olması gerekmektedir. Yüksek kalitede olan bir boksit cevherinde ise, bu değer, 10'un üzerindedir (Birinci ve Gök, 2018).

Boksit cevheri, alüminyum üretimi için en önemli ve temel kaynaktır. Boksit cevheri, jeolojik olarak, gipsit (Al(OH)₃), böhmite (γ-AlO(OH)) ve diasporit (α-AlO(OH)) gibi alüminyum bazlı mineraller ile hematit (Fe₂O₃), götit (FeO(OH)), kuvars (SiO₂), rutil:anataz (TiO₂) ve kaolinit (Al₂Si₂O₅(OH)₄) gibi yan minerallerden oluşmaktadır. Alüminyum cevherinden alümina kazanımı için Bayer prosesi, sinterlenmiş Bayer prosesi ve Pedersen prosesi olmak üzere üç temel yöntem bulunmaktadır. Bayer prosesi, hidrometalurjik bir proses olup, yüksek Al₂O₃:Fe₂O₃ oranı olan cevher tipine uygulanmaktadır. Yan ürün olarak kırmızı çamur üretilmektedir. Uygulanan liç prosesi, NaOH barındırmakta ve 150-250 °C sıcaklıklarda ve yüksek basınçta yapılmaktadır. Sinterlenmiş Bayer prosesi ise pirometalurjik ve hidrometalurjik proseslerin kombinasyonu ile yapılan bir prosestir, yüksek SiO₂ ve Fe₂O₃ içeriği olan cevher tipine uygulanmaktadır. Yan ürün olarak, kırmızı çamur ortaya çıkmaktadır. Bu prosesin, konvansiyonel Bayer prosesine göre olan farkı, NaOH'in daha yüksek konsantrasyonlarda kullanılması ve prosesin daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmesidir. Pirometalurjik bir proses ile kombinasyon olarak gerçekleştirilen bu yöntemin tabi olarak enerji tüketimi çok daha yüksek olmaktadır. Aynı zamanda, alümina üretimi esnasında her bir birim prosesinin de maliyeti konvansiyonel olana göre çok daha yüksek olmaktadır. Pederson prosesi ise, sinterlenmiş Bayer prosesi gibi pirometalurjik ve hidrometalurjik proseslerin kombinasyonu ile gerçekleştirilen bir prosestir. Bu prosesin uygulandığı cevher tipi, düşük Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içeriği olan cevher tipleri olmaktadır. Proses maliyetleri %30-50 oranında daha düşük iken, enerji tüketimi ise %10 oranında daha yüksektir (Kar vd., 2023). NaOH çözeltisinde tepkimeye girme sıcaklıkları ve basınçları, boksit cevheri tipine göre değişmektedir. Gipsitik boksitler, >100 °C sıcaklıkta, 3-7 atm basınçta, böhmitik boksitleri >200 °C sıcaklıkta, 28-40 atm basınçta iken, diaporik boksitler ise >240 °C sıcaklıkta ve 46-60 atm basınçta reaksiyona girebilmektedir (Gök, 2019).

İşlem sonucunda genellikle, %30-50 Fe₂O₃ ve %15-25 içeren kırmızı çamur atık olarak ortaya çıkmaktadır. Buna bağlı olarak, Bayer prosesinde kırmızı çamurun ortaya çıkması, cevherde bulunan demir ve alüminyum içeriklerinin doğrudan kaybına neden olmaktadır (Safarian ve Kolbeinsen, 2016).

Silis modülü 7-8'in altında olan yatak tiplerinden elde edilen boksit cevheri, yüksek silis içeriği sebebiyle direkt olarak Bayer prosesine tabi tutulamamaktadır. Cevher içerisinde silis içeriğinin düşürülmesi gerekmektedir. Çünkü aksi takdirde, kostik tüketimi çok fazla olacağından, proses ekonomik olamamaktadır. Bu nedenle, Bayer prosesinden önce, ön-desilikasyon olarak tanımlanmış, silisin uzaklaştırılması için uygulanabilecek prosesler bütününün yapılması ekonomik bir üretim için gerekli olmaktadır. Bu amaçla, örneğin flotasyon prosesi, cevher içerisinde bulunan reaktif silis içeriğinin kaynağı olan silikatların uzaklaştırılması için kullanılabilir. Genel olarak, Bayer prosesi cevher hazırlama kademesiyle başlamakta ve bu aşamada, kırma-öğütme gibi boyut küçültme işlemleri, boyut kontrolünün sağlanmasında sınıflandırıcıların kullanımı ve silis içeriği yüksek ise, desilikasyon proseslerinin uygulanması ile başlamaktadır. Bu prosesin en kritik aşaması, cevherin kostik bir çözelti içerisinde yüksek basınç ve sıcaklıkta otoklavlar içerisinde çözündürme işlemi ve ardından da kırmızı çamurun atık olarak atılma kademesidir. Bu aşamada, boksit cevherindeki alümina, çözündürme işlemi ile sodyum alüminat (NaAlO₂) formuna geçtiği aşamada, çözeltinin belirli bir sıcaklıkta dengelenmesi, çözelti içerisinde reaktif silisin çözünmeyen sodyum-alüminyum silikat formuna dönüştürülmesi ve ardından da çöktürülmesi ile desilikasyon işlemi de sağlanabilmektedir. Bahsedilen desilikasyon amaçlı proseslerin gerçekleştirilmemesi halinde, dünyada en yaygın reaktif silis kaynağı olan kaolinitten (Al₂Si₂O₅(OH)₄) gelen silisin NaOH çözeltisi ile reaksiyona girme eğiliminin bulunması sebebiyle, reaksiyon sonucunda Na₂SiO₃ oluşmaktadır. Silis çözünürlüğüne etki eden temel faktörler, sıcaklık, NaOH konsantrasyonu ve alümina içeriği olduğu literatürde belirtilmiştir. Oluşan sodyum silikat, çözeltide çözünmüş formda bulunan sodyum alüminatlar ile reaksiyona girmekte ve az çözünme özelliği gösteren alüminosilikat türü oluşturmaktadır. Bu bileşiğin oluşumunda, kritik bir konsantrasyon değeri olup, kritiğin üstünde bir değer olduğunda, reaksiyon kendi kendine gerçekleşerek sodyum alüminyum silikat kompleks bileşiği oluşmakta ve alüminat çözeltisi içerisinde çökmektedir. Bu durum da ciddi bir alüminyum kaybına sebep olmaktadır. Bütün bunların yanında, daha önce de bahsedildiği gibi fazla kostik tüketimine sebep olmakta ve reaktif silika molü başına en az 1 mol NaOH tüketimine sebep olmaktadır. Reaktif silis içeriğinin fazla olması ile oluşan bir başka problem ise, sistemden tam anlamıyla uzaklaştırılamayan desilikasyon bileşiklerinin, buharlaştırma prosesi esnasında ünitenin iç yüzeyine çöküp birikmesi ile kabul oluşumu adı verilen, buharlaştırma prosesinde kullanılan bataryalara, çözeltinin iletiliminin yapıldığı borularda, vanalarda ve ünitelerin genelinde tıkanmalara sebep olarak olumsuz etkileyen bir teknik bir sorun oluşmaktadır. Son olarak, desilikasyon ile uzaklaştırılamayan ve kalsinasyon aşamasına kadar sisteme gelen silis bileşikleri nihai ürün olarak elde edilen alüminanın içerisinde safsızlıklara neden olmakta ve bu da prosesi olumsuz etkilemektedir. Bu sebepler dolayısıyla, desilikasyon prosesleri gerçekleştirilmelidir. Bu tanım genel bir başlık olup, birçok prosesin bütününü tanımlamakta ve boksit içerisindeki silisli minerallere yönelik cevher zenginleştirme proseslerini kapsar. Bu proseslerin birincil amacı, reaktif silis girdisini azaltmak doğrultusundadır. Bu prosesler, eleme-yıkama, gravite ile ayırma, manyetik ayırma, kullanımı olmamasına karşın biyoliç, seçimli flokülasyon, boksitin mekanik aktivasyonu, boksitin ön kalsinasyonu ve boksit flotasyonudur (Birinci ve Gök, 2018).

Boksit cevheri içerisinde alümina için kullanılan bir başka yöntem ise, Pederson prosesidir. Alümina üretimi için alternatif bir sürdürülebilir proses 1920'lerde Harald Pedersen tarafından patentlenmiş ve 1969 yılına kadar Norveç'in Høyanger kentinde ticarileştirilerek yılda 17.000 ton üretilmiştir. Bu süreçte, boksit cevheri akı olarak kireç ile ergitilir ve kok ile kısmen indirgenir. Görüldüğü gibi, demir oksitlerin metalik demire karbotermik indirgenmesi ve alümina ekstraksiyonu için hidrometalurjik olarak işlenen bir kalsiyum-alüminat curufu oluşumu nedeniyle pik demir elde edilir. Curuf, hacim genişletici faz değişimi nedeniyle soğutma sırasında parçalanır, daha sonra toz haline getirilir ve bir sodyum karbonat çözeltisi kullanılarak daha da sindirilir. Kalsiyum alüminat curuf bileşenleri ve sodyum karbonat, sodyum alüminat çözeltisi oluşumuna sebep olmaktadır.

Gri çamur olarak adlandırılan, çözünmeyen katı kısım, sınıflandırma adımında üretilen sodyum alüminat çözeltisinden ayrılmaktadır. Bu kalıntı çimento, gübre gibi alanlarda kullanılabilir. Alüminyum hidroksit çözeltiden çöktürülmesi karbondioksit enjeksiyonu vasıtasıyla gerçekleşmekte ve bu da liç adımı geri döndürülebilir sodyum karbonat çözeltisi olmaktadır. Çöktürülen Al(OH)₃ ise, alümina üretmek için kalsine edilmektedir.

Boksitten alümina üretimi için uygulanabilen bir başka proses ise, sinterleme prosesidir. Bu süreçte, boksitin yapısında bulunan Al₂O₃ ile 1.000 °C gibi yüksek sıcaklıklarda reaksiyona girmesi için Na₂CO₃ eklenmekte ve suda çözünebilir NaAlO₂ oluşmaktadır. Sinter üründe bulunan NaAlO₂ bileşiği su liçine tabi tutulmaktadır ve Al(OH)₃ çözeltiden CO₂ gazının çözeltiye beslenmesi ile çöktürülmektedir. Proses sonucu ortaya çıkan atık, demir ve alüminyum da içermektedir. Bu sebeple, metal kaybı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, boksit cevheri genellikle bir miktar SiO₂ içermekte ve



sinterleme aşamasında istenmeyen Na_2SiO_3 bileşiği oluşmaktadır. Sinterleme prosesinde kullanılan kireç ise, çözünmeyen kalsiyum silikat bileşikler oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır (Safarian ve Kolbeinsen, 2016).

Alüminadan alüminyuma geçiş ise Hall-Heroult prosesi olarak isimlendirilen ergimiş tuz elektrolizi ile gerçekleştirilmektedir. Burdan üretilen alüminyum daha sonra klasik yöntemde yassı kütükler halinde dökülüp önce sıcak sonra soğuk haddelenerek folyo üretimi gerçekleştirilmektedir. Bir diğer yöntem ise sürekli döküm tekniğidir. Bu teknolojiye sürekli olarak rulo halinde alüminyum dökümü yapıp sonrasında soğuk haddelene ile folyo üretimi yapılır.

11. FOSFAT

Fosfat, Li iyon pillerde LiFePO_4 katot aktif malzemesinin üretiminde kullanılmaktadır. Fosfat cevheri veya fosfat kayası, yeterli miktarda ve saflıkta fosfat içeren kayalara denir. Değişik fosfat ve gang minerallerinin karışımıdır. Doğada bulunan gang mineraline göre zenginleştirme işlemleri de değişmektedir. Yer kabuğunda %0,23 P_2O_5 fosfat bulunur (Keleş, 2008; Şengül, 2006). Periyodik tablonun 5. grubunda bulunan fosforun atom numarası 15, atom ağırlığı 30,97 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ 'dir. Oksijene çok düşük olduğu için litofil bir elementtir. Ek olarak, C, H, N ve O gibi canlı bünyelerin yapısal bileşenleri olması nedeniyle biyolojik olarak önemlidir. Bu nedenle, fosforik asidin tuzu ve esterleri doğada asla serbest halde bulunmaz. P^{5+} iyonu S^{6-} iyonundan daha büyük olduğundan, oksijenle tetrahedral bir anyonik grup oluşturur. (PO_4) iyonik grubu tetraederinde birbirleriyle oksijen paylaşmayan polarize olmayan bağımsız köklerdir. Fosfatlar bu iyon grubu tarafından oluşturulmuştur. Fosfatlar, bir, iki veya üç oksijenin bir tetrahedral PO_4 biriminde paylaştığı birkaç (PO_4) fosfat grubunun yoğunlaşmasının bir sonucu oluşur veya tetrahedral PO_4 biriminde anyonik yapı tuzlardır. Sınıflandırma, fosfat kayaçlarındaki P_2O_5 yüzdesinin değerine göre yapılır. Bu oran %4-42 arasındadır. Ancak %20'den fazla P_2O_5 içeren kayaçlar fosfat kayaçları olarak bilinir. Apatit, yer kabuğunda bulunan en önemli primer fosfat mineralidir (Keleş, 2008).

Fosfat içeren 200'e yakın mineral bulunurken, fosfat yatağı oluşturabilecek birçok mineral vardır. Monetit, whitlockite, brushite, variscite, crandallite, millisite, wavellite ve laranakite, apatit grubu mineralleridir. Trifillit grubu, Frandelit grubu ve diğer mineraller yatak oluşturamaz. Bu nedenle, fosfat minerallerini dört farklı gruba ayırmak mümkündür; Flor-Apatit, Klor- Apatit, Hidroksil- Apatit, Karbonat- Apatit Apatit Grubu Mineralleri: izomorf bir seri oluştururlar ve temel mineraller mevcuttur (Büyükkınacı, 1972). Önemli fosfat mineralleri Tablo 46'da verilmiştir.

Tablo 46. Önemli fosfat minerallerinin isimleri, kimyasal formülleri ve fosfat içerikleri (Şengül, 2006).

Mineral	Kimyasal Formülü	Fosfat (P_2O_5) İçeriği (%)
Flüor Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	38,13- 41,95
Klor Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$	40,50- 40,98
Hidroksil Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	42,20
Karbonat Apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{CO}_3$	36,63- 38,57
Monetit	CaHPO_4	52,28
Whitlockite	$\text{Ca}_9\text{FeH}_2\text{MgO}_{32}\text{P}_8$	45,68- 45,94
Brushite	$\text{CaHPO}_4\cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	41,24
Variscite	$\text{AlPO}_4\cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	44,92
Strengit	$\text{FePO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	32,98
Crandallite	$\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5\cdot (\text{H}_2\text{O})$	34,28
Millisite	$(\text{Na},\text{K})\text{CaAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_9\cdot 3(\text{H}_2\text{O})$	34,79
Wavellite	$\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH},\text{F})_3\cdot 5(\text{H}_2\text{O})$	33,68
Taranakite	$\text{K}_3\text{Al}_5(\text{HPO}_4)_6(\text{PO}_4)_2\cdot 18(\text{H}_2\text{O})$	42,30

Fosfat cevherindeki tenör oranı, fosfatın değerini belirleyen diğer içerdiği oksitlere göre tanımlanmaktadır. Bunlar:

1. Cevherin klor oranı %4,5 ve flor oranı %0,06'dan fazla olmamalıdır.
2. CO_2 , FeO ve Al_2O_3 'lerin toplam oranının %1,5'ini aşmamalıdır.
3. Nem miktarının %4'ü aşmaması gerekmektedir.

Bununla birlikte, fosfat cevherleri mineralojik bileşimlerine göre kalkertli, silisli, killi, glokonili ve demirli fosfat cevherleri olarak kategorize edilebilir (Şengül, 2006).

11.1. Türkiye’de Fosfat Madenleri

Ülkemizin de fosfat kayasına olan ilgisi 1960’lı yıllarda başlamış olup Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde önemli cevher yatakları mevcuttur. Bu bölge ayrıca Türkiye'nin fosfat rezervlerinin yaklaşık %98'ini içermektedir. Günümüzde bilinen en büyük cevher yatakları Mardin, Gaziantep, Antakya, Bingöl-Muş ve Bitlis'te bulunmaktadır. Ek olarak, birçok yerde ucuz olmayan fosfat kaynakları mevcuttur. Mardin-Mazıdağı, dünyadaki fosfat kayası yataklarının içerisinde flor içeriği en düşük olan yerdir. Bingöl'de, Genç-Avnik apatitli manyetit sahalarında 52 milyon ton görünür rezerv bulunmaktadır. Bu alandaki P_2O_5 tenörü %0,67-12,96 arasındadır. Ek olarak, Fe_2O_3 tenörü %0,2-52,54 arasında değişmektedir. Bu yatakların demir kullanılarak işletildiğinde ve zenginleştirme işlemlerine olumlu bir şekilde yanıt verdiği düşünülmektedir (Keleş, 2008; Şengül, 2006). Güneydoğu Anadolu Bölgesinde, magmatik, glaukonili ve denizel karbonatlı fosfat potansiyeli 400-500 milyon ton arasındadır. Türkiye'nin fosfat rezervleri 493 milyon ton olmakla birlikte, 220 milyon tonu görünür rezervdir. Potansiyel fosfat rezervleri 260 milyon tondur (Karademir, 2020). Ülkemizde, gübrenin ana maddelerinden biri olan fosfatın tamamına yakını Mazıdağı, Mardin bölgesinde yer almaktadır. Türkiye’de üretilen ve ithal edilen fosfatın tamamına yakın bölümü gübre sanayiinde tüketilmektedir. Fosfat'ın yerine ikame olacak herhangi bir madde bulunamadığından, özellikle sulanabilir tarım arazimizin artmasına paralel olarak fosfat tüketiminin önümüzdeki yıllarda artacağı kesin olarak söylenebilir. Deterjan, ilaç ve kimya sanayilerinde de çok az miktarda fosfat kullanılmaktadır.

11.2. Dünya’da Fosfat Rezervleri

Amerika Birleşik Devletleri, Rusya, Fas, Tunus, Cezayir, Ürdün, İsrail, Senegal, Togo, Goban, Güney Afrika, Hint Adaları ve Pasifik Adaları, dünyadaki en büyük fosfat yataklarıdır. Fosfat kayası üretiminin %77'i Okyanus Adaları, ABD, Rusya, Fas ve BDT (Orta Doğu ve Bağımsız Devlet Topluluğu) tarafından yapılmaktadır. Cevherin kimyasal özellikleri, dünyadaki fosfat kalitesini açıklayabilmek ve endüstriyel sahada tercih edebilmek için çok önemlidir. Rusya, Senegal, Sahra, Cezayir ve Fas, fosfat yataklarında P_2O_5 oranının en yüksek olduğu ülkelerdir (Şahin, 2017). Tablo 47’de, dünya fosfat rezervlerinin ülke bazında ve yıllar bazında üretim tablosu verilmektedir.

Tablo 47. Başlıca fosfat üretici olan ülkelerin yıllar bazında üretim miktarları (ton) (USGS, 2023)

Ülkeler	2021	2022	Rezerv
Fas	38.100	40.000	50.000.000
Mısır	5.000	5.000	2.800.000
Tunus	3.730	4.000	2.500.000
Cezayir	1.400	1.800	2.200.000
Çin	9.0000	85.000	1.900.000
Suudi Araistan	9.200	9.000	1.400.000
ABD	21.600	21.000	1.000.000
Ürdün	10000	10.000	1.000.000
Rusya	14.000	13.000	600.000
Toplam	193.030	188.800	62.000.000

11.3. Türkiye ve Dünya’da Fosfat Ticareti

TÜİK verilerine göre, endüstriyel hammaddeler arasında yer alan fosfatın 2019 yılında 26.000 ton ihraç edildiği ve 13.618 \$ gelir elde edildiği bildirilmektedir. Yine aynı yıl 1.031.130 ton ithal edilmiş ve 83,2 milyon \$ harcanmıştır. 2019’da maden ihracatının geçen yıla göre değişim miktarı %165,2, değeri ise -81,48 olmuştur (Karademir, 2020). Dünya fosfat pazarının büyüklüğü yaklaşık 3,3 milyar \$’dır (İMİB, 2020). Tablo 48’de dünya fosfat ihracatının ülkelere göre dağılımı ve miktarları verilmiştir.

Tablo 48. 2018 Dünya fosfat ihracatı (OEC, 2018)

Ülkeler	Miktar, (milyon \$)	Pay, (%)	Ülkeler	Miktar, (milyon \$)	Pay, (%)
Fas	1.319,64	40,55	Cezayir	83,39	2,56
Ürdün	511,31	15,71	Togo	82,52	2,54
Rusya	380,58	11,69	Çin	62,84	1,93
Peru	235,94	7,25	İsrail	62,49	1,92
Mısır	200,50	6,16	Türkiye	0,99	0,03
G. Afrika	98,08	3,01	Diğer	216,34	6,65
Toplam			3.254,62		

Fas, dünyanın toplam ihracatının yaklaşık %40'ından sorumludur. İhracat pazarında yoğunlaşma ve 6 kritik ülke var. Türkiye yaklaşık 1 milyar dolarlık ihracatıyla 32. sıradadır.

Fosfit ithalatı dünya çapında oldukça rekabetçi bir pazardır ve yoğunlaşma olasılığı yoktur. Endeks değerleri düşüktür. Türkiye yaklaşık 110 milyon \$ ithalatla 8. sırada yer almaktadır.

Fosfat gübre üretiminde kullanılan fosfat kayasının fiyatı, son yıllarda önemli bir artış göstererek 2022 yılında metrik ton başına 266 \$'a ulaşmış olup 2023 yılında metrik ton başına 321,66 \$'a kadar çıkmıştır (Int. Kyn. 33).

11.4. Fosfat Kullanım Alanları

Fosfat en yaygın olarak gübre sektöründe kullanılmakta olan bir ana hammaddedir. Trikalsik fosfat, az çözünen bir madde olmasına rağmen uzun süreli bir etkiye sahiptir. Bu maddenin daha hızlı bir etkiye sahip olması için süperfosfata dönüştürülür. Bu gübreyi elde etmek için aşırı derişik sülfürik asit doğal fosfatları etkiler. Bu, kalsiyum sülfat ve çözünen monokalsiyum fosfat $[Ca(H_2PO_4)_2]$ karışımının elde edilmesine neden olmaktadır. Fosfor giderme curufları, dökme demirin artırılması sırasında ortaya çıkan bir üründür ve bu da fosforlu gübrelerin hazırlanmasını sağlamaktadır. Birçok farklı fosfat türü, özellikle deterjanlarda ve bazı temizlik maddelerinde bulunmaktadır. Fosfor çeşitleri, suların işlenmesinde de kullanılmaktadır. Uranyum ve plütonyum nitratları elde etmek için bazı fosfat esterleri kullanılmaktadır. Fosfat kullanımı az olsa da yemler ve bazı gıda türlerinde kullanılabilir. Bunlarla birlikte, alaşım metalurjisi, savunma, ilaç, tıp ve kimya endüstrisi gibi diğer sektörlerde de kullanılmaktadır. Monometal fosfatlar, çeliği aşınmadan korumak için kullanılmaktadır (İMİB, 2020). Fosfor, petrol ve su gibi günümüz dünyasında çok stratejik yeraltı kaynakları olmuştur. Sanayi tesislerinde üretilen fosfat kayasının %50'si fosfat asidine dönüştürülmektedir. Bir kısmı ise elementel fosfora çevrilmektedir. Fosfat kayasının öğütülerek fosforik asit ile birleştirilmesi ile veya amonyakla muamele edilmesi ile yüksek kaliteli gübre üretilmektedir. Fosfor cevheri, dünyadaki kullanım alanlarının %90'ını oluşturan gübre (%90) ve kimya (%10) sanayilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fosfor kayaçları ayrıca tekstil, boya, temizlik malzemeleri, fotoğrafçılık, deterjan, yem, gıda, kağıt, kibrit ve su temizleme gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Fosfat kayasının çok sınırlı bir kısmı ise, öğütülerek doğrudan toprağa verilmektedir (Sınırkaya, 2008).

11.5. Fosfat Minerallerinin Zenginleştirilmesi

Fosfat kayasını zenginleştirmek için kullanılan yöntemler her yatak için farklı olmaktadır. Gang mineralinin özellikleri ve gang mineralinden ayrılacak cevher, fosforit olarak bilinen fosfatlı minerallerdir. Zenginleştirme yöntemi, bu fosfatlı minerallere göre belirlenmektedir. Cevherin zenginleştirilmesinde fosforitler çok önemli olmaktadır, çünkü mineralojik yapıları yatak tipine göre değişmektedir.

11.5.1. Siklonlarla, kuru veya yaş ayırma ile ince kısmın (şlam) atılması

Şlam, bir malzemenin veya cevherin su içinde asılı halde bulunan çok ince bir kısmıdır ve kil gibi steril veya az fosfatlıdır. Ayırma, yoğun bir karıştırma işleminin ardından hava ya da su akımının yardımıyla gerçekleştirilmektedir.

11.5.2. Flotasyon

Flotasyon, dünya çapında üretilen fosfat cevherinin büyük bir kısmının eldesi için kullanılan bir zenginleştirme yöntemidir. Bununla birlikte, fosfatın kuvarstan ayrılmasını sağlayan bu yöntem gangin karbonatlı olması durumunda kullanılamamaktadır. Bu yöntemde, ham cevher parçalanarak öğütülmekte, daha sonra ise yaş sınıflandırma veya eleme yoluyla boyut fraksiyonlarına ayrılması ile flotasyon prosesi uygulanmaktadır. Ters flotasyon, fosfat mineralinin

basırılması ve karbonatlı minerallerin yüzdürülmesiyle daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiş olup, dünya çapında ters flotasyon ile zenginleştirme uygulanmaktadır.

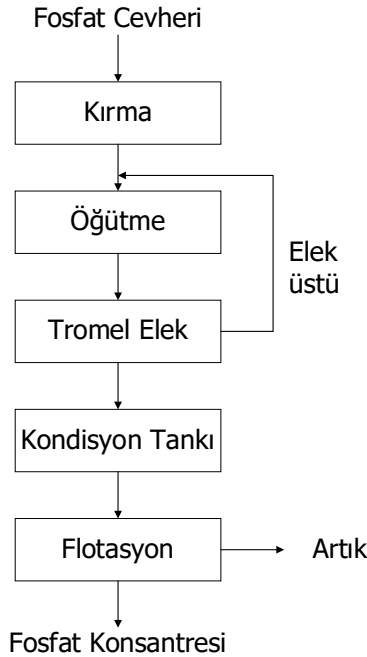
11.5.3. Özgül Ağırlık Farkına Göre Ayırma

Kuarsın $2,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, kalsitin $2,71 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ve dolomitin $2,85 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ özgül ağırlıkları vardır. Yapısına göre fosforitin özgül ağırlığı $2,8-3,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ arasındadır. Bu nedenle, özgül ağırlık farkına göre ayırma, uygun yapıya sahip cevherler için uygulanabilmektedir. Özgül ağırlık farkına göre ayırma yöntemlerinde, jig, sarsıntılı masa ve ağır ortamla ayırma kullanılabilir.

11.5.4. Tane Boyutuna Göre Ayırma

Cevherin petrografik özellikleri uygunsa, bu yöntem etkili olmaktadır. Bu işlem, genellikle elektrikli titreşimli elek veya hidrosiklonlar gibi ekipmanlar kullanılarak yapılmaktadır. Fosfat cevherlerinin tane boyutuna göre ayırma işlemine dair örnekler:

- **Öğütme:** Fosfatlı cevher madeni öğütülerek küçük parçalara ayrılmaktadır.
- **Eleme veya Sınıflandırma:** Öğütülen cevher, belirli bir tane boyutuna göre elek veya hidrosiklon gibi ekipmanlar kullanılarak sınıflandırılmaktadır. Farklı tane büyüklüklerine sahip fraksiyonlar elde edilmektedir.



Şekil 14. Genel zenginleştirme akış şeması (Ptáček, 2016)

- **Tane Boyutuna Göre Ayırma:** Elde edilen fraksiyonlar, belirli bir tane boyutu aralığına odaklanan işlemlerle ayırım yapılmaktadır. Bu aşama, genellikle özellikle belirli bir tane boyutuna sahip fosfat mineralini zenginleştirmeyi amaçlamaktadır.
- **Konsantre Elde Etme:** Tane boyutuna göre ayırma işleminden geçen boyut fraksiyonları daha sonra kurutma ve diğer işlemlerle zenginleştirilmiş fosfat konsantresine dönüştürülmektedir.

Bu yöntem, fosfat cevherlerinin içerdikleri mineral türlerinin tane boyutuna göre değişiklik gösterdiği durumlarda etkili olabilmektedir.

11.5.5. Manyetik Ayırma

Bu yöntem, cevher damarının işlemlenmeyen değersiz parçası olan demirli gang mineralini çıkarmak için kullanılmaktadır. Fosfat cevherlerinin manyetik ayırma ile zenginleştirilmesi, genellikle manyetik özelliklere sahip minerallerin ayıklanması amacıyla kullanılmaktadır. Fosfatlı cevherler genellikle apatit mineralini içerir ve bu mineral genellikle diğer minerallerden farklı manyetik özelliklere sahiptir. Manyetik ayırma süreci, bu farklı manyetik özellikleri kullanarak apatiti diğer minerallerden ayırmayı amaçlar.

Örnek olarak, bir fosfat cevherinin manyetik ayırma işlemi aşağıdaki adımları içerebilir:

- **Öğütme:** Fosfatlı cevher madeni öğütülerek küçük parçalara ayrılmaktadır.
- **Manyetik Ayırma Ünitesi:** Bu ünite genellikle bir manyetik tambur veya manyetik silindir içermektedir. Manyetik tambur, yüksek güçlü bir manyetik alan oluşturarak cevher içindeki manyetik mineralleri çeker. Apatit, genellikle diğer minerallerden daha fazla manyetik özellik göstermektedir.
- **Ayrıştırma:** Manyetik tambur tarafından çekilen mineraller, diğer minerallerden ayrılır. Apatit içeren manyetik fraksiyon, diğer fraksiyonlardan izole edilmektedir.
- **Manyetik Olmayan Kısım:** Manyetik özelliği olmayan diğer minerallerden oluşan kısım ayrılmaktadır.
- **Konsantre Üretimi:** Manyetik ayırma işleminden geçen apatit içeren kısım, daha sonra kurutma ve diğer işlemlerle zenginleştirilmiş fosfat konsantresine dönüştürülmektedir.

11.5.6. Elektrostatik Ayırma

Ayırma yöntemi, önce cevherin öğütülmesi, ardından kuru haldeki cevhere elektrik yüklemesi ve daha sonra elektriksel alanda elektriksel yüke tabi tutulmasıyla çalışır. Bu yöntem başarılı olmak için cevherin yıkanması, şlamın çıkarılması ve kurutulması gerekir. Fosfat cevherinden silisin ayrılması için bu yöntem uygundur.

Fosfat cevherlerinin elektrostatik ayırma işlemi için genel bir örnek:

- **Öğütme:** Fosfatlı cevher madeni öğütülerek küçük parçalara ayrılmaktadır.
- **Elektrostatik Ayırma Ünitesi:** Bu ünite genellikle bir elektrostatik tambur veya elektrostatik ayırıcı içermektedir. Elektrostatik tambur, cevher üzerindeki mineral partiküllerine bir yük uygulamaktadır.
- **Yük Uygulama:** Elektrostatik tambur, mineral partiküllerine bir elektrostatik yük uygulanmaktadır. Farklı mineraller, bu yük uygulamasına farklı tepkiler göstermektedir.
- **Ayırma:** Yüklü partiküller, elektrostatik alan içinde ayrılmaktadır. Fosfat minerali (genellikle apatit), diğer minerallerden ayrılmaktadır.
- **Yalıtkan Kısım:** Elektrostatik özelliği olmayan diğer minerallerden oluşan kısım ayrılmaktadır.
- **Konsantre Elde Etme:** Elektrostatik ayırma işleminden geçen apatit içeren fraksiyon, daha sonra kurutma ve diğer işlemlerle zenginleştirilmiş fosfat konsantresine dönüştürülmektedir.

Elektrostatik ayırma, özellikle apatit gibi mineral türlerinin zenginleştirilmesi için kullanılan etkili bir yöntemdir.

11.5.7. Kalsinasyon ve Yıkama

Cevherin gang kısmında karbonat mineralleri varsa, diğer belirtilen yöntemler bu mineralleri tamamen ayıramamaktadır. Bununla birlikte, kalsinasyon ile tam bir zenginleştirme yapılabilmektedir. Başlangıçta, organik kısım yanarak kaybolmakta, daha sonra kalsit bozularak karbondioksit uzaklaştırılmaktadır.

11.5.8. İlave İşlemler

Diğer işlemlerden farklı olarak, ek işlemler kırma, öğütme, filtrasyon, kurutma vb. içermektedir. Az miktarda karbonat içeren magmatik fosfat cevherinin zenginleştirilmesi dünya çapında daha kolaydır. Fosfat cevheri kırılır, öğütülür ve flotasyon yoluyla zenginleştirilmektedir. Mısır ve Suriye'de zenginleştirme işlemi sırasında yıkama ve kalsinasyon işlemi yapılmaktadır. Fas, Tunus ve Togo fosfatlarının zenginleştirilmesi sırasında yıkama, klasifikasyon ve şlam atma işlemleri tamamlanmalıdır. Bu işlemler tamamlandıktan sonra nihai ürünler elde edilebilmektedir. Senegal, Ürdün ve Brezilya'da denizel tortul kökenli fosfat yataklarını zenginleştirmek için öğütme, şlam atma ve yağ asitleri flotasyonu teknikleri kullanılmaktadır. Mısır'daki Ebu Tartur cevheri, şlam atma işleminin ardından zenginleştirilir. Flotasyon, magma kökenli yüksek karbonat içerikli cevherlerin zenginleştirilmesini sağlamaktadır. Rusya-Kola bölgesi, en yüksek fosfat içeriğine sahip ürünü üretmektedir. Senegal, Sahra, Cezayir, Ürdün ve Fas, en yüksek fosfat içeriğine sahip ülkelerdir (Ayışkan, 1972; Atalay vd. 1985).

12. BAKIR

Bakır, folyo olarak anot aktif malzemenin iletken taşıyıcısıdır. Anot aktif malzeme bakır folyo üzerine kaplanmaktadır. Li iyon pildeki iyonik reaksiyon ile ortaya çıkan elektron bakır folyonun iletkenliği nedeniyle devrede taşınmaktadır. Bakır, periyodik cetvelde Cu sembolü ile gösterilen, atom numarası 29, atom ağırlığı 63,54 g·mol⁻¹ olan 8,93 g·cm⁻³ yoğunluğa sahip, doğada az miktarda nabit, genellikle sülfürlü, oksitli ve kompleks halde bulunan 1B geçiş grubu elementidir. Bu elementin eksi değeri bulunmamaktadır. Kararlı izotoplarının kütle numaraları 63 ve 65'tir. Radyoaktif izotoplarının kütle numaraları ise 58, 59, 60, 61, 62, 64, 66, 67 ve 68'dir. 1083 °C de ergimeye başlar ve 2.300 °C de kaynama sıcaklığına ulaşır. Bakır kırmızı ve kahverengi görünümlü bir metaldir. Hidrojenden pasif olup, civa, gümüş, altın ve platin elementlerinden aktiftir. Bakıra oksijensiz asitler etki etmez, oksijenli asitler ise yükseltgen olarak etki eder. Bakır atmosferik şartlara oldukça dayanıklıdır. Mukavemeti düşük, döküm ve kaynak kabiliyeti iyi değildir. Kübik yüzey merkezli kristal yapısı sebebiyle soğuk olarak şekillendirilebilir. Bir başka deyişle kolay dövülüp işlenebilen bir metaldir. Bakırın kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 49'da verilmiştir.

Kimyasal etkinliği düşüktür. Atom yarıçapının küçük olması ve çekirdeğinin aşırı yüklü olması buna neden olmaktadır. Açık ortamda uzun süre kalması sonucunda, içinde bulunduğu bölgenin hava şartlarına göre yüzeysel oksitlenme ve paslanmaya uğrayabilir. Doğada içerisinde farklı konsantrasyonlarda bakır içeren yüzlerce mineral bulunmaktadır. Bir mineral, içerisinde %6'dan fazla bakır bulundurur ise zengin sayılmaktadır. Başlıca üretim yapılan mineraller; kuprit, kalkosit, kovellit, kalkopirit, bornit, tetrahedrit, tenorit, malahit, azurit ve tennantit'dir. Başlıca bakır mineralleri Tablo 50'de gösterilmiştir.

Tablo 49. Bakırın Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri (Int.Kyn. 34)

Simgesi	Cu
Sertliği	2,5-3
Yoğunluğu	8,93 g·cm ⁻³
Ergime Noktası	1083 °C
Kaynama Noktası	2300 °C
Elektrik İletkenliği	%99,95

Tablo 50. Bazı Bakır Mineralleri ve Bakır İçerikleri

Mineral	Kimyasal Formülü	Bakır İçeriği (%)
Kuprit	Cu ₂ O	88,82
Tenorit	CuO	79,89
Kalkosit	Cu ₂ S	79,85
Kovellit	CuS	64,46
Bornit	Cu ₅ FeS ₄	63,31
Malahit	Cu ₂ (CO ₃)(OH) ₂	57,48
Azurit	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	55,31
Tennantit	(Cu, Fe) ₁₂ As ₄ S ₁₃	47,51
Tetrahedrit	(Cu, Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	34,8
Kalkopirit	CuFeS ₂	34,63

Dünya'nın hemen hemen tüm bölgelerinde bulunması nedeniyle geniş ölçüde üretiminin yapılabilmesi, diğer bütün metaller içinde gümüşten sonra elektriği en iyi ileten metal olması, endüstriyel önemi yüksek, pirinç, bronz gibi alaşımlar yapması bakırın önemini arttırmaktadır (Ersan, 2008).

12.1. Türkiye’de Bakır Madenleri

Doğada bakırın yataklanma şekilleri, porfiri, ağsal-saçınımlı, damar ve masif olmak üzere dört ana tiptir. Literatürde bilinen bakır yataklarının en önemlilerini ağsal-saçınımlı ve masif tip yataklar oluşturmaktadır. Ağsal-saçınımlı tip yataklardaki esas bakır minerali kalkopirittir ve genellikle piritle beraber kuvars gang içinde izlenir (Çakmakkaya). Bazen bu yataklarda önemli miktarda olmamakla birlikte sfalerit de izlenir (Murgul ve Espiye-Kızılkayalar). Bu yataklarda cevher mineralleri daha iri tanelidir. Türkiye’de başta MTA olmak üzere yerli ve yabancı sermayeli şirketler tarafından etüt edilen 650 civarında bakır mostrası bulunmaktadır. Genellikle magmatik kökenli olan cevherleşmeler, jeolojik özelliklerle kayaç türlerine göre köken ve parajenez yönünden farklılıklar gösterirler. Bakır ve pirit cevherleri genellikle, ya bakır-pirit ya da Cu-Pb- Zn-Pirit zuhurlarıyla birlikte bulunmaktadır. Bakır yataklarımız jenetik olarak; porfiri yataklar, masif sülfür yatakları ve hidrotermal damarlar ve kontak metasomatik yataklardır.

Hidrotermal ve kontak metasomatik yataklar sayıca fazla olmasına rağmen rezerv bakımından büyük değillerdir. Porfiri tip yataklar ise rezerv ve tenör yönünden işletilebilir düzeyde değillerdir. Buna karşılık masif sülfür yatakları ülkemizin bakır madenciliği açısından önemlidir. Murgul, Çayeli-Madenköy, Lahanos, Ergani, Siirt- Madenköy, Cerattepe ve Küre ülkemizde bilinen en önemli masif sülfür bakır yataklarıdır.

Alp orojenik kuşağında yer alan Türkiye’de, bakır yatakları dört ana metalojenik provens içerisinde görülür. Bunlardan birincisi ve en önemlisi Makedonya- Balkanlar’dan gelerek Istranca’dan sonra Karadeniz’den geçerek Sinop yakınlarından itibaren Doğu Karadeniz boyunca devam eden, Kafkaslar ve İran üzerinden Himalayalara doğru uzanan kuşaktır. Bu kuşakta porfiri bakır yatakları ve Kuroko tipi masif sülfür yatakları yaygındır. İkinci sırada, Kıbrıs üzerinden gelerek İskenderun- Hakkâri arasında devam eden ve daha sonra İran’a geçen Güneydoğu Anadolu Ofiyolit Kuşağı yer alır. Bu metalojenik provenste Kıbrıs tipi masif sülfür yatakları bulunur. Üçüncü metalojenik provens, Kıbrıs tipi masif sülfür yataklarının yer aldığı Batı Karadeniz Bölgesi’ndeki Küre yöresidir. Asidik plutonizmaya bağlı hidrotermal damar ve kontak metasomatik Cu-Pb-Zn yataklarının bulunduğu Kuzeybatı Anadolu Bölgesi dördüncü metalojenik provensi oluşturur.

Türkiye’de işletilen ve ekonomik olduğu belirlenen yatakların tümü bu metalojenik bölgeler içinde yer almaktadır. Diğer bölgelerimizdeki değişik tipteki cevherleşmeler düşük tenörlü ve küçük rezervlidir. Pb-Zn yataklarında bulunan bakır cevherleşmeleri ikinci derece olup, bunlar Balya, Sisorta, Şavşat, Asarcık, Bulancak, Gököyde olduğu gibi, genellikle asidik plütonizmaya bağlı damar ve saçınımlar şeklindedir. Üst Kretase ile Eosen-Oligosen yaşlı dasitik, andezitik volkanizmaya ilgili lav ve tüflerde oluşan bazı yataklar özellikle Kuzey Anadolu fayına paralel doğu batı doğrultusu boyunca görülmektedir. Çorum ve Çankırı illerinde Üçoluk, Konaçköy, Hacıosman ve Tahtalıköy’de bulunan zuhurlar jipsli Oligo-Miyosen serilerinde yer alan sedimanter kökenli sekonder oluşuklar olup, yumrular halinde dağılmış çok önemsiz oluşumlardır.

Ülkemiz bakır rezervleri ile ilgili çalışmalar MTA Genel Müdürlüğü ve özel sektör tarafından yürütülmektedir. Türkiye, bakır rezervleri açısından Karadeniz ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri olmak üzere iki önemli bölgeye sahiptir. Türkiye görünür+muhtemel bakır rezervi Metalik Cu olarak, 3,6 milyon tondur (Int.Kyn. 31).

Ülkemizde 2022 yılı verilerine göre toplam tüvenan bakır cevheri üretimi 5,2 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. 2022 yılında üretim miktarlarına göre bakır üretimi yapılan iller Kastamonu, Siirt, Adıyaman, Artvin, Giresun, Çanakkale, Rize, Elazığ, Malatya, Kütahya, Kırşehir, Bitlis, Ordu. Samsun İzabe ve Elektroliz Tesisinde ise blister ve rafineri bakır üretimi yapılmaktadır.

12.2. Dünya’da Bakır Rezervleri

Bakır, doğada serbest halde bulunur. Daha çok Kuzey Amerika’da, Katanga’da, Rodezya’da, Şili’de, İspanya’da, Urallar’da rastlanır. Bakır filizleri oksitli (küpşit, Cu_2O), sülfütlü (kalkosit, Cu_2S) ve karbonlu (malahit, $Cu_2CO_3(OH)_2$) olmak üzere üçe ayrılır.

Dünya bakır rezervlerinin yaklaşık %90’ının yeri bilinmektedir. En çok bakır mineraline sahip ülkeler, Amerika Birleşik Devletleri (Rocky Dağında ve Great Basin bölgesinde), Şili, Peru (And Dağlarında), Afrika (Kongo ve Zambiya’da), Kanada (Kuzey Michigan’da), Alaska, Çin, Rusya ve Avusturya’dır. Dünya bakır rezervlerine ait veriler Tablo 51’de paylaşılmıştır.

Tablo 51. Başlıca bakır üretici olan ülkelerin yıllar bazında üretim miktarları (USGS, 2023)

Ülkeler	2021 (1.000 ton)	2022 (1.000 ton)	Rezerv (1.000 ton)
ABD	1,23	1,3	44
Almanya	—	—	—
Avustralya	813	830	97
Çin	1,91	1,9	27
Endonezya	731	920	24
Güney Kore	—	—	—
Japonya	—	—	—
Kanada	550	530	7,6
Kazakistan	510	580	20
Kongo	1,74	2,2	31
Meksika	734	740	53
Peru	2,3	2,2	81
Polonya	391	390	30
Rusya	940	1	62
Şili	5,62	5,2	190
Zambiya	842	770	19
Diğer ülkeler	2,850	3,400	200,000
Toplam	21,200	22,000	890,000

- : üretim verileri mevcut değildir.

12.3. Türkiye ve Dünya’da Bakır Ticareti

Dünyada ve ülkemizde bakır cevheri, bakır konsantresi ve blister bakır fiyatlarının tespitinde Londra Metal Borsası (LME)’nin, New York Metal Borsası (COMEX)’nin bakır fiyatları temel alınmaktadır. Ürün içeriğine göre değerli metaller satış fiyatını artırmakta, istenmeyen empüriteler ise bakırın fiyatı düşürmektedir. Çin’in büyümesiyle birlikte bakırın fiyatı son 10 yılda artmıştır. Küresel krize kadar yukarı yönlü bir seyir izlemiş ve Nisan 2008’de ton başına 8.675 \$ ulaşmıştır. Ancak 2008 yılının ikinci yarısında maden ithalat ve ihracatında önemli bir rol oynayan bakır fiyatları düşmeye başlamıştır. Krizden sonra hızla düşen bakırın fiyatı Aralık 2008’de ton başına 3.072 \$’a düşmüştür. 2020 yılına ait dünya bakır ihracatı verileri Tablo 52’de verilmiştir.

Tablo 52. 2020 yılı Dünya bakır ihracatı (Eken, 2021)

Ülkeler	Miktar, (1.000 \$)
A.B.D.	6.452.754
Almanya	11.528.181
Çin	6.173.406
Güney Kore	4.826.821
Japonya	9.349.547
Kongo	9.246.662
Rusya Federasyonu	5.646.653
Şili	15.712.668
Tayvan	4.127.902
Türkiye	1.581.015
Zambiya	5.737.946
Dünya Toplamı	149.607.239

Amerika Birleşik Devletleri'nde başlayan ve tüm dünyayı etkisi altına alan küresel finansal kriz, madencilik sektörünü ve ekonominin tüm sektörlerini olumsuz etkilemiştir. Bu tarihten sonra değişken oranda da olsa yeniden yükselmeye başlayan bakır fiyatı, küresel ekonominin canlanmasıyla birlikte yükselerek 2011 yılı şubat ayında ton başına 9.868 \$ ile tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Bakır karışık bir düşüş eğilimine girmiş, 2013 ortalama fiyatı 7.325 \$/ton, yıldan bugüne %6,3 düşüşle 6.861 \$/ton'a düşmüştür. 2015 yılı ortalama değeri ton başına 5.495 \$ iken, 2016 yılının ilk altı ayı için ortalama bakır fiyatı ton başına 4.862 \$ olarak gerçekleşmiştir. Bakırın fiyatı son yıllarda artarak 7.239 \$/ton'a ulaşmıştır (Ünal vd. 2021). Bakır fiyatları, 22 Mart 2020'den bu yana %130 artışla 9 Mayıs'ta metrik ton başına 10.512 \$ ile tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaşmıştır.

Yukarıdaki tablolardan görüleceği üzere 'Bakır ve Bakırdan Eşya' ihracatında Şili sahip olduğu rezerv miktarı ile doğru orantılı olarak dünya ihracatında ilk sırada yer almaktadır. Benzer şekilde Kongo Demokratik Cumhuriyeti ve A.B.D. de sahip oldukları rezerv miktarlarına istinaden ilk beşte yer almaktadır. İlk beşteki diğer ülkelerle karşılaştırıldığında Almanya ve Japonya kayda değer rezerv miktarlarına sahip olmamalarına rağmen 'Bakır ve Bakırdan Eşya' ihracatında ikinci ve üçüncü sıraları paylaşmaktadırlar ki bunda ihracatını yaptıkları teknoloji yoğun ürünlerin payı önemlidir. Trademap'tan alınan verilere göre 2020 yılında 150 milyar \$ düzeyinde bir ihracat rakamı söz konusu olup, bu ihracatın onda biri (15,7 milyar \$) Şili tarafından yapılmaktadır. İkinci sırada Almanya (11,5 milyar \$) ve üçüncü sırada Japonya (9,3 milyar \$) bulunmaktadır ki yüksek teknoloji ile işlenmiş ürünlerin satışının bir ülkenin dış ticaretinde ne derecede önemli olduğu bu sıralamadan anlaşılabilir. Bununla birlikte Türkiye 'Bakır ve Bakırdan Eşya' ihracatçıları listesinde 30. sırada yer almaktadır ve 2020 yılında yaptığı ihracat 1,6 milyar \$ düzeyindedir (Eken, 2021).

12.4. Bakırın Kullanım Alanları

Bakır, döküm kabiliyetini, mukavemetini ve korozyon direncini artırmak için çinko, kalay, nikel ve diğer metallerle kolayca alaşım haline getirilebilir. Pirinç (Cu-Zn alaşımı), düşük katılma sıcaklığına ve yüksek akışkanlığa sahip olan ve karmaşık şekillere verimli döküm yapılmasını sağlayan özellikle kullanışlı bir alaşımdır. Berilyum-bakır ısıl işleme tabii tutulabilir, çelik kadar sert ve güçlüdür ve çeşitli uygulamalar için kullanılabilir (Materion, 2020). Alaşımlar bakır kullanımının yaklaşık %25'ini oluşturur. Önemli faydalı özellikleri arasında; kolayca çekilerek son derece ince tel haline getirilmesi, ince boru ve diğer şekillere kolayca ekstrüde edilebilmesi, kolayca işlenir ve dış açılması, özellikle alaşım formunda karmaşık şekillere kolayca dökülebilmesi, antibakteriyel (tıbbi borularda ve diğer ekipmanlarda kullanışlıdır) olması, manyetik olmaması, çekici bir parlaklığa ve renge sahip olması, katalitik özelliklere sahip olması, kullanım sırasında oksitlenmemesi ve kayıpsız olarak geri dönüştürülebilir olması sayılabilir. Başlıca kullanım alanı, küçük ev tesisatlarından yüksek voltajlı ağır akım uygulamalarına kadar değişen elektrik iletimidir. Jeneratörlerde, motorlarda, transformatörlerde ve yenilenebilir enerjide yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde diğer önemli kullanım alanı ise yüksek hızlı veri iletimi, alan ağları, cep telefonları, kişisel bilgisayarlar ve diğer elektronik ekipmanlar gibi iletişim teknolojileridir. Bakır, estetik çekiciliğinin yanı sıra bina teli, sıhhi tesisat, ısıtma ve soğutma için inşaatlarda kullanılabilir. Sismik aktivitenin yüksek olduğu bölgelerde bakır bazlı yapı malzemelerinin kullanılması, enerjii absorbe etme kabiliyeti sayesinde deprem hasarını sınırlayabilir. Dayanıklılığı, işlenebilirliği ve yüksek hassasiyetle dökülebilmesi, bakırı dişliler, rulmanlar ve türbin kanatları gibi endüstriyel ekipmanların üretimi ve uçaklar, yüksek hızlı demiryolu ve taşıt araçları dahil olmak üzere ulaşım endüstrisinde kullanım için uygun hale getirir. Mükemmel ısı transferi özellikleri ısı eşanjörlerinde ve basınçlı kaplarda kullanılır. Bakır ve alaşımları, iyi korozyon direnci nedeniyle deniz ortamlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bakır ayrıca antimikrobiyal özellikler sergiler, bu da onu seçilmiş tıbbi uygulamalar ve kapı kolları gibi yüksek kullanımlı yüzeyler için uygun hale getirir. Bakırın kullanım amacına göre alanları Tablo 53'te verilmiştir. Li iyon bataryalarda ise ince folyo olarak anot elektrotun oluşturulmasında anot aktif malzemenin taşıyıcısı, elektronların ileticisi olarak kullanılır.

Tablo 53. Üretilen bakırın kullanım amacına göre dağılımı

Kullanım Amacı	%
Elektrik İletkenlik	65
Korozyon Direnci	16
Termal İletkenlik	11
Mekanik ve Yapısal	6
Estetik	2

12.5. Bakır Minerallerinin Zenginleştirilmesi

Bakır mineralleri, buldukları diğer minerallerden yoğunluk farkı ilkeleri ve fiziko-kimyasal özellikleri kullanılarak zenginleştirilebilir. Bu nedenle bakır cevheri madencilğinde gravite, flotasyon ve liç yöntemleri uygulanmaktadır (Çilingir, 1996). Bir diğer önemli bakır kaynağı ise hurda bakır ve bakır alaşımlarıdır. İkincil kaynaklardan bakır üretimi, mineral üretiminin %10-15'ini oluşturmaktadır (Schlesinger vd., 2011). Ek olarak, üretim süreci sırasında üretilen hurdanın önemli ölçüde yeniden pişirilmesi veya rafine edilmesi söz konusudur. Dünya bakır üretiminin %80'den fazlası bakır sülfür cevheri yataklarından gelmektedir. Bakır sülfür mineralleri sulu çözültide kolayca çözünmediğinden, çoğu bakır üretimi flotasyondan yararlandıktan sonra metalurji ile yapılır.

12.5.1. Fiziksel Zenginleştirme Yöntemleri

Bakır cevherinin fiziksel işlemlerle zenginleştirilmesi, yaygın olarak bir ön saflaştırma işlemi olarak kullanılır. Bu yöntem, değerli minerallerin ve gang minerallerinin özgül ağırlık, manyetik duyarlılık, fotometrik ve radyoaktif özelliklerindeki farklılıklardan yararlanır. Ön zenginleştirme, iri boyutta artıkların mümkün olduğu kadar kayıpsız bir şekilde uzaklaştırılması işlemidir, bu işlemin kullanılması flotasyona beslenen cevherdeki kil minerallerinin oranını azaltır, cevherin değerli metal içeriğini artırır ve bu şekilde sonraki işleme beslenecek bakır içeriği artar. Ayrıca flotasyondan nihai konsantrenin geri kazanılmasını da iyileştirir. Ön zenginleştirme ise büyük ölçekli işletme ve zenginleştirme maliyetlerini azaltır ve öğütme ve flotasyon ünitelerinin kapasitesini artırır. Ayrıca ince taneli atıkların depolanma miktarını da azaltır (Gül, 2007; Perek ve Arslan, 2003).

12.5.2. Flotasyon

Bakır cevherleri arasında kalkopirit, kalkopirit, bornit, kovellin, bakır sülfür mineralleri olarak tetraedrit ve enarjit, bakır oksit mineralleri olarak malakit ve azurit, metal sülfür mineralleri olarak pirit, pirotit ve markazit, gang mineralleri olarak kuvars, serisit, barit ve kalsit bulunur. Flotasyon, sülfür minerallerini yan kayaçlardan ve birbirinden ayırmanın en etkili yöntemidir (Ceylan ve Bulut, 2016). Anyonik toplayıcılar (ksantatlar, ditiofosfatlar ve merkaptanlar) bakır sülfür minerallerini yüzdürme yoluyla kazanmak için yaygın olarak kullanılır ve köpürtme ajanları olarak çam yağı, kresik asit, poliglikoller ve alkol kullanılır. Katı-sıvı ayrımı daha sonra konsantre ve atık tükürlerinde gerçekleştirilir (Atak, 2017).

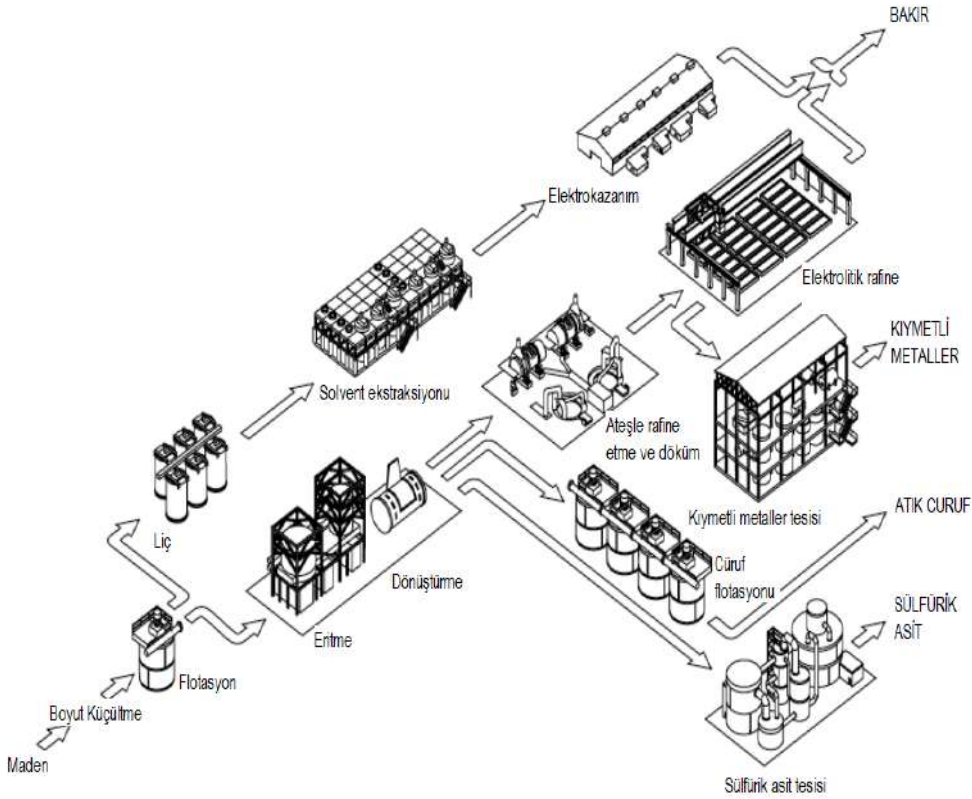
12.5.3. Gravite ile Zenginleştirme

Bakır mineralleri için gravite veya ağır ortam konsantrasyon yöntemleri daha az yaygındır, ancak ana konsantrasyon yönteminden önce ön konsantrasyon için kullanılabilir (Yıldız, t.y.). Murgul bakır cevheri üzerinde laboratuvar ölçeğinde bir çalışmada, flotasyondan önce bir kabaran yataklı ayırıcı kullanılarak kuvarsin sistemden büyük ve yüksek verimli bir şekilde uzaklaştırıldığı gözlenmiştir (Özcan, 2018). Diğer bir örnek, düşük tenörlü Malanjkhand cevherlerinin bakır tenörünün ön zenginleştirme yoluyla artırılmasıdır (Jena vd. 2018).

12.5.4. Hidrometalurjik Yöntemler ile Zenginleştirme

Sıvı kimyasalların kullanıldığı ekstraktif metalurji yöntemlerinden biri de hidrometalurjidir (Agrawal vd., 2006). Ana amaç, değerli metalleri cevherden çıkarmak, zenginleştirmek veya geri dönüştürmektir. Üç kategoriye ayrılır: liç, saflaştırma ve metal geri kazanımı. Değerli metallerin liç yoluyla geri kazanılması işlemi, solvent özelliklerine sahip sıvı kimyasalların kullanımını içerir. Zenginleştirilecek metal, bir kimyasal solüsyonda (genellikle asit veya baz) çözülür. Kullanılan kimyasalların türü ve konsantrasyonu, çözülecek metalin özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterebilir. pH, sıcaklık ve oksidasyon potansiyelindeki değişikliklerin tümü, liç verimliliği üzerinde bir etkiye sahip olabilir. Cevherde bulunan diğer metaller, metale ek olarak liç sonucunda çözültiye alınmış olabilir.

İstenmeyen metalleri çözültiden uzaklaştırmak için saflaştırma yöntemleri kullanılabilir. Solvent ekstraksiyonu ve iyon değişimi yöntemleri iki örnektir. Solvent ekstraksiyonunun birincil amacı, istenen metali farklı bir fazdan geçirerek ayırmaktır. Organik çözücü, çözücü ekstraksiyonunda kullanılan karışımın genel terimidir. Yüklü çözültiye organik çözücü uygulandığında değerli metaller organik hale gelir. Sonuç olarak hem yüklü bir organik hem de yüksüz bir çözülti üretilir. Ortaya çıkan yüksüz çözülti, işlemde yeniden kullanılabilir. Bu aşamada elde edilen yüklü organik, elektrokazanma ile metalden ayrılabilir (Sole vd., 2018). Öte yandan iyon değişimi, iyonların katı ile temas halindeki bir çözültiden katının yüzeyine bağlanarak katı üzerindeki benzer elektrik yüklerine sahip iyonları değiştirdiği bir işlemdir (Gunarathne vd. 2022). Katı yüzeydeki bu iyonlar çözültiye geçerken, elektrostatik kuvvetler tarafından yer değiştiren iyonlar yüzeye bağlanarak onların yerini alır. Şekil 15'de elektrikli araç bataryalarında kullanılacak olan bakırın üretimi akış şeması olarak verilmiştir.



Şekil 15. Bakır üretimi akış şeması (Int.Kyn. 35)

13. ÖNERİLER

Türkiye'nin madencilik ve cevher hazırlama faaliyetlerindeki potansiyeli göz önüne alındığında, yerli batarya üretimi için stratejik bir avantaj sağlayabilecek önemli kaynaklara sahip olduğu söylenebilir. Bu kaynakların etkin bir şekilde kullanılması ve yerli üretim kapasitesinin artırılması, ülkenin batarya teknolojilerindeki rekabet gücünü artırabilir ve enerji bağımsızlığına katkı sağlayabilir.

Özellikle madencilik ve cevher hazırlamadaki yeni teknikler kullanılması rekabetçi bir dünyada Türkiye'nin yüksek sıralara gelmesine yol açacaktır. Örneğin elektrikli araç bataryalarının hammaddeleri olan lityum, kobalt ve nikel gibi elementlerin yeraltı rezervlerini tespit etmek için manyetik ölçümlerden yararlanılabilir. Bu teknik, yeraltı rezervlerinin daha hızlı ve etkin bir şekilde keşfedilmesine yardımcı olabilir. Elektrikli araç bataryalarının hammaddelerinin bulunduğu bölgelerdeki jeolojik yapıların ve rezervlerin sismik görüntüleme ile haritalanması, madencilik faaliyetlerinin daha etkin bir şekilde planlanmasına yardımcı olabilir. Elektrikli araç bataryalarının hammaddelerinin çıkarıldığı bölgelerde, uydu görüntüleme ve hava araçlarıyla yapılan uzaktan algılama çalışmaları, madencilik faaliyetleri için önemli veriler sağlayabilir. Bu teknik, jeolojik oluşumları, arazi yapısını ve doğal kaynakları inceleyerek madencilik faaliyetlerinin optimize edilmesine katkı sağlayabilir. Robotik sondaj ve kuyu yönetimi teknikleri ise otomatikleştirilmiş sondaj ekipmanları ve robotik sistemler kullanarak yeraltı rezervlerinin keşfi ve çıkarılması süreçlerini hızlandırabilir ve optimize edebilir. Elektrikli araç bataryalarının hammaddelerinin çıkarılması için kullanılan sondaj ve kuyu yönetimi teknolojilerinin geliştirilmesi, madencilik faaliyetlerinin verimliliğini artırabilir.

Cevher zenginleştirme teknikleri ele alındığında ise, elektrikli araç bataryalarının hammaddeleri olan cevherlerin işlenmesinde kullanılan gelişmiş flotasyon, manyetik ayırma, gravite ayırma ve elektrostatik ayırma gibi yöntemlerle cevherdeki farklı minerallerin zenginleştirilmesi sağlanabilir. Ayrıca hidrometalurjik ve biyometalurjik yöntemler de elektrikli araç teknolojilerinde kullanılan çoğu bileşenin kazanımı için önde gelen yöntemlerdir. Elektrokimyasal işlemler ve nano-teknolojiler de cevher zenginleştirme alanında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Nano-partiküllerin

kullanımı, cevherlerin işlenmesindeki verimliliği artırabilir ve işlem süreçlerini optimize edebilir. Özellikle nano-partiküllerin flotasyon işlemlerinde kullanılması, cevherin konsantrasyonunu artırması muhtemeldir.

Sonuç olarak, Türkiye'nin batarya teknolojileri alanında kullanılan hammaddelerin madencilik ve cevher hazırlama faaliyetleri açısından sahip olduğu potansiyel, ülkenin enerji bağımsızlığı ve ekonomik kalkınması için önemli bir fırsat sunmaktadır. Lityum, nikel, kobalt, silisyum ve grafit gibi stratejik hammaddelerin yerli kaynaklardan temini ve işlenmesi, yerli batarya üretiminin artırılması ve uluslararası pazarda rekabet gücünün sağlanması açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Bu noktada, madencilik ve cevher hazırlama faaliyetlerini destekleyecek stratejik planlamalar yapılmalı ve kaynakların etkin bir şekilde kullanımını sağlayacak politikalar geliştirilmelidir. Yerli Ar-Ge ve inovasyon yatırımları teşvik edilmeli ve bu alanda çalışan kurum ve kuruluşlara destek verilmelidir. Teknolojik altyapının güçlendirilmesi için üniversiteler, araştırma enstitüleri ve özel sektör işbirliği önemlidir. Bu sayede yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve ticarileştirilmesi desteklenmelidir. İlgili sektörlerdeki paydaşlar arasında işbirliği ve ortak projelerin teşvik edilmesi, endüstriyel işbirliği ağlarının oluşturulması önemlidir. Türkiye, batarya teknolojileri alanında kullanılan hammaddelerin madencilik ve cevher hazırlama faaliyetleri üzerindeki stratejik önemi dikkate alarak, yerli üretimi destekleyen politikalar ve yatırımlar ile uluslararası alanda rekabet edebilir hale gelebilir. Bu sayede, sürdürülebilir bir enerji geleceği için önemli bir adım atılmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- Agrawal, A., Kumar, V., Pandey, B. D., Sahu, K. K. (2006). "A comprehensive review on the hydro metallurgical process for the production of nickel and copper powders by hydrogen reduction", *Materials Research Bulletin*, 41 (4): 879–892.
- Akgök, Y. Z., Şahiner, M., (2017), Dünyada ve Türkiye’de Lityum. MTA <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/Lityum.pdf>.
- Allard, S. (2008). Silica. New Brunswick Department of Natural Resources; Minerals, Policy and Planning Division, Mineral Commodity Profile No. 2.
- Arıkan, F. (2022). Dünyada ve Türkiye’de Kobalt. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.
- Arslan, A., Perek, K. T. (2003). Küre masif zengin bakır cevherinin basınç altında çözündürülmesi. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı. 99 s.
- Atak, S. (2017). Flotasyon – Cevher HAZırlamada 100 YIL. İTÜ Vakfı Yayınları, Genişletilmiş 2. Baskı. ISBN: 978-605-4778-31-7.
- Atak, S. (2017). Flotasyon ilkeleri ve uygulaması, İTÜ Vakfı, İstanbul, 34 s.
- Atalay, Ü., Doğan, M. Z., Özbayoğlu, G., Duman, H., (1985), Mazıdağ-Taşıt Fosfat Cevherinin Zenginleştirilmesi, Madencilik, XXIV-2
- Ayışkan, Ö., (1972), Fosfat cevheri Zenginleştirilmesi ve Türkiye için Önemi, Bilimsel Madencilik Dergisi, 11-4
- Barbosa, L. I., González, J. A., del Carmen Ruiz, M., (2015), Extraction of lithium from β -spodumene using chlorination roasting with calcium chloride, *Thermochimica acta*, 605, 63-67.
- Barkholtz, H. M., Fresquez, A., Chalamala, B. R., Ferreira, S. R. (2017). A database for comparative electrochemical performance of commercial 18650-format lithium-ion cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(12), A2697.
- Bayat, O., Top, S., Altın, M., (2013). Investigation of the Beneficiation of Low-Grade Manganese Ores, International Mining Congress & Exhibition of Turkey Volume: 23, 951-958
- BGS (British Geological Survey). (2008). Nickel. MineralsUK https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/8725/1/0910_Nickel_Profile.pdf adresinden alındı.
- Bhavan, I. (2015). Quartz & Other Silica Minerals. *Indian Minerals Yearbook 2013, Part III: Mineral Reviews*.
- Birinci, M., Gök, R. (2018). Ön desilikasyon amaçlı boksit zenginleştirme işlemleri üzerine güncel bir değerlendirme.
- Burton, I. (2023). Magmatic Nickel Deposits: The Needle in the Haystack.
- Büyükkınacı, A. (1972). Fosfatların jeokimyasal Dağılımları ve Başlıca Mineralleri.
- Ceylan, A., Bulut, G. (2016). Siirt-Madenköy Bakır Cevherinin Flotasyon Yöntemiyle Zenginleştirilmesi Beneficiation Of Siirt-Madenköy Copper Ore By Flotation Method. In *Cilt (Vol. 55, Issue 1)*.



- Chang, W. S., Park, C. M., Kim, J. H., Kim, Y. U., Jeong, G., Sohn, H. J. (2012). Quartz (SiO₂): a new energy storage anode material for Li-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 5(5), 6895-6899.
- Chehreh Chelgani, S., Rudolph, M., Kratzsch, R., Sandmann, D., Gutzmer, J. (2016). A review of graphite beneficiation techniques. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 37(1), 58-68.
- CI (Cobalt Institute). Cobalt Mining. 28 Haziran 2023 tarihinde <https://www.cobaltinstitute.org/about-cobalt/cobalt-life-cycle/cobalt-mining/> adresinden alındı.
- CI (Cobalt Institute). Types of deposits. 27 Temmuz 2023 tarihinde <https://www.cobaltinstitute.org/about-cobalt/types-of-deposits/> adresinden alındı.
- Cobalt Institute. (2021). Cobalt Market Report.
- Copper Development Association. (2020). 60 centuries of copper. <https://www.copper.org/education/history/60centuries/> erişim tarihi 19.09.20.
- Crocker, L., Lien, R. H., (1987), Lithium and its recovery from low-grade nevada clays, *Bulletin (No. PB--88-232541/XAB)*, Bureau of Mines.
- Çilingir, Y. (1996). Metalik Cevherler ve Zenginleştirme Yöntemleri (Cilt 1) D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Baskı Ünitesi No: 198, İzmir.
- D.P.T. (2001). Sekizinci Kalkınma Planı. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Metal Madenler Alt Komisyonu, Diğer Metal Madenler Çalışma Grubu Raporu
- Dehaine, Q., Tijsseling, L. T., Glass, H. J., Törmänen, T., Butcher, A. R. (2021). Geometallurgy of cobalt ores: A review. *Minerals Engineering*, 160, 106656.
- DPT (Devlet Planlama Teşkilatı). (2001). Madencilik Politikaları. Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Kalkınma Planı.
- DPT (Devlet Planlama Teşkilatı). (2018). Madencilik Politikaları. Özel İhtisas Komisyonu Raporu, On Birinci Kalkınma Planı.
- DPT (Devlet Planlama Teşkilatı). (2018). Madencilik Politikaları. Özel İhtisas Komisyonu Raporu, On Birinci Kalkınma Planı.
- Eken, M. (2021). Bakır Raporu. www.demirbirlik.org
- Elias, M. (2002). Nickel laterite deposits-geological overview, resources and exploitation. *Giant ore deposits: Characteristics, genesis and exploration. CODES Special Publication*, 4, 205-220.
- Eroğlu, G., Akgök, Y.Z. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Nikel. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.
- Eroğlu, G., Şahiner, M., (2019). Dünyada ve Türkiye’de Manganez. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.
- Eroğlu, G., Şahiner, M. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Alüminyum. Fizibilite Etütleri Başkanlığı, 1-15.
- Eroğlu, G., Akgök, Y.Z., Şahiner, M. (2018). Üretimden Ticarete Nikel. *Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 26: 53-62.
- Ersan, Ç. (2008). Fonksiyonel derecelendirilmiş disklerde termal gerilme analizi (Master’s thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- European Union Report On Critical Raw Materials for The EU. (2014). Report of The Ad Hoc Working Group on Defining Critical Raw Materia. 1–41.
- Farrokhpay, S., Filippov, L. (2016). Challenges in processing nickel laterite ores by flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 151, 59-67.
- FMC. Copper-Cobalt ores. https://www.danafloat.com/pdf/products/copper-cobalt_ores.pdf adresinden alındı.
- Garside, M. (2023). Global demand for nickel 2019-2023. Statista. <https://www.statista.com/statistics/273653/global-nickel-demand/> adresinden alındı.
- Gleeson, S. A., Butt, C. R. M., Elias, M. (2003). Nickel laterites: a review. *SEG Newsletter*, (54), 1-18.
- Goonan, T. G., (2012), Lithium use in batteries.
- Gourcerol, B., Gloaguen, E., Melleton, J., Tuduri, J., Galiege, X., (2019), Re-assessing the European lithium resource potential—A review of hard-rock resources and metallogeny, *Ore Geology Reviews*, 109, sayfa 494-519.
- Government of Canada. (2023). Nickel facts. <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/minerals-mining/minerals-metals-facts/nickel-facts/20519> adresinden alındı.
- Gök, R., 2019. Düşük Modüllü Metalujik Boksit Cevherlerinin Zenginleştirme Olanaklarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.



Gunarathne, V., Rajapaksha, A. U., Vithanage, M., Alessi, D. S., Selvasembian, R., Naushad, Mu., You, S., Oleszczuk, P., Ok, Y. S. (2022). "Hydrometallurgical processes for heavy metals recovery from industrial sludges", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52 (6): 1022–1062.

Gül, A. (2007). The role of Na₂S₂O₅ and activated carbon on the selective flotation of chalcopyrite from a copper ORE using a dithiophosphine-type collector. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 28(3), 235–245. <https://doi.org/10.1080/08827500601141750>

Hacıfazlıoğlu, H. (2011). Silis Kumunun Zenginleştirilmesinde Kullanılan Yöntemler ve Flotasyon ile Manyetik Ayırma Yöntemlerinin Demir Giderimi Bakımından Karşılaştırılması. *Madencilik*, Cilt 50, Sayı 3, Sayfa 35-48.

Harris, C. T., Peacey, J. G., Pickles, C. A. (2013). Selective sulphidation and flotation of nickel from a nickeliferous laterite ore. *Minerals Engineering*, 54, 21-31.

Helvacı, C., Gündoğan, İ., Oyman, T., Sözbilir, H., Parlak, O. (2013). Çaldağ (Turgutlu-Manisa) lateritik Ni-Co yatağının jeolojisi, mineralojisi ve jeokimyasal özellikleri. *Yerbilimleri*, 34(2), 141-168.

Helvacı, C., Gündoğan, İ., Oyman, T., Sözbilir, H., Parlak, O. (2013). Çaldağ (Turgutlu-Manisa) lateritik Ni-Co yatağının jeolojisi, mineralojisi ve jeokimyasal özellikleri. *Yerbilimleri*, 34(2), 141-168.

Helvacı, C., Mordogan, H., Çolak, M., Gündoğan, I., (2004), Presence and distribution of lithium in borate deposits and some recent lake waters of west-central Turkey, *International Geology Review*, 46(2), sayfa 177-190.

Hien-Dinh, T. T., Luong, V. T., Gieré, R., Tran, T., (2015), Extraction of lithium from lepidolite via iron sulphide roasting and water leaching, *Hydrometallurgy*, 153, 154-159.

Hind, A. R., Bhargava, S. K., Grocott, S. C. (1999). The surface chemistry of Bayer process solids: a review. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 146(1-3), 359-374.

Hodder, D., Dube, T., Buck, C., Yao, X., Lanteige, L., Ansah-Sam, M. (2022). Technical Report Summary Ontario Operations Sudbury District, Vale, syf. 187-189.

Hua, Q., Guo, H., Wang, D., Huang, Y., Cao, Y., Peng, W., Fan, G. (2022). A new strategy for selective recovery of low concentration cobalt ions from wastewater: Based on selective chelating precipitation-flotation process. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 141, 104605.

İMİB (2022). <https://www.imib.org.tr/links/29maden/DEMİR.pdf>

İMİB (2022). <https://www.imib.org.tr/links/29maden/MANGANEZ.pdf>

İMİB (2022). <https://www.imib.org.tr/links/29maden/TITANYUM.pdf>

İMİB. (2020). Fosfat Raporu.

Jandová, J., Dvořák, P., Vu, H. N., (2010), Processing of zinnwaldite waste to obtain Li₂CO₃, *Hydrometallurgy*, 103(1-4), 12-18.

Jena, S.S., Gharai, M., Mandre, N. R. (2018). Mineralogical Characterization and Gravity Separation of Lean Grade Mixed Copper Ore of Malanjkhand Deposit.

JMO (Jeoloji Mühendisleri Odası). Nikel-Kobalt. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/91bc5440296cc0e_ek.doc adresinden alındı.

Kar, M. K., Önal, M. A. R., Borra, C. R. (2023). Alumina recovery from bauxite residue: A concise review. *Resources, Conservation and Recycling*, 198, 107158.

Karademir, N. (2020). Mazıdaği (Mardin)'ndaki Fosfat Madenininin Sosyo-Ekonomik Etkileri. *Social Mentality and Researcher Thinkers Journal*, 6(39), 2675–2690. <https://doi.org/10.31576/smryj.737>

Kawatra, S. K., Young, C. A., Dunne, R.C. (2019). Nickel and Cobalt. *SME mineral processing and extractive metallurgy handbook*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, ISBN 978-0-87335-385-4.

Keleş E., (2008), Kimyasal Bileşimi Farklı Üç Fosfat Kayası ile Kurşun (II) İyonunun Adsorpsiyonu, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Leissner, T., Bachmann, K., Gutzmer, J., Peuker, U. A., (2016), MLA-based partition curves for magnetic separation, *Minerals Engineering*, 94, 94-103.

Li, M., Lu, J. (2020). Cobalt in lithium-ion batteries. *Science*, 367(6481), 979-980.

Luong, V. T., Kang, D. J., An, J. W., Kim, M. J., Tran, T., (2013), Factors affecting the extraction of lithium from lepidolite, *Hydrometallurgy*, 134, 54-61.

MAPEG. (2022). IV.Grup (A) Bendi Madenlerin 2022 Yılı Ocak Başı Satış Fiyatları.



- MAPEG. (2023). Maden Üretim Değerleri. <https://www.mapeg.gov.tr/Custom/Madenistatistik> adresinden alındı.
- MAPEG. (2023). Maden Üretim Değerleri. <https://www.mapeg.gov.tr/Custom/Madenistatistik> adresinden alındı.
- MAPEG. (2023). Temel Maden Fiyatları. <https://www.mapeg.gov.tr/Custom/Madenistatistik> adresinden alındı.
- MAPEG. (2023). Temel Maden Fiyatları. <https://www.mapeg.gov.tr/Custom/Madenistatistik> adresinden alındı.
- Materion. (2020). Advanced copper beryllium alloys e reliability in demanding applications. <https://materion.com/products/highperformance-alloys/copper-beryllium-alloys> erişim tarihi 19.09.20.
- Meshram, P., Pandey, B. D., Mankhand, T. R., (2014), Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review, *Hydrometallurgy*, 150, 192-208.
- Mohanty, J. K., Rao, D. S., Das, B., Rao, R. B. (2000). Mineralogy and pre-concentration of the chromite overburden of the Sukinda Ultramafic Belt, Orissa, India.
- Mohr, S. H., Mudd, G. M., Giurco, D., (2010), Lithium resources and production: a critical global assessment.
- Mordogan, H., Helvacı, C., Malayoglu, U., (1995), Bor Yatakları Killeri ve Güncel Göllerdeki Lityum Varlığı ve Değerlendirme Olanakları, *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 185-196.
- NI (Nickel Institute). (2023). About Nickel. <https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/> adresinden alındı.
- NI (Nickel Institute). (2023). Nickel in batteries. <https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/nickel-in-batteries/> adresinden alındı.
- Önal, G., Ateşok, G., (1994). *Cevher Hazırlama El Kitabı*.
- Özcan, Ö. (2018). Murgul Bakır Cevherinin Ön Zenginleştirilmesindeki Alternatif Yaklaşımlar, *Ankara, Bilimsel Madencilik Dergisi*, Cilt 57(3). s.149-162.
- Peltosaari, O., Tanskanen, P., Hautala, S., Heikkinen, E. P., Fabritius, T., (2016), Mechanical enrichment of converted spodumene by selective sieving, *Minerals Engineering*, 98, 30-39.
- Petavratzi, E., Gunn, G., Kresse, C. (2019). BGS commodity review: cobalt. [https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/534461/1/ BGS_ Commodity_Review_Cobalt.pdf](https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/534461/1/BGS_Commodity_Review_Cobalt.pdf) adresinden alındı.
- Polat, O. (1968). Türkiye'nin Düşük Tenörlü Titan Cevherlerinin Değerlendirilmesiyle İlgili, Çalışmalarının Esaslarının Tespitiyle Hakkında Rapor. Ankara: MTA
- Ptáček, P. (2016). Mining and Beneficiation of Phosphate Ore. In *Apatites and their Synthetic Analogues - Synthesis, Structure, Properties and Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/62215>
- Quast, K., Connor, J. N., Skinner, W., Robinson, D. J., Addai-Mensah, J. (2015). Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores Part 1: Literature review. *Minerals Engineering*, 79, 261-268.
- Rao, G. V., Gouri Charan, T. (1989). On preconcentration of nickel from lateritic overburden of chromite by flotation. Pt. 1. Anionic collectors. *Die flotative Voranreicherung von Nickel aus dem lateritischen Abraum von Chromit. T. 1. Anionische Sammler. Aufbereitungs-Technik; (Germany, FR)*, 30(11).
- Rao, G. V., Gouri Charan, T. (1989). On preconcentration of nickel from lateritic overburden of chromite by flotation. Pt. 1. Anionic collectors. *Die flotative Voranreicherung von Nickel aus dem lateritischen Abraum von Chromit. T. 1. Anionische Sammler. Aufbereitungs-Technik;(Germany, FR)*, 30(11).
- Rao, G. V., Sastri, S. R. S. (1996). Novel approach for enriching nickel content in lean lateritic chromite overburden. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 13, 77-81.
- Safarian, J., Kolbeinsen, L. (2016). Sustainability in alumina production from bauxite. *Sustainable Industrial Processing Summit*, 75-82.
- Schlesinger, M. E., Sole, K. C., Davenport, W. G. (William G., Flores, G. R. F. Alvear., Davenport, W. G. (William G., & ProQuest (Firm). (2022). *Extractive metallurgy of copper* (6th ed.).
- Schlesinger, M.E., King, M.J., Sole, K.C., Davenport W.G. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper*. Elsevier, 456p
- Sınırkaya, M., Bayrakçeken, H., Özer, A. K., Gülaboglu, M. S. (2008). The effect of carbon dioxide during the desulfurization of flue gas with Mardin-Mazıdagi phosphate rock. *Fuel*, 87(15-16), 3200-3206.
- Siame, E., Pascoe, R. D., (2011), Extraction of lithium from micaceous waste from china clay production, *Minerals Engineering*, 24(14), 1595-1602.
- Sitando, O., Crouse, P. L., (2012), Processing of a Zimbabwean petalite to obtain lithium carbonate, *International Journal of Mineral Processing*, 102, 45-50.



- Sole, K. C., Mooiman, M. B., Hardwick, E. (2018). "Ion Exchange in Hydrometallurgical Processing: An Overview and Selected Applications", *Separation & Purification Reviews*, 47 (2): 159–178.
- Şahin, A. S. (2017). Doğal Fosfatin (Apatit) Sıcaklığa Bağlı Kristalizasyonu ve CaO Serbestleşmesi, Yüksek Lisans Tezi
- Şengül, H., (2006), Seyreltik Asetik Asit Çözümleri ile Kalkerli Mardin-Mazıdağı Fosfat Kayasının Zenginleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Şensöz, H., Sayin, Z. E., Savaş, M., Erdoğan, Y., (2021), Emet Bor Üretim Tesisleri Atıklarının Lityum İçeriğinin İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(6), 1460-1469.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). Nikel. <https://enerji.gov.tr/tabii-kaynaklar-nikel> adresinden alındı.
- Tadesse, B., Makuei, F., Albjanic, B., Dyer, L., (2019), The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores, *Minerals Engineering*, 131, 170-184.
- Temur, S. (1997). Metalik Maden Yatakları. Konya Selçuk Üniversitesi Yayınları, 161-190.
- Teoh, E. C., Lawson, F., Han, K. N. (1982). Selective flotation of nickel-bearing minerals with use of specific dioxime surfactants. *Transactions of The Institution of Mining and Metallurgy Section C-Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 91(DEC), C142-C147.
- Terzi, M. (2012). Esan – Eczacıbaşı Milas Feldspat Tesisi Atıklarından Titanyum Mineralleri Kazanılması Olanaklarının Araştırılması, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi
- Trading Economics. (2023). Cobalt. <https://tradingeconomics.com/commodity/cobalt> adresinden alındı.
- Trading Economics. (2023). Nickel. <https://tradingeconomics.com/commodity/nickel> adresinden alındı.
- Tran, T., Luong, V. T., (2015), Lithium production processes, *Lithium process chemistry*, Elsevier, sayfa 81-124.
- Tuğrul, A., Avcı, E. (2023). Kuvars, Kuvarsit, Kuvars Kumu. *Endüstriyel Hammaddeler El Kitabı*, sayfa 168-176. ISBN: 978-625-99737-0-8.
- Tuncel, S., Arı, N., Yoleri, B., Şahiner, M., (2017), Dünyada ve Türkiye’de Demir. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.
- Tutay, Y.Ö., (2023),” Boksit”, *Endüstriyel Mineraller El Kitabı*, (1. baskı), 45-52, İstanbul Maden İhracatçılar Birliği (İMİB), İstanbul.
- TÜİK. (2023). Kobalt ithalat ihracat değerleri.
- TÜİK. (2023). Kuvars ithalat ihracat değerleri. Dış Ticaret İstatistikleri Veri Tabanı. 10 Aralık 2013 tarihinde alındı.
- TÜİK. (2023). Nikel ithalat ihracat değerleri.
- UCS (Union of Concerned Scientists). (2021). Electric Vehicle Batteries Addressing Questions about Critical Materials and Recycling. <https://www.ucsusa.org/resources/ev-battery-recycling> adresinden alındı.
- USGS (2017), <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/j/pp1802j.pdf>.
- USGS (2017). Mineral Commodity Summaries - Graphite, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
- USGS (2018). Mineral Commodity Summaries - Iron Ore, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2018/mcs2018-iron-ore.pdf>
- USGS (2018). Mineral Commodity Summaries - Manganese, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2018/mcs2018-manganese.pdf>
- USGS (2018). Mineral Commodity Summaries - Graphite, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
- USGS (2018). Mineral Commodity Summaries - Titanium Minerals, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2018/mcs2018-titanium-minerals.pdf>
- USGS (2019). Mineral Commodity Summaries - Graphite, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
- USGS (2019). U.S. Geological Survey-Mineral Commodity Summaries-Bauxite and Alumina.
- USGS (2019). Mineral Commodity Summaries - Iron Ore, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2019/mcs2019-iron-ore.pdf>
- USGS (2019). Mineral Commodity Summaries - Manganese, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2019/mcs2019-manganese.pdf>
- USGS (2019). Mineral Commodity Summaries - Titanium Minerals, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2019/mcs2019-titanium-minerals.pdf>
- USGS (2020). Mineral Commodity Summaries - Graphite, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
- USGS (2020). U.S. Geological Survey-Mineral Commodity Summaries-Bauxite and Alumina.



- USGS (2020). Mineral Commodity Summaries - Iron Ore, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-iron-ore.pdf>
- USGS (2020). Mineral Commodity Summaries - Manganese, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-manganese.pdf>
- USGS (2020). Mineral Commodity Summaries - Titanium Minerals, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-titanium-minerals.pdf>
- USGS (2021). Mineral Commodity Summaries - Graphite, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
- USGS (2021). U.S. Geological Survey-Mineral Commodity Summaries-Bauxite and Alumina.
- USGS (2021). Mineral Commodity Summaries - Iron Ore, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-iron-ore.pdf>
- USGS (2021). Mineral Commodity Summaries - Manganese, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-manganese.pdf>
- USGS (2021). Mineral Commodity Summaries - Titanium Minerals, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-titanium-minerals.pdf>
- USGS (2022), Mineral Commodity Summaries.
- USGS (2022). Mineral Commodity Summaries - Graphite, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
- USGS (2022). Mineral Commodity Summaries – Iron Ore, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-iron-ore.pdf>
- USGS (2022). Mineral Commodity Summaries - Manganese, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-manganese.pdf>
- USGS (2022). Mineral Commodity Summaries – Titanium Minerals, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-titanium-minerals.pdf>
- USGS (2022). U.S. Geological Survey- Mineral Industry Surveys-Bauxite and Alumina.
- USGS (2022). U.S. Geological Survey-Mineral Commodity Summaries-Bauxite and Alumina.
- USGS (2023). U.S. Geological Survey- Mineral Industry Surveys-Bauxite and Alumina.
- USGS. (2023). Copper.
- USGS. (2023). Phosphate.
- USGS. (2021-2023). Cobalt. Annual Publications, Mineral Commodity Summaries.
- USGS. (2021-2023). Nickel. Annual Publications, Mineral Commodity Summaries.
- USGS. (2021-2023). Sand And Gravel (Industrial). Annual Publications, Mineral Commodity Summaries.
- Üçerler, Z., Güney, A., (2022), The investigation of lithium extraction by roasting with sulfating agent and water leaching from nepheline syenite rocks, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 58(3).
- Üçerler, Z., (2020), Kırşehir Bölgesi Nefelinli Siyenit Kayaçlarından Lityum Kazanımının Araştırılması, İTÜ, Yüksek Lisans Tezi.
- Ünal, H., Tuncel, S., Yücel, M.B., Yoleri, B., Arslan, M. (t.y.). Türkiye ve Dünyada Bakır Hazırlayanlar.
- Woodruff, L G., Bedinger, G.M, Piatak, N. M. (2017). USGS (The United States Geological Survey). <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/t/pp1802t.pdf> . 23 p. Virginia.
- Yaylalı, B., Yazıcı, E. Y., Celep, O., Devenci, H. (2020). Kritik Metal Konumundaki Kobaltın Birincil ve İkincil Kaynaklardan Üretimi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 59(1), 35-50.
- Yıldız, N. (2010). Demir Cevheri, “Iron Ore Production; Production, Enrichment, Pelletizing, Sintering”, ISBN 978-975-96779-3-0, page:250, year:2010
- Yıldız, N. (2014). Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme, Cilt 2: Minerallerin Zenginleştirilmesi. ISBN: 978-975-96779-5-4.
- Yıldız, N. (t.y.). Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme, 2. Cilt. Ankara, ERTEM
- Yıldız, N., (2016). Lityum. Türkiye Maden Mühendisleri Odası.
- Yücel, M. B. (2018), Dünyada ve Türkiye’de Titanyum. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.
- Zhang, H., Yang, Y., Ren, D., Wang, L., He, X. (2021). Graphite as anode materials: Fundamental mechanism, recent progress and advances. *Energy Storage Materials*, 36, 147-170.
- Zhang, J., Gao, F., (2011). “Finite Element Analysis of Die Geometry and Process Conditions Effects on Equal Channel Angular Extrusion for β -Titanium Alloy”, *Journal of Iron and Steel Research*, 54-58
- Zhang, Z., Wu, W., Ma, H., Gu, Y., Zhang, R. (2022). Green and facile production of high-quality graphene from graphite by the intercalation and decomposition of oxalic acid. *Materials Letters*, 132567.



Zhu, G., Luo, W., Wang, L., Jiang, W., Yang, J. (2019). Silicon: toward eco-friendly reduction techniques for lithium-ion battery applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(43), 24715-24737.

İnternet Kaynakları

- [1] <https://immib.org.tr/tr/lityum-arzi-neden-kritik>>, erişim tarihi 22.09.2022.
- [2] https://trendeconomy.com/data/commodity_h2/283691>, erişim tarihi 21.09.2022.
- [3] <https://oec.world/en/profile/hs/lithium-carbonates>>, erişim tarihi 21.09.2022.
- [4] <https://www.metal.com/search?keyword=lithium&type=price>, erişim tarihi 23.09.2022.
- [5] <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/grafit>>, erişim tarihi 27.09.2022.
- [6] <https://eurogeologists.eu/sari-hidden-graphite-resources-in-turkey-a-new-supply-candidate-for-europe/>>, erişim tarihi 26.09.2022.
- [7] https://trendeconomy.com/data/commodity_h2/250410>, erişim tarihi 03.10.2022.
- [8] <https://oec.world/en/profile/hs/graphite>>, erişim tarihi 04.10.2022.
- [9] <https://www.globaldata.com/store/report/graphite-mining-market-analysis/>>, erişim tarihi 05.10.2022.
- [10] <https://www.businesswire.com/news/home/20211101005424/en/Global-Graphite-Market-Industry-Analysis-2021-2025-Natural-Graphite-Show-Promise-of-Growth-as-Flake-Graphite-Finds-Application-in-Vehicle-Batteries---ResearchAndMarkets.com>>, erişim tarihi 05.10.2022.
- [11] <https://www.metal.com/search?keyword=graphite&type=price>>, erişim tarihi 06.10.2022.
- [12] <https://oec.world/en/profile/hs/nickel-ore>
- [13] <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/raw-nickel/reporter/tur>
- [14] <https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/kobalt>
- [15] [https://oec.world/en/profile/hs/cobalt#:~:text=Exports%20In%202021%20the%20top,%2C%20and%20Belgium%20\(%24189M\)](https://oec.world/en/profile/hs/cobalt#:~:text=Exports%20In%202021%20the%20top,%2C%20and%20Belgium%20(%24189M))
- [16] <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/cobalt-ore/reporter/tur?redirect=true>
- [17] <https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/kobalt>
- [18] <https://tradingeconomics.com/commodity/manganese>
- [19] <https://imib.org.tr/>
- [20] <https://tradingeconomics.com/commodity/iron-ore>
- [21] <https://tradingeconomics.com/commodity/titanium>
- [22] <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/kuvars>
- [23] <https://www.oakrocks.net/brazil-rocks-and-minerals/>
- [24] <https://oec.world/en/profile/hs/silica-sands-and-quartz-sands>
- [25] <https://oec.world/en/profile/sitc/quartz-572785>
- [26] <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/quartz/reporter/tur>
- [27] <https://www.fortunebusinessinsights.com/silica-sand-market-105302>
- [28] <https://www.rsc.org/periodic-table/element/13/aluminium>
- [29] https://trendeconomy.com/data/commodity_h2/760110
- [30] <https://www.ceicdata.com/en/indicator/turkey/aluminum-exports>
- [31] <https://www.metal.com/search?keyword=bauxite&type=price>
- [32] <https://www.metal.com/Aluminum/201106140030>
- [33] <https://www.statista.com/statistics/1251275/phosphate-rock-fertilizer-price-forecast/#:~:text=The%20price%20of%20phosphate%20rock,dollars%20per%20ton%20by%202024.>>, erişim tarihi 26.11.2023.
- [34] <https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/bakir>
- [35] https://www.dimecc.com/wp-content/uploads/2019/06/DIMECC_PUBLICATIONSSERIES_17_SIMP.pdf





ANOT MALZEMELERİ

İ. Tunç¹, Ö. Eroğlu², D. M. Bulut², S. Özen², E. Bayram³, C. H. Yılmaz⁴, N. Karatepe Yavuz² [+]

ÖZET

Dünya genelinde karbon emisyonlarının azaltılması hedefi doğrultusunda, elektrikli araçlara geçişte büyük ilerlemeler kaydedilmekte ve bu süreçte pil üreticileri, elektrikli araç bataryalarında kullanılan malzemelerin performansını artırmak için yoğun çaba harcamaktadır. Batarya bileşenlerinin geliştirilmesi ile birlikte, düşük ağırlıklı, yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip batarya paketlerinin üretimi artacak ve bu da elektrikli araçların yaygın olarak tercih edilmesine öncülük edecektir.

Bataryaların performansını belirleyen ve alt bileşeni olan anotlar, hafif ve yüksek enerji yoğunluklu bataryaların üretiminde önemlidir. Bu kapsamda bataryalarda kullanımına uygun düşük maliyetli, yüksek kapasite ve elektrokimyasal performansa sahip potansiyel anot elektrot aktif malzeme seçenekleri oluşturulmaya çalışılmaktadır.

İdeal bir anot malzemesinin lityum/ lityum iyonuna göre düşük potansiyele, yüksek özgül kapasiteye, yüksek yapısal kararlılığa, iyi elektronik ve iyonik iletkenliğe sahip olması beklenmektedir. Li iyon pil tarihi incelendiğinde kullanılan ilk anot lityum metali olmuştur ancak bu malzemedeki güvenli olmaması sebebiyle vazgeçilmiştir ve yerini karbon esaslı malzemeler almıştır. Günümüzde ticari olarak en yaygın kullanılan anot, grafitir. Son yıllarda ise silisyum yüksek kapasitesi nedeniyle ilgi çekse de henüz ticari olarak sadece silisyum esaslı anot kullanımı gerçekleşmiştir. Silisyumun avantajlarını anot tasarımına katıp dezavantajlarını minimum seviyeye indirmek için silisyum-grafit kompozit anotlar ticarileştirilmiştir.

Özetle, gelecek anot teknolojileri, yüksek kapasite ve enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü, hızlı şarj/deşarj sağlayarak grafitin yerini alabilecek yeni anot malzemelerine bağlıdır. Elektrikli araçların gereksinimlerini karşılamak için geliştirilen bataryalar, silisyum temelli anotlar gibi alternatif malzemelerin teknolojik gelişmelerine dayanacaktır.

[+] kmnilgun@itu.edu.tr

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Maslak, 34469 İstanbul, Türkiye.

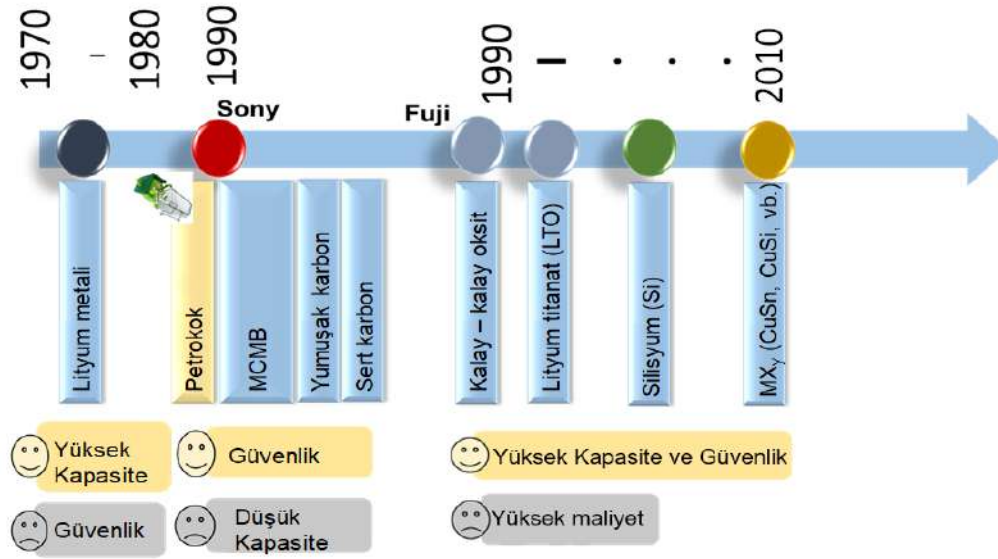
2 İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Maslak, 34469 İstanbul, Türkiye.

3 Akdeniz Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Dumlupınar Bul. Kampüsü, Konyaltı, 07058 Antalya, Türkiye.

4 Mutlu Akü, Eski Ankara Yolu Cad. No:210, Tuzla, 34959 İstanbul, Türkiye.

1. LİTYUM İYON BATARYA (LİB) ANOT MALZEMELERİ

Lityum iyon (Li iyon) bataryalarda ilk kullanılan anot aktif malzemesi lityum metalidir. Ancak lityumun sağladığı yüksek kapasiteye rağmen güvenlik problemleri sebebiyle kullanımı son bulmuş ve karbon esaslı malzemeler ön plana çıkmıştır. Grafit anotlar ilk defa 1991’de Sony’nin ticari pillerinde kullanılmış ve ardından günümüze kadar en yaygın kullanılan anot malzemesi olmuştur. 1990’lardan itibaren grafitte kıyasla daha yüksek kapasite sunan kalay/kalay oksit anotlar, sağladığı yüksek güvenlik ile dikkat çeken lityum titanat anotlar, son dönemlerde ise silisyum ve farklı bileşimdeki alaşımların (CuSn, CuSi, vb.) anot aktif malzeme olarak kullanımına yönelik çalışmalar artmıştır. Li iyon bataryalarda genel olarak kullanılan anot malzemeleri Şekil 1’de sınıflandırılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi anot malzemelerin tasarım kriterlerinin başında güvenlik daha sonra ise anot aktif malzemenin kapasitesi gelmektedir.

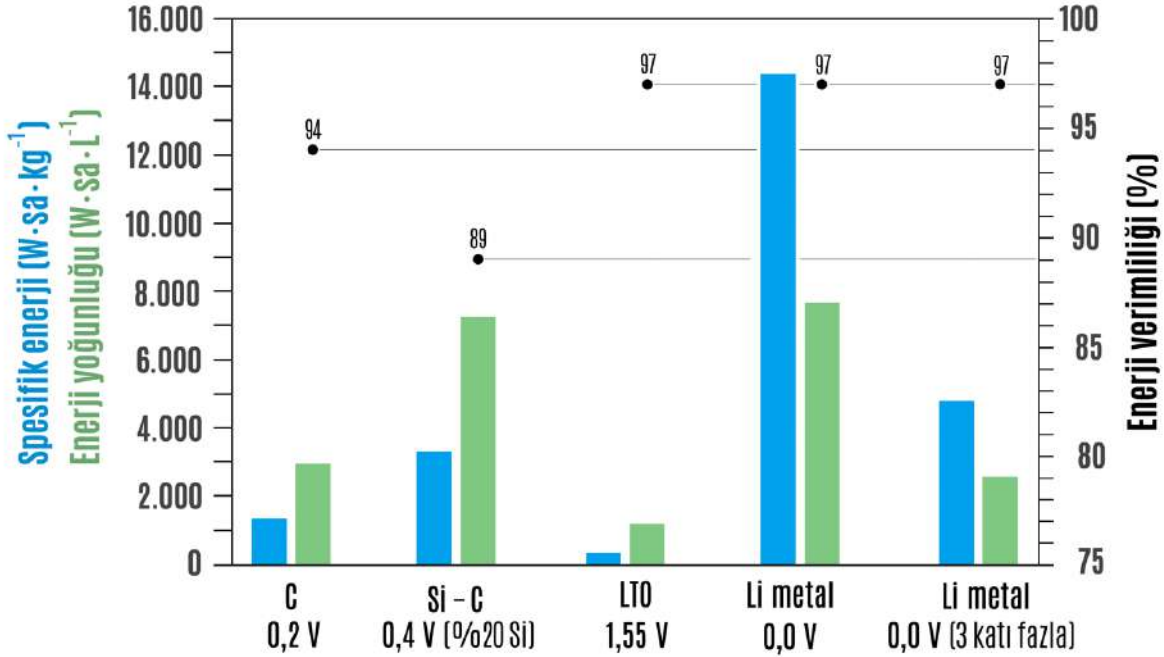


Şekil 1. Geçmişten günümüze anot aktif malzemeler

Tablo 1’de en yaygın kullanılan anot malzemelerinin özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu malzemeler arasından metalik lityum ve silisyum yüksek teorik kapasiteleri ile ön plana çıkarken, grafit anotlar lityuma karşı sahip olduğu düşük çalışma potansiyeli ile lityum titanat ise hacimce düşük değişim göstermesi ile dikkat çekmektedir. Anot malzemelerinin performans kıyaslamaları ise Şekil 2’de sunulmuştur. Buna göre en yüksek spesifik enerji değeri metalik lityuma aitken, enerji yoğunluğu açısından kıyaslandığında metalik lityum ve Si-C kompozit anotlar benzer performans göstermektedir.

Tablo 1. En yaygın kullanılan anot aktif malzemelerin kıyaslaması (Zhang vd. 2022)

Malzeme Özellikleri	Li	C	$Li_4Ti_5O_{12}$	Si
Yoğunluk ($g \cdot cm^{-3}$)	0,53	2,25	3,5	2,33
Lityum Eklenmiş Yapı	Li	LiC_6	$Li_7Ti_5O_{12}$	$Li_{4,4}Si$
Teorik Kapasitesi ($mA \cdot sa \cdot g^{-1}$)	3.862	372	175	3.579
Teorik Şarj Yoğunluğu ($mA \cdot sa \cdot cm^{-3}$)	2.047	837	613	9.786
Hacim Değişimi (%)	100	12	1	320
Lityuma Karşı Potansiyeli (V)	0	0,25	1,6	0,4



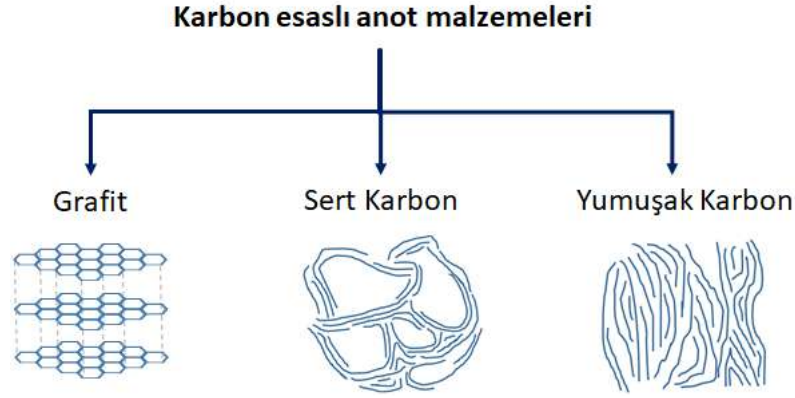
Şekil 2. Anot malzemelerinin performans özellikleri (Schmuck vd. 2018)

1.1. Metalik Lityum

Li iyon pillerde kullanılan ilk anot malzemesi olan lityum metali, $3860 \text{ mA}\cdot\text{sa}\cdot\text{g}^{-1}$ lık ultra yüksek teorik kapasitesi nedeniyle ilk keşfedildiği dönemden itibaren yoğun olarak araştırılmasına rağmen ticarileşmiş metalik lityum anotlar günümüzde hala geliştirilememiştir. Bunun ilk ve önemli nedeni tekrarlı şarj/deşarj aşamaları sırasında elektrodun yüzeyinde büyüyen dendrit (iğnesel) yapılarıdır. Bu yapılar pilindeşarj sırasında anot yüzeyinde oluşmaya başlayarak seperatörü delip katoda ulaşır hücrede kısa devre ve sonrasında yangınlara sebep olmaktadır. Diğer bir sebep ise düşük Kulombik (Coulombic) verimdeşarj ve şarjda elde edilen kapasitelerin oranlarının eşit olmayışıdır (Xu vd. 2014). Li metalinin güvenlik riski, yüksek reaktivitesi ve düşük ergime noktası ($180 \text{ }^\circ\text{C}$) nedeniyle çok yüksektir; 1989'da Moli Energy'ye ait Li-metal hücresinin patlaması bu risklerin varlığını göstermiştir. Li iyon pillerde yüksek kapasiteli bir anot olarak Li metalin başarılı bir şekilde kullanılması, sadece kararlı elektrolitlerle mümkündür. Bolloré tarafından geliştirilen Li-Polimer Batarya (Bolloré Sistemi) sisteminde, Polietilen oksit (PEO) içinde lityum tuzu içeren katı bir polimer elektrolit kullanılır (Chen vd. 2023). Anot üzerinde SEI (solid-electrolyte interphase: katı-elektrolit arayüzeyi) oluşumunun olmaması ve yanıcı bir elektrolit yapısı bulunmaması nedeniyle sistem güvenilir hale getirilmiştir. Ancak, Li metali kullanmanın önündeki en büyük engel, pil kapasitesini ve çevrim ömrünü güçlü bir şekilde etkileyen büyük hücre direncidir. Direnç; elektrot/ katı elektrolit ara yüzeyi ve elektrotlarda meydana gelmektedir (Bknz. Elektrolit Bölümü). Metalik Li ile kararlı çalışan elektrolitlerin geliştirilmesi, lityumu gelecekte özellikle Li-S ve Li-hava sistemlerinde anot malzemesi olarak daha ilgi çekici hale getirecek ve bu pillerin pazara girmesini hızlandıracaktır. Li metali ile ilgili detaylı bilgi, Bölüm 14 "Lityum İyon Sonrası" kısmında verilmiştir.

1.2. Karbon Temelli Malzemeler

Karbon temelli anot aktif malzemeleri, hafif olmaları, yapısal ve kimyasal olarak kararlılıkları, doğada bol miktarda bulunmaları, diğer anot malzemelerine kıyasla daha düşük maliyetine sahip olmaları nedeniyle mevcut ticari bataryalarda yaygın olarak kullanılan anot aktif malzemelerdir. Karbon esaslı malzemeler atomların uzun mesafelerde dizilimi açısından kristalin (grafitize edilmiş) ve amorf (grafitize edilmemiş) olarak iki gruba ayrılabilir. Amorf karbonlar, sert ve yumuşak karbon olarak kendi içlerinde sınıflandırılabilir. Yumuşak karbonlar yüksek sıcaklıklardaki ısıl işlemler ile grafit benzeri yapılara dönüştürülebilirken, aynı işlem sert karbonlar için mümkün değildir. Karbon esaslı malzemelerin şematik çizimleri Şekil 3'te, özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Karbon esaslı anot malzemeleri

Tablo 2. Karbon esaslı anot aktif malzemelerin kıyaslaması (Xie vd. 2021)

Malzemeler	Grafit	Sert Karbon	Yumuşak Karbon
Hammadde	Doğal grafit, petrokok, katran	Reçine, katran, biyoatık	Kok zifti, petrokok
Karbonizasyon sıcaklığı (°C)	2.500-3.000	<1.500	1.000-1.500
Yoğunluk (g·cm⁻³)	~2,2	1,4-1,8	~2,2
Teorik Kapasite (mA·sa·g⁻¹)	372	500-700	372
Elektrodun hacim artışı (%)	~10	~1	1-10
Başlangıç kulombik verimliliği	Çok iyi	Zayıf	Çok iyi
Maliyet	Düşük	Yüksek	Orta
Yaygın uygulama alanı	Li iyon bataryalar	Li/Na/K iyon bataryalar	Li iyon bataryalar

Grafit, karbon atomlarının düzenli bir şekilde dizilimi sayesinde yüksek kristaliniteye ve elektrik iletkenliğine sahip, en eski ve yaygın kullanılan anot aktif malzemedir. Grafitin Li iyon bataryalarda anot olarak kullanımı ilk defa Yazami ve Touzain tarafından 1983'te keşfedilmiş olup, Sony tarafından 1991 yılında ticari ürünlerde kullanılmaya başlamıştır (Yazami ve Touzain, 1983). Şekil 2'de görüldüğü gibi grafit, karbon atomlarının bal peteği yapısında dizilimi ile oluşan grafen katmanlarının Van der Waals bağları ile birbirine bağlanması sonucu ortaya çıkan katmanlı yapıya sahiptir. Grafitin elektrokimyasal aktivitesi lityum iyonlarının bu grafen katmanları arasında depolanmasına dayalıdır.

Grafit esaslı malzemeler, cevher olarak madenden çıkartıldığında doğal grafit, karbon esaslı başlangıç malzemelerinin yüksek sıcaklıkta proses edilmesi ile üretildiğinde ise sentetik grafit adını alır. Partikül boyutu, morfoloji, karbon içeriği gibi parametreler grafit elektrotların performansını etkileyen ana faktörlerdendir. Elektrikli araç sektöründe sentetik grafit, doğal grafitte göre daha yüksek kapasite ve çevrim ömrüne sahip olduğundan EA bataryalarında anot malzemesi olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, bu malzemelerin sahip olduğu sınırlı özgül kapasite (372 mA·sa·g⁻¹) yüksek enerji yoğunluklu batarya uygulamalarında kullanımlarını sınırlamaktadır (Bknz. Tablo 1).

Gelecekte karbon temelli anot malzemeleri arasında anot olarak kullanılması öngörülen adaylardan biri de "grafitleşmemiş" özelliğiyle karakterize edilen, katı bir karbon formuna sahip, ısı ile grafitte dönüştürülemeyen sert karbondur. Küçük boyuttaki grafitik bölgelerin düzensiz olarak biraraya gelmesi ile tanımlanabilecek sert karbonlar, gözenekli yapıları sayesinde grafitte kıyasla daha düşük hacimsel değişim gösterirken yapıdaki hatalar grafitte kıyasla daha yüksek teorik kapasiteye sahip olmalarını sağlar. Ancak, bu hatalı bölgeler aynı zamanda elektrot yüzeyinde SEI oluşumunu da etkileyerek düşük Kulombik verime ve tersinmez kapasite kayıplarına da neden olmaktadır. Bu nedenle yakın zamanda sert karbonların ticari olarak kullanılan grafit anotların yerini alması beklenmemektedir (Babu vd. 2020).

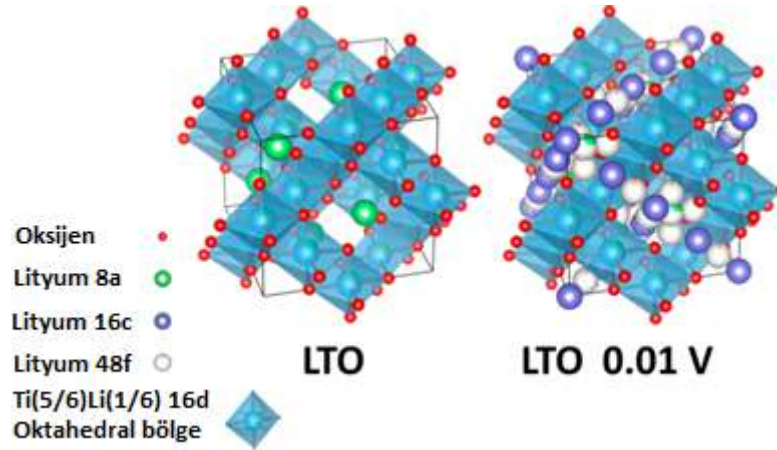
Son olarak yumuşak karbonlar, ısıl işlem koşullarına bağlı olarak düzlemler arası mesafelerin değiştirilebilmesi sayesinde sert karbonlara kıyasla daha yüksek elektrik iletkenliği göstermektedir. Ancak bu malzemelerin tersinmez kapasite kaybı grafit elektrotlara kıyasla oldukça yüksektir.

Karbon esaslı anot malzemeleri arasında grafit, sert ve yumuşak karbonlara kıyasla anot aktif malzeme olarak kullanım açısından en avantajlı konumdadır. Ancak, hem doğal hem de sentetik grafit anotlar, teorik kapasite ve şarj/deşarj performansı açısından teknolojik gelişmelerle evrilebilecekleri en üst noktaya ulaşmıştır. Belirtilen nedenlerle, elektrikli araçlarda kullanılmak üzere daha üstün performanslı bataryaların geliştirilmesine katkı sağlayacak yeni alternatiflerin geliştirilme çalışmaları devam etmektedir. Son yıllarda, yüksek yüzey alanına sahip hacimsel değişimi tolere edebilecek olan karbon nanotüp, karbon fiber ve grafen temelli anot malzemelere yönelik araştırmalar da önem kazanmıştır.

Ülkemizde 2010 yılında Manisa'da kurulan Spil Madencilik, başta metal madenler olmak üzere, özellikle grafit ve vanadyum gibi kritik hammaddelerin madenciliği konusunda çalışmalar yapmaktadır. Türkiye'de doğal pul grafit üretimi üzerine çalışmalara devam edilmektedir. Karabacak Madencilik firmasının da pillerde kullanılacak özellikte grafit üretmek için çalışmaları olduğu bilinmektedir (Int. Kyn. 1)

1.3. Lityum Titanat ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

Lityum titanat (LTO) malzemesi, Li iyon piller için anot malzemesi olarak büyük ilgi görmektedir. Grafit elektrotlara kıyasla dendrit oluşumu riskinin daha düşük olması, ağır hibrit ve elektrikli araçlar için güvenli bir alternatif olmasına neden olmuştur. Tablo 1'de görüldüğü gibi LTO anotların dezavantajı olan düşük teorik kapasite ($175 \text{ mA}\cdot\text{sa}\cdot\text{g}^{-1}$) ve zayıf iletkenliği nano boyutlandırma ve karbon kaplama gibi yöntemlerle önemli ölçüde artırılabilir. LTO'nun farklı kristal yapıları (Spinel, Nasicon ve Rutil) bulunmaktadır. En yaygın kullanılan spinel yapıdır ve yapısı Şekil 4'te görüldüğü üzere bir $\text{Fd}\bar{3}\text{m}$ uzay grubu, kübik bir simetri ve $0,8364 \text{ nm}$ 'lik bir kafes sabiti ile açıklanmaktadır (Zhang vd. 2022).



Şekil 4. LTO'nun özgün ve deşarj edilmiş durumdaki kristal yapısı (Liu vd. 2019)

LTO, spinel yapıda kristalleşir. Tam şarj durumunda LTO malzemesi, yapısını $\text{Li}_7\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ yapısına dönüştürerek, birim hücre hacminde sadece küçük bir genişleme ($\sim\%0,2$) meydana getirir. Bu tür davranışa "sıfır gerinim ekleme davranışı" denir. Buna karşılık grafit, şarj sırasında $\sim\%10$ 'luk bir genişleme gösterir. LTO'nun kafes boyutu şarj/deşarj sırasında değişmez, bu da yüksek bir termal ve mekanik kararlılığa yol açar. Grafitten diğer bir farkı ise SEI oluşumunun olmamasıdır. SEI tabakası, organik bileşiklerin $<1 \text{ V}$ 'a indirgenmesiyle oluşur. Ancak LTO daha yüksek potansiyelde çalışır ve dolayısıyla yapı üzerinde SEI oluşmaz. LTO, yaygın olarak kullanılan elektrolitler de termodinamik olarak stabildir ve bu nedenle Li dendrit oluşum riski düşüktür. Tüm bu faktörler, hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda yüksek kararlılıkla çalışmaya olanak tanır (Zhang vd. 2022).

Lityum titanatın farklı kristal yapıları, lityum iyon pil performansını etkileyebilir.

Spinel Yapısı ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$): Bu yapı, genellikle yüksek çevrim ömrü, güvenlik ve düşük termal genişleme katsayısı gibi avantajlara sahiptir. Ancak, enerji yoğunluğu diğer malzemelere kıyasla düşük olabilir.

Nasicon Yapısı ($\text{Li}_{1+x}\text{Ti}_{2-x}\text{Al}_x(\text{PO}_4)_3$): Bu yapı, genellikle yüksek iletkenlik ve düşük gerilim kaybı gibi özelliklere odaklanır. Bu, pilin enerji yoğunluğunu artırabilir, ancak çevrim ömrü ve güvenlik konularında bazı sınırlamalara yol açabilir.

Rutil Yapısı (Li_2TiO_3): Bu yapı, lityum titanatın diğer bir kristal yapısıdır. Rutil yapısının, belirli kullanım senaryolarında özellikle yüksek voltaj uygulamalarında avantajlı olabileceği düşünülmektedir.

LTO'nun her kristal yapısının kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır ve performansları, özellikle enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, şarj/deşarj hızı ve güvenlik gibi kriterlere bağlı olarak değişebilir. LTO anot malzemelerinin reaksiyon mekanizması hala incelemeye devam edilmekle birlikte elektrolit içinde 400°C 'ye kadar ısıtılan LTO anot malzemesinin herhangi bir yapı değişikliği göstermediği gözlenmiştir (Zhang vd. 2022).

LTO'nun termal stabilitesini hücre seviyesinde incelemek amacıyla, Takami vd. (2013), grafit/ LiCoO_2 (grafit anot/lityum kobalt oksit katot) ve LTO/ LiCoO_2 (lityum titanat anot/ kobalt oksit katot) hücreleri üzerinde çeşitli testler gerçekleştirmiştir. Yapılan deneyler ile dahili bir kısa devre durumunda LTO anodunun grafit anoda göre daha kontrollü bir reaksiyon gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu da LTO anotların her ne kadar kapasiteleri düşük olsa da grafit anotlara göre güvenlik riskinin az olduğunu göstermektedir. Bu sebeple genelde yüksek sıcaklık ve askeri uygulamalarda tercih edilmektedir.

Li iyon hücrelerinin çevrim ve depolama sırasında çeşitli gazlar üretebildiği bilinmektedir. Genel olarak gaz oluşumu anotta ve katotta elektrolit oksidasyonunun/indirgenmesinin bir sonucudur. Eğer yüksek oranda gaz oluşumu meydana gelirse, bu durum hücrenin şişmesine, performansının düşmesine ve yanıcı ürünlerin oluşmasına neden olur, böylece hücre içerisinde oluşan gaz güvenlik için önemli bir risk haline gelir. Bazı çalışmalar, $25-50^\circ\text{C}$ aralığında depolama sırasında CO_2 , CO , CH_4 , C_2H_6 ve H_2 gibi gazların oluşumunu kanıtlamaktadır. Bu gazlar, LTO ve LiPF_6 (elektrolit tuzu) tarafından katalize edilen elektrolit ayrışmasının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır (Zhang vd. 2022).

LTO hücrelerindeki gaz oluşumunu azaltmak veya önlemek için, LTO parçacık yüzeyinin karbon veya AlF_3 (alüminyum florür) ile kaplanması bir seçenek olarak sunulabilir. Başka bir yol ise yeni kararlı elektrolitlerin kullanılmasıdır. Özetle, LTO üstün güvenlik performansına sahiptir, ancak sahip olduğu düşük özgül kapasitesi (LTO: $175 \text{ mA}\cdot\text{sa}\cdot\text{g}^{-1}$, grafit: $372 \text{ mA}\cdot\text{sa}\cdot\text{g}^{-1}$) yüksek enerjili uygulamalarda kullanılmasını engeller.

1.4. Silisyum Temelli Malzemeler

Silisyum (Si) temelli malzemeler yüksek teorik kapasiteye sahip olmaları, doğada bol miktarda bulunurluğu, çevreci ve düşük maliyetle üretilebilir olmaları nedeniyle cazip hale gelmektedir. Si temelli anotlar, silisyum ve SiO_x ($0 \leq x \leq 2$) anotlar olarak iki grupta incelenebilir (Tablo 1 ve 3) (Jiao vd. 2020).

Tablo 3. Silisyum bazlı anot malzemelerinin kıyaslamaları

Malzemeler	Silisyum	SiO	SiO_x	SiO_2
Teorik Kapasite (mA sa g^{-1})	3.579	2.600	1.965-3.579	1.965
Elektrodun hacim artışı (%)	300	150	100-300	100
Başlangıç Kulombik verimliliği	100	68,7	52,4-100	52,4
Hız performansı	Çok iyi	İyi	İyi	Zayıf
Yoğunluk ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2,32	2,13	2,13-2,65	2,65
Maliyet	Yüksek	Orta	Orta	Düşük
Güvenlik	İyi	İyi	İyi	Çok iyi

Silisyum anot, grafitte göre yaklaşık olarak on kat daha yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle EA endüstrisinin ilgisini çekmektedir. Bu anot, grafitte göre ($0,25 \text{ V vs. Li}$) daha yüksek çalışma voltajına ($0,4 \text{ V vs. Li}$) sahiptir ve bu durum hızlı çevrimler esnasında daha güvenli çalışma sağlar. Ancak, silisyumun sahip olduğu bazı sorunlar, hücrelerde tek başlarına anot olarak kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Bu sorunların başında ilk şarj vedeşarj sırasında hücre içerisinde SiO_x , Li_2O ve Li_4SiO_4 gibi bileşiklerin tersinmez bir şekilde oluşması gelir. Bu durum, hücrede önemli ölçüde kapasite kaybına neden olur. Diğer bir sorun ise silisyumun yapısına lityum girişi ile yüksek oranda (%300'e kadar) hacimce büyümesidir. Şarj vedeşarj sırasında tekrarlı olarak gerçekleşen bu büyüme ve küçülme silisyum partiküllerinde mekanik strese neden olarak partiküllerin parçalanmasına (pülverize olmasına, tozlaşmasına) ve elektrot yüzeyinden kopmasına yol açar. Bu hem aktif malzeme kaybına hem de partiküllerin parçalanması sonucu açığa çıkan yeni yüzeylerde de katı elektrolit ara fazını (SEI) oluşturarak lityum kaybına sebep olur. Buna ek olarak büyük hacimsel değişimler kristal yapının kararlılığını azaltarak düşük termal kararlılığa neden olmaktadır. Bütün bunlar silisyum anotların güvenlik ve çevrim stabilitesinde risk yaratmaktadır.

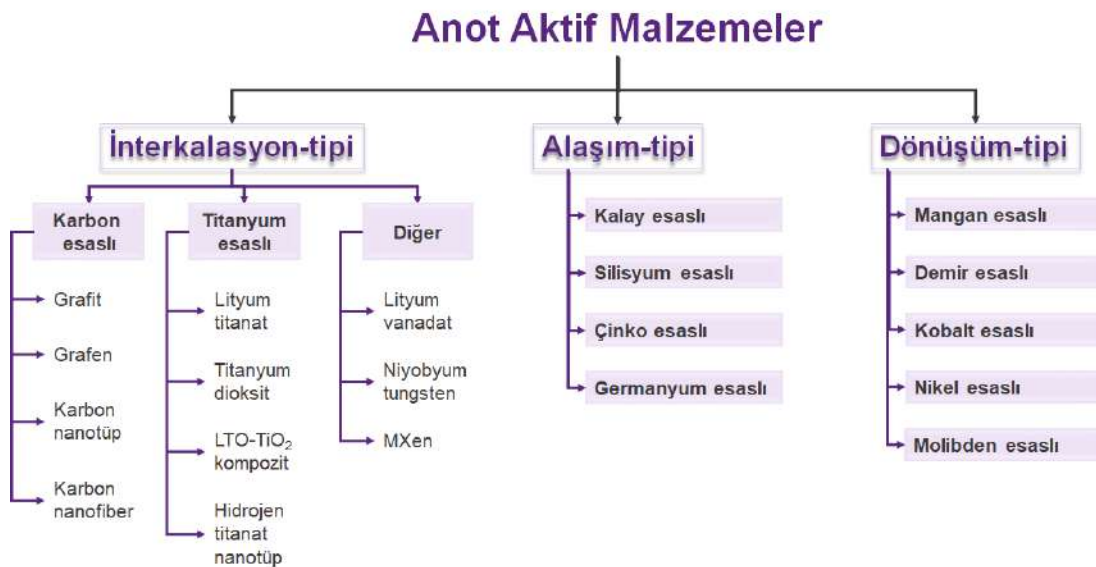
Sonuç olarak saf silisyum anot malzemesine sahip hücre sınırlı çevrim stabilitesi, kısa hücre ömrü, yüksek hacim genişlemesi ve kararsız SEI tabakası nedeniyle zayıf bir termal kararlılık sergilemektedir. Silisyum anotların performanslarının artırılması için genel olarak beş strateji kullanılmaktadır. Bunlar; yapının amorf hale getirilmesi, partikül boyutunun küçültülmesi (nano), karbon esaslı malzemelerle kaplanması, kompozit malzeme oluşturma ve alaşımlamadır.

Karbon malzemelerle (grafen, karbon nanotüp, karbon siyahı gibi) karıştırma veya kaplama işlemi, yüksek hacimce değişimleri azaltarak SEI tabakasının ve yapının stabilitesini artırır. Bu sebeple nano yapıya veya amorf Si-C ve SiO₂-C malzemelerin sentezi ve morfolojinin reaksiyon kinetiği üzerindeki iyileştirici etkileri araştırmaların odak noktasıdır (Ozen vd. 2023). Bunlara ek olarak, çevrimler sırasında hacimsel değişimlere bağlı oluşan mekanik stresin azaltılması amacıyla ince film kaplamalar, nano-tel veya çekirdek/kabuk yapıları geliştirilmektedir. Chan ve ekibi (Chan vd. 2008) buhar-sıvı-gaz (VLS, Vapor Liquid Solid) yöntemi ile paslanmaz çelik altlık üzerinde ürettiği silisyum nanotellerin aralarındaki boşluklu yapıları sayesinde çevrimler sırasında oluşan hacimsel değişimlere dayanım gösterdiğini ve kapasite korunumunu yükselttiğini göstermişlerdir. Polat ve ekibi (Polat vd. 2016) kompozisyonu dereceli olarak değişen Si-Cu film kaplamaların anot olarak kullanımını incelemiş ve kalınlık boyunca değişen kompozisyon ile yüksek performans elde edilebileceğini göstermiştir. Wu ve ekibi (Wu vd. 2012) çift katmanlı silisyum nanotüp tasarımı ile daha stabil elektrolit ara yüzeyi elde etmiş ve çevrim hızlarının önemli ölçüde yükseltilebileceğini kanıtlamışlardır. Keles ve ekibi (Keles vd. 2020) Si-Cu-Mo içeren süperlatis yapıya çok katmanlı ince film kaplamaların lityum iyon bataryalarda anot olarak kullanımını kapsayan çalışmada ve 2A g⁻¹ akım yükü altında dahi 1500 mA·sa·g⁻¹ spesifik kapasite elde etmiştir. Bu tasarım patent ile koruma altına alınmıştır (Chen vd. 2023). Elde edilen sonuçlar ticari bataryalarda ince film anotların kullanım potansiyellerinin gösterimi açısından da önem taşımaktadır. Buna ek olarak silisyum anotların performansının iyileştirilmesi amacıyla grafit ve grafen kaplamalar (Li vd. 2016, Lu vd. 2015), karbon-silisyum gözenekli yapılar (Sun vd. 2016), yeşil sentez çalışmaları ve elektrolit katkıları da bu alanda öne çıkan araştırma konularındandır.

Şu anda birçok EA için ticari olarak üretilen, yaklaşık %2-10 oranında silisyum içeren grafit anotlar ile daha yüksek kapasite kazanımı elde edilmektedir (Salem vd. 2019, Yang vd. 2021, Xu vd. 2021). Bu tür anotlar, özellikle Tesla gibi bazı elektrikli araç modellerinde anot malzemesi olarak tercih edilmektedir (Int. Kyn. 2). Buna ek olarak SiO ve SiO_x kimyasına sahip anot içeren ticari piller de üretilmeye başlanmıştır (Int. Kyn. 3).

2. LİTYUMLA REAKSİYON MEKANİZMASINA GÖRE ANOT AKTİF MALZEMELER

Anot aktif malzemeler lityum ile girdikleri reaksiyon mekanizmasına göre 3 ayrı gruba ayrılır. Şekil 5'te görüldüğü gibi bunlar interkalasyon (intercalation), alaşım (alloying) ve dönüşüm (conversion) reaksiyonları olarak sınıflandırılabilir (Hossain vd. 2023).



Şekil 5. Reaksiyon mekanizmasına göre anot aktif malzemeler.

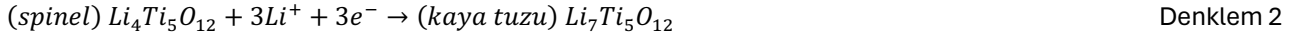
2.1. İnterkalasyon-tipi Anotlar

Grafit, grafen, karbon nanotüp gibi karbon bazlı ve lityum titanat, titanyum dioksit gibi titanyum bazlı anot aktif malzemelerinin olduğu gruptur. MXen, niyobyum tungsten, lityum vanadat (vanadyum oksit) gibi malzemeler de bu gruba dahildir. Lityum yapıya girişi sırasında ana malzeme ile reaksiyona girmeyip, kafes veya katmanlar arası boşluğa yerleşir.

Grafit anotlarda, şarj sırasında Denklem 1’de verilen reaksiyon ile lityum iyonları grafen katmanlarının arasındaki boşluklara yerleşir ve lityumca zengin grafit yapısını oluşturur. Bu yapı 372 mA·sa·g⁻¹ gravimetrik kapasite ve 850 mA·sa·cm⁻³ hacimsel kapasite sağlar (Ohzuku vd. 1993).



Lityum titanat (LTO) anot aktif malzemelerinde ise yapıya lityumun girişi sırasında 3 adet Ti⁴⁺ iyonu Ti³⁺ iyonuna indirgenir, bu sırada spinel-LTO yapısı ise kaya tuzu yapısına dönüşür (Denklem 2) (Zhang vd. 2022).

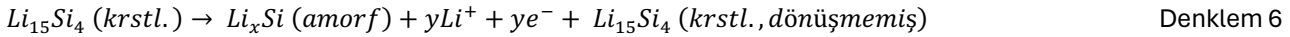
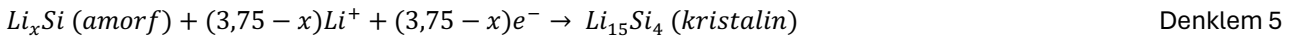


2.2. Alaşım-tipi Anotlar

Silisyum ve SiO_x, kalay oksit, germanyum gibi malzemeleri içeren bu grupta, malzemeler yapılarına lityum girerken alaşım oluştururlar ve bu sayede daha yüksek teorik kapasite değerleri elde edilir. Bu tip malzemelerde (M= Si, Sn, Zn, Al, Ge, Mg, Pb, vb.) lityumun yapıya girişi sırasında Denklem 3’teki reaksiyon gerçekleşir (Winter ve Besenhard, 1999).



Bu grubun en dikkat çeken üyesi olan silisyum 3.579 mA·sa·g⁻¹ teorik kapasiteye (oda sıcaklığında ulaşılabilen) sahiptir. Silisyum anotların lityum ile reaksiyonu birden fazla aşamada gerçekleşir. İlk çevrimde 0,05-0,2 V arasında kristalin silisyumun lityum iyonları ile reaksiyona girmesi sonucu Li_xSi oluşumu gözlenir. Devamında voltajın 0,05 V’nin altına düşmesi ile amorf yapıdaki Li₁₅Si₄ kristalin forma dönüşür. Yapıdan lityumun çıkışı sırasında ise öncelikle kristalin Li₁₅Si₄ amorf yapıya dönüşür, ardından amorf yapıda silisyum oluşur. Devam eden çevrimlerde yapıya lityumun girişi/çıkışı amorf silisyum ve Li₁₅Si₄ oluşumu ile gerçekleşir (Jiao vd. 2020). Bu reaksiyonlar Denklem 4-7’de verilmiştir (Feng vd. 2021).



SiO ve SiO_x yapılarda ise yapıya lityumun girişi ile farklı lityum silikat yapılar (Li₂SiO₃, Li₆Si₂O₇, Li₂SiO₅, vb.) ve metalik silisyum oluşur. Gerçekleşen reaksiyonlardan sadece metalik silisyum ve Li₂SiO₅’in oluşumu tersinirdir. SiO ve SiO_x yapılarda görülen düşük başlangıç kulombik verim bu tersinmez reaksiyonlarla açıklanabilir (Jiao vd. 2020).

2.3. Dönüşüm-tipi Anotlar

Bu gruptaki malzemelerde, lityum iyonları ile geçiş metali katyonlarının arasındaki tersinir yer değiştirme redoks reaksiyonları ile yapıda lityumun depolanması gerçekleştirilir. Birçok geçiş metal oksit, selenür, florür, nitrür, sülfid ve fosfit yapıları dönüşüm tipi anotlar olarak araştırılmıştır.

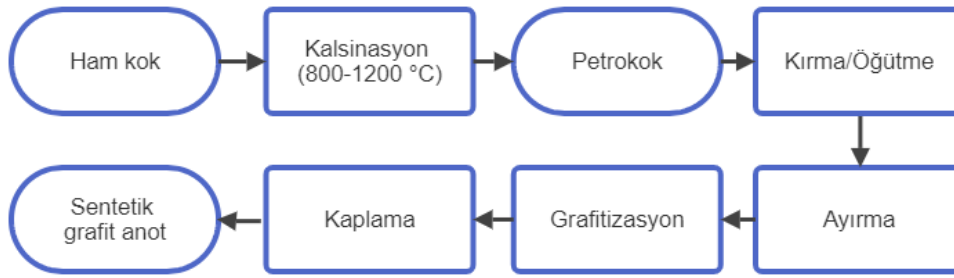
Grubun en çok araştırılan üyelerinden biri olan demir esaslı malzemeler düşük toksisite, doğada yüksek bulunurluk ve ekonomik olarak avantajlı olmaları ile ön plana çıkmaktadır. Demir esaslı anot malzemeleri arasında en yaygın olarak çalışılanlar hematit (α-Fe₂O₃, teorik kapasite: 926 mA·sa·g⁻¹) ve manyetit (Fe₃O₄, teorik kapasite: 1.007 mA·sa·g⁻¹) lityum depolama mekanizmaları Denklem 8 ve 9’da verilmiştir (Fadillah vd. 2023).



3. TİCARİ ANOT AKTİF MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Mevcut ticari Li iyon pillerde karbon temelli anot olarak sentetik/yapay grafitler (SG'ler), doğal grafitler (DG'ler) ve amorf (sert ve yumuşak) karbonlar kullanılmaktadır. Özellikle elektrikli araç uygulamalarında SG'ler DG'lere kıyasla olağanüstü yüksek saflık seviyeleri ve standart kalite sunma özellikleri ile öne çıkmaktadır. Çoğu zaman fiyat/performans oranını optimize etmek için amorf ve grafitik karbonların karışımları kullanılır. Mevcut bazı ticari hücrelerde (Panasonic veya Hitachi Maxell-Kopin), enerji yoğunluğunu artırmak için karbon anoda az miktarda silisyum, güç yoğunluğunu artırmak için ise (Toshiba) lityum titanat (LTO) eklenmektedir (Blomgren 2017). Lityum metal anotlar, özellikle seramik veya polimerik elektrolitler kullanan katı hal bataryalarında gelecek vaat eden en önemli anot malzemesi olarak kabul edilmektedir ve Bolloré firması tarafından Li metal polimer bataryalar ticari olarak üretilmiştir. Mevcut lityum iyon bataryalarda %43 SG, %46 DG ve %7 amorf karbon kullanımı ile karbon bazlı anot malzemelerin baskınlığı açıkça görülmektedir (Schmuck vd. 2018). Buna karşılık, LTO ve Si bazlı anot malzemelerinin her birinin payı sadece %2 civarındadır (Schmuck vd. 2018).

SG'nin işlenmesi üç ana adımda gerçekleştirilir (Şekil 6). İlk olarak, kok kömürü gibi bir öncül malzeme, 800-1200 °C'de kalsinasyon işlemiyle “yumuşak (grafitleştirilebilir) karbon” olarak adlandırılan bir ara ürüne dönüştürülür. Yumuşak karbon daha sonra kırma ve öğütme işlemine tabi tutulur ve tane boyutlarına göre sınıflandırılır. Malzeme, soğutma aşamaları da dahil olmak üzere, ikinci bir adımda 2500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, birkaç gün ile hafta boyunca grafitleştirilir. Tipik olarak, tane boyutunu optimize etmek için öğütme, sınıflandırma ve nihayetinde kaplama yoluyla üretim işlemi gerçekleştirilir (Korthauer 2013).



Şekil 6. Sentetik grafit anot üretim akış şeması

NG üretimi, grafit cevherlerinin üretilmesi ve özellikle flotasyon (yüzdürme) yöntemiyle pul grafit tanelerinin konsantrasyon hale getirilmesiyle başlar (Şekil 7). Bu sayede ana safsızlıklar olan Si, S, K, Na esaslı vb. istenmeyen mineraller uzaklaştırılarak yaklaşık %95 saflık seviyelerine ulaşılabilir. Daha sonra grafit pulları, mikrometre boyutlarında küresel partiküller elde etmek için özel öğütme teknikleriyle işlenir. Mekanik işlem sonrasında, safsızlık içeriğini 500 ppm'in altına düşürmek amacıyla hidroflorik asitle liçleme veya 2.000 °C'nin üzerinde ısıtma işlemi gibi yaş kimyasal ve/veya termal saflaştırma işlemleri uygulanır (Dunn vd. 2015). SG işlemeye benzer şekilde, son adım partikül arıtmaya odaklanır. Karbon kaplama işlemi, iyi performans sağlamak için oldukça önemli bir adımdır (Wang vd. 2002). Karbon kaplama, grafit partiküllerin yüzeyini modifiye ederek çevrimler esnasında oluşan SEI katmanının daha ince olmasını sağlar. Bu şekilde daha yüksek çevrim performansları elde edilebilir (Natarajan vd. 2000). SG'nin fiyatı (~13 \$·kg⁻¹), NG'nin fiyatından (~8 \$·kg⁻¹), yaklaşık %60 daha yüksektir. Bu fark çoğunlukla grafitleştirme sırasındaki enerji maliyetiyle ilgilidir. Diğer taraftan fiyatların talep ve jeopolitik koşullara bağlı olarak değişkenlik göstereceği akılda tutulmalıdır. NG, ABD, Çin ve Avrupa dahil olmak üzere çeşitli devletler tarafından kritik, stratejik bir malzeme olarak kategorize edilmiştir.



Şekil 7. Doğal grafit anot üretim akış şeması

Si-C ve SiO_x-Si-C kompozit anot malzemelerinin laboratuvar ölçeğinde hazırlanmasına yönelik çeşitli raporlar yayınlanmış olsa da, ticari üretim süreçleri hakkında kamuya açık çok fazla bilgi bulunmamaktadır. Şimdiye kadar anoda yalnızca düşük oranda (< ağırlıkça %5) Si veya SiO_x eklendiği bilinmektedir. Si bazlı anot malzemeleri için pratik olarak uygulanan iki üretim süreci bulunmaktadır; ilk yöntemde Si nanopartikülleri tipik olarak plazma gaz fazı senteziyle, örneğin silanların piroliziyle hazırlanırken, diğer yöntemde SiO_x partikülleri öğütme veya gaz fazı reaksiyonlarıyla

gerçekleştirilebilen SiO veya SiO₂ öncüllerinin indirgenmesiyle elde edilir. Daha sonraki adımda, üretilen Si bazlı aktif malzemeleri, grafit veya karbon öncülleri ile karıştırılmalı ve ardından ek karbonizasyon ve öğütme prosedürleri uygulanarak bir karbon matrisine gömülmelidir. Son adımda, kompozit partiküller, spesifik yüzey alanını dolayısıyla elektrolitle temasını azaltmak amacıyla karbon kaplama ile yüzey özellikleri daha da optimize edilebilir (Liang ve MacNeil 2011).

Li metal üretimi çeşitli doğal hammaddelerden başlayabilir. Ancak çoğunlukla ilk olarak buharlaştırma yoluyla konsantre edilen ve saflaştırmadan önce LiCl'e dönüştürülen tuzlu sulardan başlar. Yüksek oranda saflaştırılmış ergimiş susuz LiCl, elektroliz yoluyla Li metaline dönüştürülür. Distilasyon, örneğin Na gibi düşük ergime noktalı safsızlıkların giderilmesi için kullanılabilir. Ardından, Li metal folyo haline getirilir, bu adım ekstrüzyon ve/veya haddeleme yöntemleriyle gerçekleştirilir. Bu süreçte saflık ve kalınlık en önemli parametrelerdir. (Dunn vd. 2015). Son olarak, Li metal folyo; gaz işlemi, polietilen mum tabakası ile kaplama veya yüzey florlama gibi yüzey pasivasyonu işlemleri ile stabilize edilir.

Metalik Li için son zamanlarda yaşanan fiyat dalgalanmaları, maliyet endişelerine yol açmıştır. 50-130 \$·kg⁻¹lık Li metal külçe (10-25 \$·kg⁻¹ fiyatlı Li₂CO₃ hammaddesindeki Li'ye dayalı olarak) ve ince folyolara işleme maliyetleri göz önüne alındığında, bir Li folyo fiyatı 300-400 \$·kg⁻¹ olarak hesaplanabilir. Bununla birlikte, 100 µm'den çok daha ince folyo elde etmek için işleme tekniğine (buharlaştırma, buhar biriktirme, ekstrüzyon ve/veya haddeleme) ve hedeflenen Li folyo kalınlığına bağlı olarak 1.000 \$·kg⁻¹'in üzerinde maliyetlere yol açabileceği de bildirilmiştir. Bu maliyetler diğer Li iyon batarya alt malzemelerinden çok daha yüksektir (100 \$·kg⁻¹'den çok daha az). Eğer Li metal üretim ve işleme maliyetleri gelecekte önemli ölçüde düşmez ve aynı zamanda Li metal elektrotlarının uygun fiyatlı şekillendirilmesini sağlayacak teknolojiler geliştirilmezse, Li metal bazlı kimyaların geleceği belirsiz olabilir. Günümüzde grafit veya karbon bazlı anotlarda silisyum içeriğini kademeli olarak artırma eğilimi gözlenirken, gelecekte Li iyon bataryalardan Li-metal bazlı katı hal bataryalara doğru daha keskin bir teknoloji değişikliği olabilir.

4. ANOT MALZEME PİYASASINDAKİ GELİŞMELER

En yaygın olarak elektronik eşyalar ve EA'larda karşımıza çıkan Li iyon bataryaların piyasa hacimleri günden güne artmaktadır. 2021 yılında 42,5 milyar dolar olan Li iyon batarya piyasa hacmi, 2022 yılında 48,8 milyar dolara yükselmiş, bu değer 2030 yılında 184,1 milyar dolara ulaşması öngörülmektedir (Custom Market Insights 2020). Li iyon batarya pazarındaki büyüme, bu pillerin önemli bileşenlerinden biri olan anot malzeme pazarında da gözlenmektedir. 2021 yılı için 8,4 milyar dolar olan anot malzeme pazarının 2026'da 21 milyar dolar seviyelerine yükselmesi ön görülürken, bu artışın ana sebebinin ise otomotiv sektöründe payı artan EA olacağı düşünülmektedir (Research and Markets 2022).

Ticari anot malzemeleri arasında doğal grafit, sentetik grafit, lityum titanat (LTO) ve silisyum esaslı anot aktif malzemeler bulunmaktadır. Bu malzemelerin içinde %84 oranla en büyük pazar payı sentetik grafitte aittir. Dünya genelindeki grafit rezervleri ve grafit üretimine katkıda bulunan ülkeler ile ilgili detaylı bilgi, "Bölüm 1 Maden Rezervleri" kısmında verilmiştir.

Grafit rezervlerinin büyük çoğunluğu Türkiye, Çin ve Brezilya'da bulunmaktadır. Ülkemiz dünya üzerinde bulunan grafitlerin %27,8'ine sahip olmasına rağmen, bu rezervlerin amorf yapıda olması grafitin anot malzemesi olarak kullanımını kısıtlamaktadır.

Sahip olduğu grafit rezervleri ve grafit işleme kapasiteleriyle Çin ve dolayısıyla Asya pasifik bölgesi sentetik grafit pazarında en baskın bölgedir. Üretimin yaklaşık %70'nin tek bir ülkede gerçekleşmesi, Çin'in artan çevre kirliliği nedeniyle üretimde küçülmeye gitmesi gibi sebepler grafit üretimi ve fiyatını doğrudan etkilemektedir. Son dönemlerde ise Kuzey Amerika bölgesi, destekleyici devlet politikaları ve batarya/elektrikli araç fabrikalarına yakın lokasyon avantajı, üretimin temiz enerji kaynaklarıyla gerçekleştirilmesi için yapılan yatırımlar gibi etkenlerle anot pazarında artan bir öneme sahiptir.

Grafit, artan önemi ve genişleyen kullanım alanları nedeniyle 2020 yılında kritik hammadde listesine dahil edilmiş ve 2022 itibarıyla aynı listedeki yerini korumuştur. Ayrıca, elektrikli araç üretimindeki artış nedeniyle 2023 yılından itibaren grafit talebinin karşılanamayacak seviyeye ulaşacağı öngörülmektedir. 2026 yılına kadar grafit talebinin ise dünya çapındaki yıllık üretimden 400 bin ton fazla olması beklenmektedir (Custom Market Insights 2020). Bu talebi karşılamaya yönelik olarak dünya çapında üretim yapan bazı anot malzeme üreticileri Tablo 4'te verilmiştir.

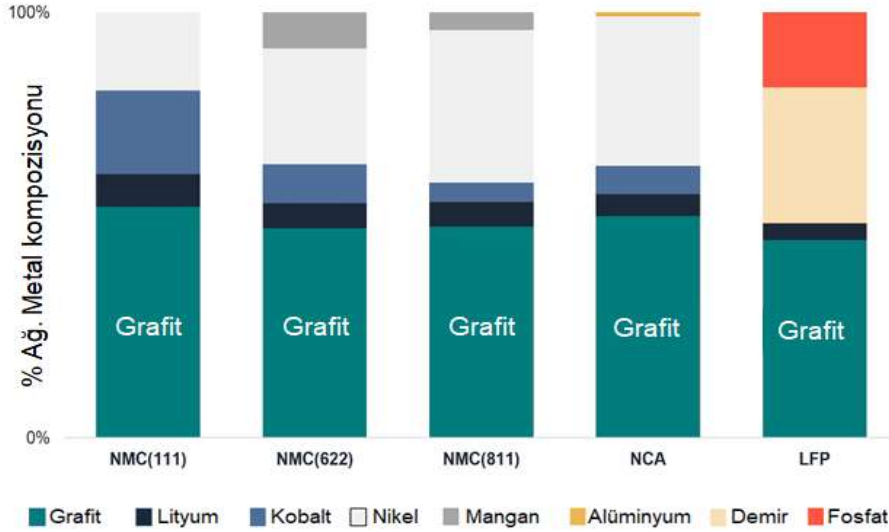
Son yıllarda sektördeki gelişmeler, artan talebi karşılamak amacıyla firmaların yıllık üretim kapasitelerini artırmalarını, grafit yanı sıra silisyum bazlı anot aktif malzeme üretim tesislerinin kurulmasını ve üretimi gerçekleştiren fabrikaların temiz enerji kaynaklarını kullanmasını içermektedir.

5. LİTYUM İYON BATARYA ANOT MALZEMELERİ PAZARI

Kapsamlı devlet politikaları ve eylemleri, satış noktası teşvikleri, şarj altyapısı ağlarının geliştirilmesi, gelişen tüketici tercihleri, üretim ölçeği ve teknolojik ilerlemelerin etkisiyle önümüzdeki on yıl içinde elektrikli araç satışlarının önemli ölçüde artması öngörülmektedir. Rystad Energy (Int. Kyn. 19) tarafından yapılan analizlere göre, EA satışlarının ve Li iyon pil talebinin mevcut büyüme trendiyle devam etmesi durumunda, toplam batarya anot malzemeleri (BAM) talebinin 2025 yılına kadar %300'lük bir artışla 774.000 tondan 2,9 milyon ton'a yükselmesi öngörülmektedir. Bu önemli artış, elektrikli araç teknolojisinin hızla yaygınlaşması ve pil üretiminin genişlemesiyle birlikte anot malzemesi talebinin de büyük ölçüde artacağını göstermektedir. Benchmark Mineral Intelligence'in verilerine göre, grafitin özellikle elektrikli araçlar ve sabit depolama uygulamaları gibi büyük ölçekli pil pazarlarında tercih edilen ve en yaygın kullanılan aktif anot malzemesi olarak kalması beklenmektedir. Grafit, yüksek nikel içeriğine sahip olan LFP, NMC ve NCA gibi katot malzemeleri ile kütle olarak en büyük aktif malzeme oranını oluşturmaktadır (Şekil 8). Bu nedenle, grafit hala Li iyon pil teknolojisinin temel ve önemli bir bileşeni olarak öne çıkmaya devam etmektedir.

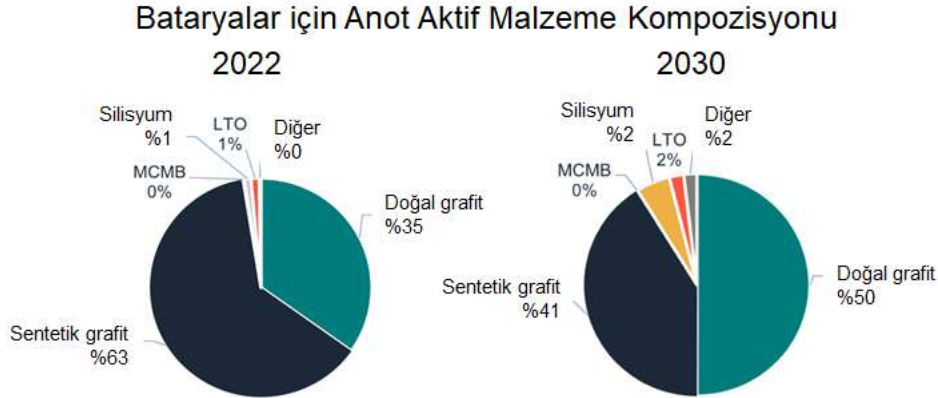
Tablo 4. Dünya çapında başlıca anot aktif malzemesi üreten firmalar.

Firma	Ülke	Üretilen Anot Malzemesi	Yıllık Kapasite	Kaynak
Posco Chemical	Güney Kore	Doğal ve sentetik grafit, silisyum anotlar, metalik lityum	320.000 ton (2030 hedefi)	Int. Kyn. 4
Syrah	Avustralya	Grafit	350.000 ton maden çıkartma 1.125.000 ton işleme hacmi	Int. Kyn. 5
BTR	Çin	Doğal grafit	160.000 ton	Int. Kyn.6
Talga	İsveç	Doğal grafit (Çevreci üretim)	100.000 ton (hedeflenen)	Int. Kyn. 7
Putailai	Çin	Doğal ve sentetik grafit, sert karbon, nano silisyum, nano silisyum-karbon kompozit, silisyum oksit	63.000 ton	Int. Kyn. 8
Nouveau Monde	Kanada	Grafit (Hidroenerji ile temiz üretim)	45.000 ton (2023 hedefi)	Int. Kyn. 9
Zhongke	Çin	Grafit	30.000 ton	Int. Kyn. 10
Novonix	ABD	Grafit (Çevreci üretim)	20.000 ton	Int. Kyn. 11
Anovion	ABD	Grafit	5.000 ton grafitizasyon (2025 hedefi 50.000 ton)	Int. Kyn. 12
Showa Denko Materials	Japonya	Sentetik grafit		Int. Kyn. 13
JFE Chemical Corp.	Japonya	Doğal grafit, sert karbon, MCMB		Int. Kyn. 14
SGL Carbon	Almanya	Grafit ve silisyum-karbon kompozit anotlar		Int. Kyn. 15
Shanshan technology	Çin	Doğal ve sentetik grafit, silisyum bazlı anot malzemeleri		Int. Kyn. 16
Targray	Kanada	Doğal ve sentetik grafit, aktive edilmiş karbon, LTO (lityum titanat), yüzey modifiye edilmiş silisyum, yüksek performanslı grafen		Int. Kyn. 17
NEO Battery	Kanada	Silisyum bazlı anot		Int. Kyn. 18



Şekil 8. Her pil kimyası için element kütlelerine göre toplam yüzdeler (Int. Kyn. 20).

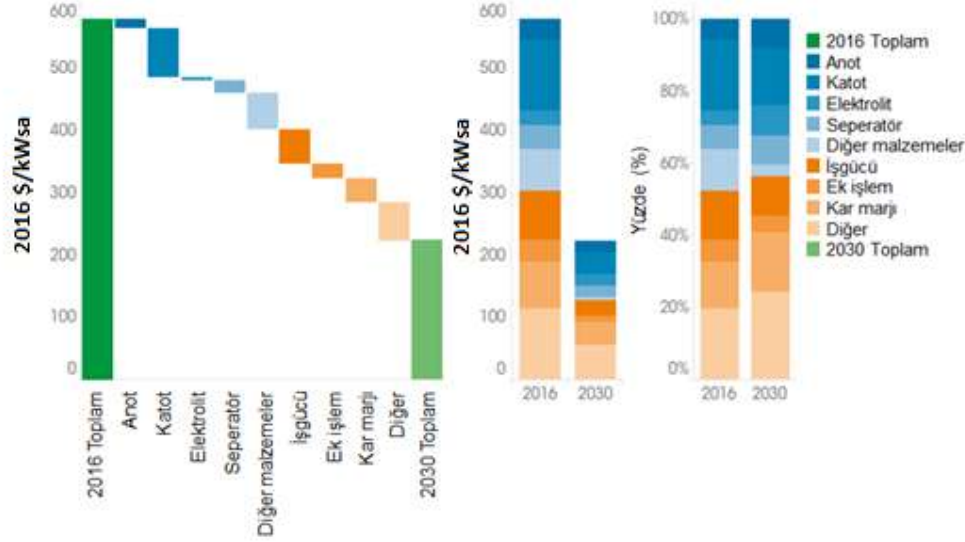
Günümüzde kullanılan anot malzemelerinin yaklaşık %40'ı doğal grafitten, %60'ı ise sentetik grafit temelli malzemelerden oluşmaktadır. Doğal grafit, sentetik grafit bazlı aktif anot malzemelerine kıyasla daha düşük maliyetle üretilebilmesi ve daha yüksek kapasiteler sunabilmesi gibi avantajlara sahiptir. Ancak daha yüksek enerji yoğunluklarına ulaşılabilmesi için ilerleyen dönemlerde Si-C kompozit, yüksek silisyum, metalik lityum ve sert karbon içeren anot aktif malzeme kimyalarının yaygınlaşacağı öngörülmektedir (Şekil 9).



Şekil 9. 2022 ve 2030 yıllarına ait aktif anot malzemelerinin bileşim (Int. Kyn. 20).

Silisyum, grafit ile karşılaştırıldığında daha yüksek teorik enerjiye ve enerji yoğunluğuna sahip olduğundan gelecek için umut veren alternatif aktif anot malzemesi olarak kabul edilmektedir. Ancak, malzeme özelliklerine ilişkin teknolojik zorluklar ve henüz olgunlaşmamış üretim teknikleri, silisyum bazlı anot malzemelerinin sanayileşme sürecinde bazı engeller oluşturmuştur. Bununla birlikte, silisyum bazlı anot malzemelerinin seri üretimini gerçekleştiren ilk Çin'li şirketlerden biri olan BTR, 2013 yılında silisyum bazlı anot malzemelerinin üretimini sanayileştirmiş ve toptan satışını gerçekleştirmiştir. 2022 yılında ise şirket, Shenzhen, Guangming Bölgesi'nde yıllık 40.000 ton kapasiteli silisyum bazlı anot malzemesi projesinin inşasına yatırım yapmayı planladığını duyurmuştur (Int. Kyn. 21).

Irena tarafından yayınlanan rapora (Irena 2017) göre Li iyon hücre üretim tesisi kurulum maliyetinin, sabit uygulamalarda 2030 yılına kadar %54-61 arasında düşebileceği tahmin edilmektedir (Şekil 10). Anot malzeme tarafında tahmin edilen bu maliyet düşüşü, karbon ve silisyum dioksit beraber kullanımı ile geliştirilecek üretim teknolojisine atfedilebilir.



Şekil 10. 2016-2030 Li iyon maliyet düşüş potansiyeli (Irena 2017).

6. ANOT MALZEMELERİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ VE YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMELERİ

Elektrikli araçlar egzoz emisyonlarına neden olmazken, batarya üretiminin çevresel etkileri dikkate değerdir. Bu nedenle, batarya üretiminin yol açabileceği çevresel etkilerin izlenmesi ve sürdürülebilirlik gelişimlerine katkı sağlayacak önerilerin sunulabilmesi için yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) yöntemi kullanılmaktadır.

Artan enerji yoğunluğu talebini karşılamak ve daha güvenilir sistemler kurmak için yeni anot malzemesi ve hücre teknolojisi (örn. katı hal) değerlendiriliyor olsa da bu teknolojilerin ticarileştirilmesi ve ölçeklendirilmesi için üstesinden gelinmesi gereken çok sayıda da teknik, üretim ve pazar sorunu bulunmaktadır. Batarya anodunda öncelikli olarak grafit aktif anot malzemeleri kullanan hücre üretim tesisleri için önemli miktarda yüksek kapasiteli yatırımlar yapılmıştır ve yapılan büyük ölçekli, orta maliyetli tesisler yeni hücre teknolojileri ile uyumsuzdur. Anot malzemesi olarak doğal grafit talebi önemli ölçüde artmaya devam etmektedir. Ancak grafitin çıkarılması, rafine edilmesi ve kaplanması süreçlerinin çevresel etkisi üzerinde yeteri kadar durulmamaktadır. Engels vd. (2022) tarafından yapılan çalışmaya göre, toplamda 1 kg anot grafit üretmek için yaklaşık 11 kW-sa enerjinin gerekli olduğu belirtilmiştir (Tablo 5). Bu enerji, farklı enerji taşıyıcıları olan doğal gaz, motorin, kömür ve elektrik enerjisi arasında bölünmüştür. En yaygın kullanılan enerji taşıyıcısı, üretimin hemen hemen her işlem adımında gerekli olan elektrik enerjisidir. En büyük elektrik enerjisi tüketimi ise kaplama aşamasında (yaklaşık 4.500 kW-sa-ton⁻¹) gerçekleşmektedir. Üretim süreçleri arasında en düşük enerji ihtiyacı saflaştırma ve madencilik süreçlerinde gerekmektedir.

Tablo 5. Anot malzemesi olarak doğal grafit üretiminde kW.sa cinsinden her işlem adımı için enerji tüketimi (Engels vd. 2022).

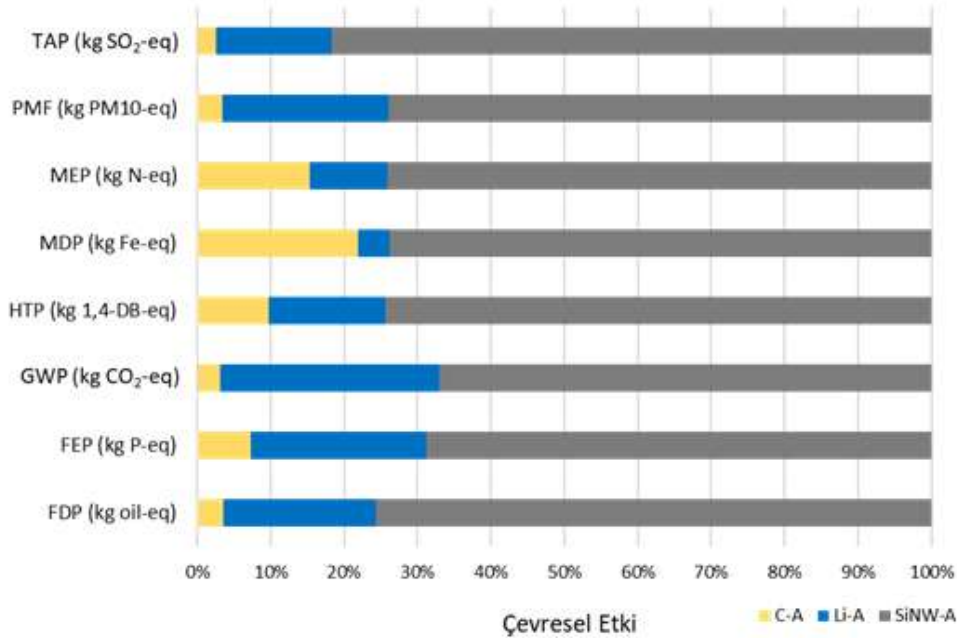
Grafit Üretim Süreçleri (kW-sa-ton ⁻¹)								
Madencilik		Flotasyon		Küreselleştirme	Saflaştırma		Kaplama	
Dizel	Elektrik	Kömür	Elektrik	Elektrik	Doğalgaz	Elektrik	Elektrik	
860		2.342		2.402	617		4.553	

Engels'in (Engels vd. 2022) araştırmasına göre 1 ton grafit anot üretim sürecinin küresel ısınmaya etki potansiyeli (GWP) 9.600 kg'dan fazla CO₂ eşdeğerine sahiptir (Tablo 6). Bu GWP değeri, süreçteki sera gazı emisyonlarını temsil eder. Kaplama işlemi, özellikle gereken elektrik enerjisi nedeniyle yaklaşık 4.000 kg CO₂ eşdeğeri ile sera gazı emisyonlarına en büyük katkısı yapar. İkinci en büyük katkı sağlayan süreç, gerekli elektrik enerjisi ve öğütme işlemiyle salınan doğrudan CO₂ emisyonları nedeniyle flotasyon işlemidir (2.000 kg CO₂ eşdeğeri). Saflaştırma sürecindeki ana emisyon kaynakları, nötralizasyon için kullanılan asitler ve kireçtir (yaklaşık 1.300 kg CO₂ eşdeğeri). Genel olarak, 1 ton grafit anot üretim prosesinde madencilik süreci, yaklaşık 380 kg CO₂ eşdeğerine sahip olmasıyla oldukça küçük bir etkiye sahiptir.

Tablo 6. 1.000 kg anot grafitin her üretim adımı için GWP sonuçları (Engels vd. 2022).

Grafrit Üretim Süreçleri (%)													
Madencilik % 4		Flotasyon % 21,1				Küreselleştirme % 20,2	Safılaştırma % 13,7				Kaplama % 41		
Taşıma	Elektrik	Elektrik	Seramik	Direkt Emisyon	Kalan	Elektrik	Kireç	Asitler	Elektrik	Kalan	Elektrik	Taşıma	Kalan
2,1	1,8	10,8	4,9	4,8	0,6	20,2	5,1	4,3	2,6	1,8	38,4	1,7	0,9

Grafitten daha yüksek özgül kapasiteye sahip Li metal ve silisyum nanoteller, yeni nesil pillerde kullanım için en umut verici alternatif gelişmiş anot malzemeleridir. Wu ve Kong (2018) çalışmalarında, anot malzemelerinin çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla Li metal anot (Li-A), grafit anot (C-A) ve silisyum nanotel anot (SiNW-A) malzemelerini beşikten beşiğe metoduyla karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırma, fosil tükenme potansiyeli (FDP), tatlı su ve deniz ötrofikasyonu potansiyeli (FEP), küresel ısınma potansiyeli (GWP), insan toksisite potansiyeli (HTP), metal tükenme potansiyeli (MDP), deniz ötrofikasyon potansiyeli (MEP), partikül madde oluşumu potansiyeli (PMF) ve karasal asitlenme potansiyeli (TAP) olmak üzere sekiz farklı çevresel etki kategorisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 11).

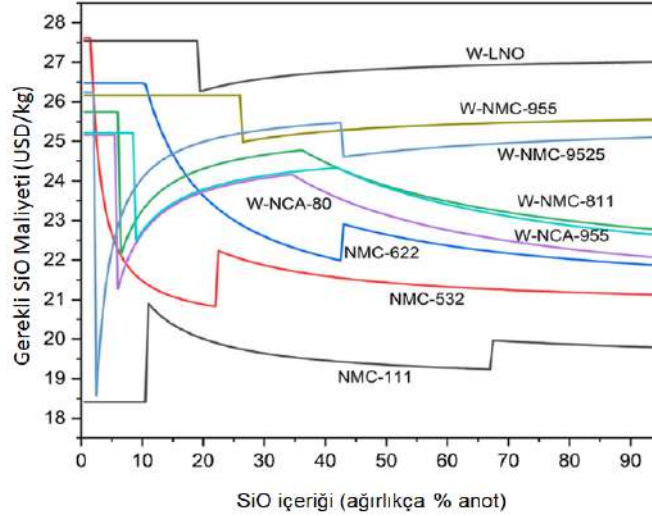


Şekil 11. Üç farklı anodun 1 kg üretim için beşikten beşiğe çevresel etkileri (Wu ve Kong 2018).

Sekiz etki kategorisinin tamamında silisyum nanotel anotlar, diğer anotlar arasında en yüksek etkiye sahiptir ve bu durum nanotellerin üretimi için kullanılan silisyum tozu işleme sürecine bağlanmaktadır (Şekil 11). Grafit anot, çevresel etki olarak (FDP, FEP, GWP, HTP, PMF ve TAP kategorisinde) lityum metal ve silisyum nanotel anoda kıyasla daha düşük etkiye sahiptir. Lityum metali tek başına bir akım toplayıcı olarak kullanılabilirliğinden bakır folyo lityum metal anot için gözardı edilerek bakıldığında MDP ve MEP için lityum metal anot, grafit anottan daha az etkiye sahiptir. Li'nin anot malzeme olarak kullanımının emisyon potansiyeli silisyum nanotellerin kullanımına göre daha azdır ancak toplamda karbon esaslı malzemeler arasında en az olumsuz çevresel etki göstermektedir. Sonuç olarak, farklı malzemelerin ve üretim süreçlerinin malzemelerin çevresel etkilerini belirgin bir şekilde etkilediği görülmektedir.

Lastoskie ve Dai (2015), anotta C yerine Li kullanıldığında, pil hücresinin özgül kapasitesinin %18 arttığını ve çevresel etkilerin daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Başka bir araştırma grubu, Kushnir ve Sanden (2011), farklı elektrotlara sahip pillerin enerji tüketimini hesaplamış ve nanomalzeme üretimi sırasında daha fazla enerji tüketildiğini bulmuşlardır. Ancak nanomalzeme kullanan katotlar veya anotların, nanomalzeme dışı malzeme kullanan katotlara/anotlara göre daha uzun pil ömrüne ve daha yüksek enerji verimliliği seviyelerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Dunn vd. (2015), LNMC katot ve grafit-silisyum karışımı anot içeren bir pilin üretim sürecinden ürüne kadar olan enerji tüketiminin, LNMC katot ve grafit anodu olan bir pilden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Li vd. (2014), silisyum nanotel anotlu (SiNW-A) pillerin YDD sonuçlarının, geleneksel Li iyon pillerden daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Greenwood ve ekibinin (2021) yaptığı çalışmada, nikel bakımından zengin katot aktif malzemeleri ve silisyum-grafit kompozit anotları kullanan Li iyon pil hücrelerinin performans ve maliyet değerlendirmesi yapılmıştır. Bu çalışmada, SiO ilavesinin birçok hücre parametresini nasıl etkilediği incelenmiş ve saf bir grafit anottan elde edilen değeri elde etmek için gereken SiO maliyet düşüşünün doğrusal olmadığı ortaya konmuştur. Bu maliyet düşüşü, eklenen SiO miktarının yanı sıra hücre kimyası ve tasarımına da bağlıdır (Şekil 12).



Şekil 12. Hücre kimyasına ve SiO içeriğine bağlı olarak saf grafit anot kullanan bir hücre ile aynı USD kWh⁻¹ eşitliğini elde etmek için SiO-Gr anot kullanan bir hücrenin maksimum SiO maliyeti (Greenwood vd. 2021).

7. ÖNERİLER

Enerji depolama Ar-Ge faaliyetleri, genellikle ulusal laboratuvarlar ve üniversiteler tarafından yönetilen temel malzeme araştırmalarını içerirken, ticari geliştiriciler ve ulusal laboratuvarlar öncelikle hücre ve paket geliştirme süreçleriyle hücre testlerini de içeren çalışmaları yürütmektedir. Genel yaklaşımlar, hücre gücünü, dayanıklılığını, güvenliğini artırmak ve maliyeti önemli ölçüde azaltmak amacını taşımaktadır. Hücre malzemeleri ve tasarım iyileştirmelerinin yanı sıra, yatırımcı firmalar daha ekonomik üretim teknikleri, gelişmiş termal yönetim teknolojileri, yeni paketleme yöntemleri ve bilgisayar destekli mühendislik tasarım araçlarına odaklanmalıdır.

Elektrikli araçlar için yüksek performanslı anot teknolojilerinin geliştirilmesi, elektrikli araçların ilerlemesi ve yaygınlaşmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, elektrikli araç endüstrisinde sürdürülebilir, düşük maliyetli, yüksek enerji yoğunluğuna sahip, uzun ömürlü ve termal kararlılığı yüksek anot malzemelerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu hedefe ulaşmak için üniversiteler ve endüstriler arasında iş birliği içinde yol haritaları oluşturulmalı, Ar-Ge yatırımlarıyla nihai ürünlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Yeni nesil anot malzemeleri için 2025 ve sonrasında silisyum-karbon kompozit malzemelerin öne çıkacağı, daha ileri yıllarda ise katı hal bataryalarının gelişimiyle birlikte lityum metalin anot olarak kullanımının artması öngörülmektedir. Bu anot malzemeleri, daha yüksek performans ve enerji depolama kapasitesi sunarak elektrikli araç için daha iyi sürüş menzili ve etkili enerji depolama sağlayacaktır.

Bu kapsamda uygulanması gereken adımlar aşağıda özetlenmiştir:

- Hücre kimyasında anot içerisinde meydana gelen moleküler ölçekte ara yüzey reaksiyonlarından elektronların rolüne kadar olan süreçleri inceleyebilmek için ara yüz analitik tekniklerin geliştirilmesi ve bu tekniklerin desteklenmesi gerekmektedir.
- Hücre teknolojilerinde gerçek bir ilerleme sağlamak amacıyla, pilin tüm değer zinciri boyunca elde edilen bilimsel ve inovatif verilerin, yazılım/donanım altyapılarıyla birlikte birleştirilmesi gerekmektedir.
- Deneysel çalışmalarla birlikte dijitalleştirilmiş araçlar geliştirilmelidir. Bu amaçla, paylaşılan deney ve test protokolleri ile verilerin ulusal düzeyde değerlendirilmesi, saklanması ve paylaşılması için ortak bir altyapı oluşturulması gerekmektedir. Bu altyapı sayesinde malzeme ve hücre geliştirme faaliyetlerinin tüm aşamalarından gelen verilerin otomatik olarak alınması, işlenmesi ve analiz edilmesi hızla geliştirilmelidir.



- Endüstrinin Li-iyon pil teknolojilerine geçişini kolaylaştırmak için eğitim programları oluşturulmalı ve uygulanmalıdır. Teknoloji transferinin sağlanabilmesi için endüstri, erken aşamada araştırma yapmaya teşvik edilmelidir.
- Genç bilim insanlarına ilham vermek ve onları bu alanda araştırma yapmaya çekmek ve her düzeyde eğitimi teşvik etmek için araştırma ağları geliştirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Abdollahifar, M., Molaiyan, P., Perovic, M., Kwade, A., 2022. Insights into Enhancing Electrochemical Performance of Li-Ion Battery Anodes via Polymer Coating, *Energies*, 15, 8791.
- Agubra, V.A. and Fergus, J.W., 2014. The formation and stability of the solid electrolyte interface on the graphite anode, *J. Power Sources*, 268, 153162.
- Babu, B., Simon, P. and Balducci, A., 2020. Fast Charging Materials for High Power Applications, *Advanced Energy Materials*, 10, 2001128.
- Blomgren, G. E., 2017. The development and future of lithium ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 164, A5019–A5025.
- Chan, C.K., Peng, H. Liu, G., Mcllwarth, K., Zhang, X.F., Huggins, R.A. and Cui, Y., 2008. High-performance lithium battery anodes using silicon nanowires. *Nature Nanotechnology*, 3, 31–35.
- Chen, Z., Qin, Y., Ren, Y., Lu, W., Orendorff, C., Roth, E. P., and Amine, K., 2011. Multi-scale study of thermal stability of lithiated graphite. *Energy & Environmental Science*, 4 (10), 4023-4030.
- Chen, Y., Lennartz, P., Liu, K., Hsieh, Y., Scharf, F., Guerdeli, R., Buchheit, A., Grünebaum, M., Kempe, F., Winter, M. and Brunklau, G., 2023. Towards All-Solid-State Polymer Batteries: Going Beyond PEO with Hybrid Concepts. *Advanced Energy Materials*, 33, 2300501.
- Chen, Z., Amine, K., Amine, R., Abouimrane, A., Keles, O., Karahan, B.D. and Eryilmaz, O.L., 2023. Patterned anode for lithium-ion batteries, US11575125B2.
- Custom Market Insights, 2020. Lithium-ion Battery Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product, By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2022 – 2030.
- Dunn, J. B. James, C., Gaines, L., Gallagher, K., Dai, Q. and Kelly, J.C., 2015. Material and Energy Flows in the Production of Cathode and Anode Materials for Lithium Ion Batteries (ANL/ESD-14/10 Rev.) Argonne National Laboratory.
- Dunn, J. B., Gaines, L. Kelly, J. C., James, C. and Gallagher, K. G., 2015. The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction, *Energy Environ. Sci.*, 8, 158-168.
- Engels, P., Cerdas, F., Dettmer, T., Frey, C., Hentschel, J., Herrmann, C. and Schueler, M., 2022. Life cycle assessment of natural graphite production for lithium-ion battery anodes based on industrial primary data, *Journal of Cleaner Production*, 336, 130474.
- Fadillah, L., Kowalski, D., Vincent, M., Zhu, C., Kitano, S., Aoki, Y. and Habazaki, H., 2023. Lithiation of Anodic Magnetite–Hematite Nanotubes Formed on Iron, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 15, 52563.
- Feng, Z., Peng, W., Wang, Z., Guo, H., Li, X., Yan, G. and Wang, J., 2021. Review of silicon-based alloys for lithium-ion battery anodes, *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, 28, 1549.
- Garche, J., Brandt, K., 2018. Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications: Li-Battery Safety, *Elsevier*.
- Greenwood, M., Wentker, M. and Leker, J., 2021. A bottom-up performance and cost assessment of lithium-ion battery pouch cells utilizing nickel-rich cathode active materials and silicon-graphite composite anodes, *Journal of Power Sources Advances*, 9, 100055.
- Hossain, M. H., Chowdhury, M.A., Hossain, N., Islam, M. A. and Mobarak, M. H., 2023. Advances of lithium-ion batteries anode materials—A review, *Chemical Engineering Journal Advances*, 16, 100569.
- IRENA, 2017. Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN: 978-92-9260-038-9.
- Jiao, M., Wang, Y., Ye, C., Wang, C., Zhang, W. and Liang, C., 2020. High-capacity SiO_x (0<x<2) as promising anode materials for next generation lithium-ion batteries, *J. Alloys and Compounds*, 842, 155774.
- Joho, F. Novák, P. and Spahr, M.E., 2002. Safety aspects of graphite negative electrode materials for lithium-ion batteries, *J. Electrochem. Soc.*, 149, A1020-A1024.



- Keles, O., Karahan, B.D., Eryilmaz, L., Amine, R., Abouimrane, A., Chen, Z., Zuo, X., Zhu, Z., Al-Hallaj, S., Amine, K., 2020. Superlattice-structured films by magnetron sputtering as new era electrodes for advanced lithium-ion batteries, *Nano Energy*, 76, 105094.
- Korthauer, R., 2013. *Handbuch, Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Vieweg, Heidelberg.
- Kushnir, D. and Sanden, B.A., 2011. Multi-level energy analysis of emerging technologies: a case study in new materials for lithium ion batteries, *Journal of Cleaner Production*, 19 (13), 1405-1416.
- Lastoskie, C.M and Dai, Q., 2015. Comparative life cycle assessment of laminated and vacuum vapor-deposited thin film solid-state batteries, *Journal of Cleaner Production*, 91, 158-169.
- Liang, G. and MacNeil, D. D., 2011. In *Lithium-Ion Batteries: Advanced Materials and Technologies Green Chemistry and Chemical Engineering* (eds Yuan, X., Liu, H. & Zhang, J.), CRC Press, Boca Raton, 327-394.
- Li, B., Gao, X., Li, J. and Yuan, C., 2014. Life cycle environmental impact of high-capacity lithium ion battery with silicon nanowires anode for electric vehicles, *Environmental science & technology*, 48 (5), 3047-3055.
- Li, Y., Yan, K., Lee, H., Lu, Z., Liu, N. and Cui, Y., 2016. Growth of conformal graphene cages on micrometre-sized silicon particles as stable battery anodes, *Nature Energy*, 1, 16017.
- Liu, H., Zhu, Z., Huang, J., He, X., Chen, Y., Zhang, R., Lin, R., Li, Y., Yu, S., Xing, X., Yan, Q., Li, X., Frost, M. J., An, K., Feng, J., Kostecki, R., Xin, H., Ong, S. P., Liu, P., 2019. Elucidating the Limit of Li Insertion into the Spinel $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, *ACS Materials Letters*, 1, 96-102.
- Lu, Z., Liu, N., Lee, H., Zhao, J., Li, W., Li, Y. and Cui, Y., 2015. Nonfilling Carbon Coating of Porous Silicon Micrometer-Sized Particles for High-Performance Lithium Battery Anodes, *ACS Nano*, 9, 2540-2547.
- MacNeil, D. D., Larcher, D. and Dahn, J. R., 1999. Comparison of the reactivity of various carbon electrode materials with electrolyte at elevated temperature, *Journal of the Electrochemical Society*, 146 (10), 3596.
- Natarajan, C., Fujimoto, H., Tokumitsu, K., Mabuchi, A. and Kasuh, T., 2000. Reduction of the irreversible capacity of a graphite anode by the CVD process, *Carbon*, 39, 1409-1413.
- Ohzuku, T., Iwakoshi, Y. and Sawai, K., 1993. Formation of Lithium-Graphite Intercalation Compounds in Nonaqueous Electrolytes and Their Application as a Negative Electrode for a Lithium Ion (Shuttlecock) Cell, *J. Electrochem. Soc.*, 140, 2490.
- Ozen, S., Eroglu, O. and Karatepe, N., 2023. Electrochemically pre-lithiated $\text{SiO}_2@\text{C}$ nanocomposite anodes for improved performance in lithium-ion batteries, *Nanotechnology*, 34, 485403.
- Park, Y. S. and Lee, S. M., 2009. Effects of particle size on the thermal stability of lithiated graphite anode, *Electrochimica Acta*, 54 (12), 3339-3343.
- Polat, B.D., Eryilmaz, O.L., Keles, O., Erdemir, A., Amine, K., 2015. Compositionally Graded SiCu Thin Film Anode by Magnetron Sputtering for Lithium Ion Battery, *Thin Solid Films*, 596, 190-197.
- Research and Markets, 2022. *Global and China Lithium-ion Battery Anode Material Industry Report 2021-2026*.
- Salem, D.R., Chen, C. and Hussein, A., 2019. Layered high capacity electrodes, US Patent US10468674B2.
- Schmich, R., Wagner, R., Hörpel, G., Placke, T. and Winter, M., 2018. Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries, *Nature Energy*, 3, 267-278.
- Sun, Y., Lopez, J., Lee, H.W., Liu, N., Zheng, G., Wu, C.L., Sun, J., Liu, W., Chung, J.W. and Cui, Y., 2016. A stretchable graphitic carbon/Si anode enabled by conformal coating of a self-healing elastic polymer, *Advanced Materials*, 28, 2455-2461.
- Takami, N., Inagaki, H., Tatebayashi, Y., Saruwatari, H., Honda, K. Egusa, S., 2013. High-power and long-life lithium-ion batteries using lithium titanium oxide anode for automotive and stationary power applications, *Journal of Power Sources*, 244, 469-475.
- Wang, H., Yoshio, M., Abe, T. and Ogumi, Z., 2002. Characterization of carbon-coated natural graphite as a lithium-ion battery anode material, *Journal of the Electrochemical Society*, 149 (4), A499.
- Wang, R., Cui, W., Chu, F. and Wu, F., 2020. Lithium metal anodes: Present and future, *Journal of energy chemistry*, 48, 145-159.
- Wang, G., Yu, M. and Feng, X., 2021. Carbon materials for ion-intercalation involved rechargeable battery technologies, *Chem Soc Rev*, 50, 2388.
- Winter, M. and Besenhard, J. O., 1999. Electrochemical lithiation of tin and tin-based intermetallics and composites, *Electrochimica Acta*, 45, 31.
- Wu, H., Chan, G., Choi, J.W., Ryu, I., Yao, Y., McDowell, M.T., Lee, S.W., Jackson, A., Yang, Y. and Cui, Y., 2012. Stable cycling of double-walled silicon nanotube battery anodes through solid-electrolyte interphase control, *Nature Nanotechnology*, 7, 310-315.



Wu, Z. and Kong, D., 2018. Comparative life cycle assessment of lithium-ion batteries with lithium metal, silicon nanowire and graphite anodes, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20 (6), 1233-1244.

Xie, L., Tang, C., Bi, Z., Song, M., Fan, Y., Yan, C., Li, X., Su, F., Zhang, Q. and Chen, C., 2021. Hard Carbon Anodes for Next-Generation Li-Ion Batteries: Review and Perspective. *Advanced Energy Materials*, 11, 2101650.

Xu, W., Wang, J., Ding, F., Chen, X., Nasybulin, E., Zhang, Y. and Zhang, J., 2014. Lithium metal anodes for rechargeable batteries. *Energy&Environmental Science*, 7, 513.

Xu, W., Zhang, J., Jia, H., Zhang, X., Cao, X., Chae, S., Yi, R., Kwak, W. and Li, X., 2021. Electrolytes for lithium batteries with carbon and/or silicon anodes, US Patent US11664536B2.

Yang, J., Feng, X., Zhang, J. and Zhou, L., 2021. SiOx/Si/C Composite material and process of producing thereof, and anode for lithium ion battery comprising said composite material. EU Patent EP2 989 671B1.

Yazami, R., Touzain, P., 1983. A reversible graphite-lithium negative electrode for electrochemical generators. *J. Power Sources*, 9, 365.

Zhang, W., Yang, Y., Xu, H., Wang, L., Lu, X. and He, X., 2022. Li4Ti5O12 spinel anode: Fundamentals and advances in rechargeable batteries. *InfoMat*, 4, 12228.

İnternet kaynakları

- [1] <https://karabacakmaden.com.tr/>, (21.02.2024)
- [2] <https://www.tesmanian.com/blogs/tesmanian-blog/tesla-silicon-fast-charge-is-on-the-way>, (21.02.2024)
- [3] <https://hpqsilicon.com/press-release/commercial-li-ion-batteries-made/>, (21.02.2024)
- [4] <https://www.poscochemical.com/en/business/energy.do>, (08.02.2024)
- [5] <https://www.fastmarkets.com/insights/syrah-gets-nod-on-150-mln-us-govt-loan-anode-grade-graphite-production/#:~:text=Syrah's%20Balama%20graphite%20project%20has,flake%20fines%20supply%20outside%20China>, (08.02.2024)
- [6] <https://news.metal.com/newscontent/101585873/BTR-partnered-with-Fuan-Holding-Group-to-build-anode-precursor-project-with-annual-capacity-of-100000-mt/>, (08.02.2024)
- [7] <https://www.greencarcongress.com/2023/02/20230223-talga.html>, (08.02.2024)
- [8] <https://news.metal.com/newscontent/101451557/putailais-first-quarter-net-profit-increased-by-260-compared-with-the-same-period-last-year-lithium-battery-has-become-its-main-source-of-profit>, (08.02.2024)
- [9] <https://www.mining.com/construction-begins-for-nouveau-mondes-matawinie-mine/>, (08.02.2024)
- [10] <https://news.metal.com/newscontent/101581835/zhongke-electric-plans-to-increase-the-production-of-lithium-electric-materials-by-22-billion-by-selling-23545-tons-of-negative-materials-in-the-first-half-of-the-year>, (08.02.2024)
- [11] <https://www.ft.com/content/025e619f-79c5-4eed-9a79-66997f925dd4>, (08.02.2024)
- [12] <https://chargedevs.com/newswire/anovion-seeks-to-secure-north-american-supply-chain-for-synthetic-graphite/>, (08.02.2024)
- [13] https://www.resonac.com/products/lithiumionbattery-sliding?_gl=1*rg7mow*_up*MQ*_ga*MTA1ODUxNDU1NC4xNzEwOTE4NTY3*_ga_KL6329XMEP*MTcxMDkxODU2Ni4xLjEuMTcxMDkxODU3Ni4wLjAuMA..*_ga_X0Y5W1RQ6E*MTcxMDkxODU2Ni4xLjEuMTcxMDkxODU3Ni4wLjAuMA.., (20.03.2024)
- [14] <https://www.jfe-chem.com/en/product/battery/>, (08.02.2024)
- [15] <https://www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/material/sigracell-specialty-graphites-for-lithium-ion-batteries/>, (08.02.2024)
- [16] <http://www.ssgf.net/index/en/business2.html#business=2>, (08.02.2024)
- [17] <https://www.targray.com/li-ion-battery/anode-materials/graphite>, (08.02.2024)
- [18] <https://neobatterymaterials.com/technology/>, (08.02.2024)
- [19] <https://www.rystadenergy.com/news/fake-it-till-you-make-it-synthetic-graphite-holds-the-key-to-meeting-battery-dema>, (08.02.2024)
- [20] https://www.datocms-assets.com/65260/1680131246-syr_31_december_2022_annual_report.pdf, (20.03.2024)
- [21] <https://www.prnewswire.com/news-releases/ceremony-marking-the-launch-of-shenzhens-q2-key-projects-held-in-guangming-301523478.html>, (08.02.2024)



KATOT MALZEMELERİ

B. D. Karahan¹[+], H. Şahan²[+], S. Engün³[+], Ş. Patat²[+], B. C. Alpay⁴, Ç. K. Barbas⁵,
E. Çetintaşoğlu⁶, H. G. Küt¹, R. Solmaz¹, G. Z. Şenyurt⁷

ÖZET

Lityum iyon pil teknolojisi 1990 yılından itibaren sürdürdüğü gelişimi ile taşınabilir elektronik cihazlardan, araçların elektrifikasyonu ve yenilenebilir enerji depolama uygulamalarına kadar birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır. İlk üretildiği günden bu zamana kadar Li iyon hücrelerin bu kadar hızlı bir şekilde pazar payının artmasında en büyük nedenlerden birinin de yüksek enerji yoğunluklu elektrot aktif maddelerinin kullanımı sayesinde diğer şarj edilebilir hücrelere nazaran daha yüksek enerji yoğunluğu sergiliyor olmasıdır. 2019 Nobel Kimya Ödülü'nün Li iyon hücrelerin geliştirilmesine verilmiş olması konu hakkında yatırımcının da ilgisini artırmıştır.

Bu bölümde katot aktif malzemesinin tarihçesi ve gelişim süreci tanıtılacak, ardından ticari olarak kullanılan katot aktif malzemelerin özellikleri ve üretim yöntemleri hakkında bilgi verilecektir. Varolan piyasa koşullarında farklı tipteki katot aktif malzemelerin üreticileri ve var olan pazarın süregelen ve öngörülen gelişimi üzerine de kısa bilgiler yer atacaktır. Günümüzde halen ideal katot malzemesi bulunmaması sebebiyle mevcut ürünlere ait problemleri çözebilmek için yeni kimyalar ve var olan katot elektrot aktif malzemeleri modifiye etmek üzerine de araştırmalar devam etmektedir. Katot aktif malzemenin performansını geliştirmeye yönelik yapılan bu çalışmalara ait örneklerin yanı sıra katot malzeme kaynaklı bataryada güvenlik durumu, çevresel etki analiz verileri ve yeni nesil katot aktif malzemelerin özellikleri de sunulacaktır.

Li iyon hücrelerde tercih edilecek katot malzemesinin özelliklerinin kullanılacak batarya performansına doğrudan etki etmesi sebebiyle enerji teknolojilerinin gelişiminde kritik rol oynamaktadır. Günümüzde Türkiye'de bulunan üniversitelerde ve araştırma kurumlarında konu hakkında çalışan, yeterli bilgiye sahip araştırma grupları olmasına rağmen malzeme ve elektrotların özelliklerini detaylı ve kapsamlı incelemek için yeterli karakterizasyon altyapısı bulunmamaktadır. Türkiye'de var olan ham madde kaynakları ve sahip olunan teknoloji seviyesi akademi-sanayi işbirliği içerisinde ürün bazında çalışma yapmak için uygundur. Bu işbirliğini hızlandıracak ve güçlendirecek devlet teşviklerine ihtiyaç bulunmaktadır. Öğrenciler ise günümüzde lisans ve lisansüstü seviyesinde sunulan dersler sayesinde konunun önemi için farkındalık kazanmaktadır. Fakat eğitimlerine bu konuda devam edebilmek ve uzmanlaşabilmek için bu alandaki yatırımların artarak araştırma olanaklarının gelişmesi, sanayi-akademi işbirliklerinin güçlenmesi ve kamu kuruluşlarının desteklerinin artması gerekmektedir.

[+] bdkarahan@itu.edu.tr, halilsahan@kayseri.edu.tr, semihengun@beun.edu.tr, patat@erciyes.edu.tr.

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Maslak, 34469 İstanbul, Türkiye.

2 Erciyes Üniversitesi, Kimya Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye.

3 Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 67100 Zonguldak, Türkiye.

4 University of Münster, MEET - Münster Electrochemical Energy Technology, Corrensstraße 46, 48149 Münster, Almanya

5 ASPILSAN Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş. Pil ve Batarya Sistemleri Üretim Tesisi, Mimarsinan OSB Mahallesi 1. No:43 Kayseri, Türkiye.

6 İstanbul Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Bölümü, 34134, İstanbul, Türkiye.

7 Altınay Elektromobilité ve Enerji Teknolojileri A.Ş., 41420 Kocaeli, Türkiye.

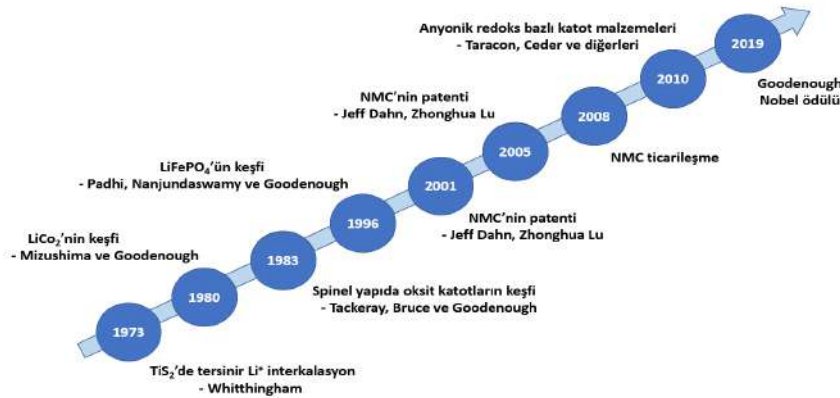
1. KATOT AKTİF MALZEMELERİN TARİHÇESİ VE ÖZELLİKLERİ

Lityum iyon hücrelerde kullanılan ilk katot aktif malzeme Whittingham tarafından geliştirilen tabakalı yapıya sahip TiS_2 dikalkojenür bileşiğidir. Whittingham, Li iyonlarının TiS_2 bileşiğinin kristal kafesine katılanması sırasında birim hücre parametrelerinin çok az değişmesi nedeniyle katılama tepkimesini tersinir interkalasyon tepkimesi (içerme tepkimesi) olarak adlandırmıştır. Tepkimenin tersinirliği, ardışık Ti ve S tabakalarından oluşan TiS_2 bileşiğinin kristal kafesinden kaynaklanmaktadır. 1970 yıllarının sonlarında TiS_2 katodu ve Li (veya Li-Al alaşım) anottan oluşturulan tam hücre, Exxon tarafından ticarileştirilmiştir. Ticari Li/ TiS_2 hücresi, $280 \text{ W}\cdot\text{sa}\cdot\text{L}^{-1}$ ($130 \text{ W}\cdot\text{sa}\cdot\text{kg}^{-1}$) enerji yoğunluğuna (ölgül enerjiye) ve düğme tipi tasarıma sahipti ve sadece saat pillerinde kullanılıyordu. Geliştirilen Li/ TiS_2 hücresinde katot elektrot aktif malzemesi yüksek kapasiteye ($\approx 240 \text{ mA}\cdot\text{sa}\cdot\text{g}^{-1}$) ve yüksek şarj/deşarj döngü kararlılığına sahip olmasına rağmen, pilin düşük voltajda ($\approx 2 \text{ V}$, Li/Li⁺) çalışması, TiS_2 bileşiğinin nem ile temas ettiğinde zehirli H_2S gazının açığa çıkması sebebiyle üretiminin inert atmosferde yapılması gerekliliği ve elektrolitte patlayıcı $LiClO_4$ tuzunun, anotta ise nem ile temas ettiğinde şiddetli tepkime veren Li metalinin kullanılması sebebiyle oluşan yüksek güvenlik riski nedeniyle kullanımı yaygınlaşmamıştır (Lu vd. 2023).

Li/ TiS_2 hücresinin ticarileşmesinden birkaç yıl sonra, Godshall vd., Şubat 1980'de tabakalı yapıya sahip metal oksitleri, ilk defa katot elektrot aktif malzeme olarak kullandıklarını raporlamışlardır. Godshall vd., sentezledikleri $LiCoO_2$ (LCO) katot elektrot aktif maddesini $400\text{--}450 \text{ }^\circ\text{C}$ gibi yüksek sıcaklıklarda kullandıktan birkaç ay sonra; Mizushima vd., organik elektrolit kullanarak oda sıcaklığında LCO katodunu kullanabildiklerini göstermişlerdir. LCO, TiS_2 gibi tabakalı kristal yapıya sahip olmasına rağmen, havada (neme karşı) daha karardır. Elektrokimyasal olarak bir mol LCO maddesinden bir mol Li uzaklaştırıldığında elde edilecek teorik ölgül kapasite (hesaplanan: $274 \text{ mA}\cdot\text{sa}\cdot\text{g}^{-1}$) değerine ancak elektrot yüksek potansiyel değerine (5 V , Li/Li⁺) şarj edildiğinde ulaşılmaktadır. Yüksek potansiyel değerinde ise organik elektrolit yükseltgenerek katot/elektrolit ara yüzeyinin kararsız olmasına neden olmaktadır. Bu durum, Ar-Ge kapsamında yalnızca elektrot kimyası üzerine değil elektrot aktif maddenin kullanılacağı koşulların da optimize edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır (Kosfeld vd. 2023).

Diğer taraftan, Moli Energy Ltd. firması MoS_2 elektrot aktif malzemesini Li metaline karşı katot olarak kullanarak, 1980'lerin sonunda ticari piller üretmiştir. Fakat Kanada, Vancouver'daki Moli Energy Ltd. tarafından satılan Li/ MoS_2 (MOLICEL) hücrelerinde Li metalinin doğrudan kullanımı sebebiyle ortaya çıkan güvenlik sorunu firmanın tüm Li/ MoS_2 pillerini geri çağırmasına sebep olmuştur. Bu durum, metalik lityumun ticari uygulamalarda elektrot aktif malzemesi olarak doğrudan kullanılması halen endişe yaratmaktadır (Brandt vd. 1989).

Şekil 1'de lityum iyon pil kimyasının gelişimindeki önemli gelişmeler zaman çizelgesi üzerinde açıklanmıştır.



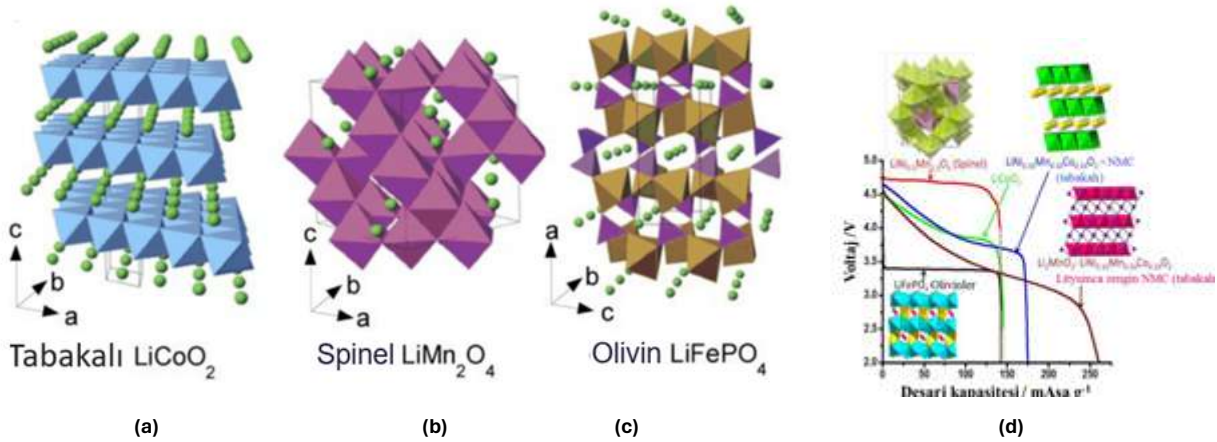
Şekil 1. Li iyon pilde kullanılan katot elektrot aktif malzemelerin tarihinin kilometre taşları (Thackeray vd. 1984, Fouchard ve Taylor 1987, Ozawa 1994, Padhi vd. 1997, Ghosh vd. 2021).

1.1. Katot elektrot aktif malzemelerin özellikleri

Li iyon hücrelerde yaygın olarak kullanılan katot elektrot aktif malzemeler Şekil 2'de görüldüğü gibi tabakalı, spinel ve olivin olmak üzere üç farklı kristal yapıya sahiptir. Şekil 2.d'de Li iyon hücrelerde kullanılan katot elektrot aktif malzemelerin formülleri, kristal yapıları vedeşarj profillerine ait kıyaslama görüntüsü verilmiştir.

Kristal yapılar göre yapılan bu sınıflandırma aynı zamanda Li iyonların taşınmasını yöneten iyon difüzyon yolları ve taşınımın gerçekleşmesi için gerekli aktivasyon enerjisini de belirlemektedir. Bu çerçevede değerlendirilen olivin, tabakalı oksit ve spinel yapılar Li iyon difüzyonunu sırasıyla bir, iki ve üç boyutta sağlamaktadır (Somo vd. 2021).

Ticari olarak kullanılan farklı katot elektrot aktif malzemelerin özellikleri Tablo 1’de görülmektedir.



Şekil 2. (a) Tabakalı LiMO_2 ($M = \text{Mn}, \text{Co}, \text{and Ni}$), (b) spinel LiMn_2O_4 ve (c) olivin LiFePO_4 katot elektrot aktif malzemelerin kristal yapıları, (d) katot elektrot aktif malzemelerin formülleri, kristal yapıları ve deşarj eğrileri. (Elena 2019)

1.1.1. Tabakalı katot elektrot aktif malzemeler

Tabakalı katot elektrot aktif malzemeler, LiMO_2 ($M=\text{Co}, \text{Ni}, \text{Mn}$) bileşimine, $R3m$ uzay grubuna ve trigonal simetriye sahip olan $\alpha\text{-NaFeO}_2$ yapısına benzemektedir (Delmas vd. 1980). LiMO_2 yapısında Na iyonlarının yerini Li^+ iyonları alırken Fe^{3+} iyonlarının yerini ise Co^{3+} , Ni^{2+} ve Mn^{4+} gibi geçiş metal iyonlarından bir ya da birkaçı almaktadır. Tabakalı katot elektrot aktif malzemeler, pilin çalışması sırasında Li iyonlarına geçiş metal oksit tabakaları arasında iki boyutta hareket etme imkanı sağlamaktadır (Şekil 2). Öte yandan, tabakalı katot elektrot aktif malzemelerin tabakalar arası bağların zayıf olması nedeniyle çevrimsel kararlılıkları daha düşüktür (Zhou vd. 2019).

LiCoO_2 (LCO) ve $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ (NMC, $x+y+z=1$) en yaygın olarak kullanılan tabakalı katot elektrot aktif malzemeler arasındadır. NMC katot elektrot aktif malzeme yapısında her bir geçiş metal iyonunun kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Co elementi yüksek sekizyüzlü konum kararlılık enerjisine (OKKE) sahip olduğu için katot elektrot aktif malzemesinde yapısal kararlılık sağlar. Bu sayede yapısal bozunma olmadan daha yüksek kapasitelere ulaşabilmektedir (Şekil 3). Fakat sentez sırasında Ni^{2+} (0.69 \AA) ve Li^+ (0.76 \AA) iyonik yarıçaplarının benzer olması nedeniyle Ni^{2+} iyonları Li konumuna kolayca yerleşebilir. Bu durum sadece Li^+ difüzyonunu engellemekle kalmaz, aynı zamanda tersinmez kapasiteye ve düşük çevrim ömrüne neden olmaktadır. Mn^{3+} iyonu ise, sentez sırasında Ni^{3+} iyonunu Ni^{2+} iyonuna indirgeyerek Mn^{4+} iyonuna yükseltgenme eğilimi gösterir (Masoumi 2019). Bu durum, $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ redoks bandının $\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}^{3+}$ bandının üzerinde yer almasından kaynaklanmaktadır. Bu sayede, mangan iyonu Mn^{4+} şeklinde elektrokimyasal olarak inaktif kalarak, nikelin kararlı Ni^{2+} iyonu şeklinde geçiş metalleri katmanında kalması ve enerji yoğunluğunun yüksek olmasını sağlamaktadır. Diğer taraftan sadece Co içeren LCO katot elektrot aktif malzemede Li iyonlarının yarısından fazlasının (>%50) kafesten ayrılması durumunda yüksek OKKE'ye sahip Co^{3+} iyonlarının yapıyı kararsız hale getirdiği bilinmektedir. Bu durum NMC kimyasının LCO kimyasından daha yüksek kapasite ve kapasite korunumuna sahip olmasını açıklamaktadır (Şekil 3).

İlk ortaya çıkan NMC türü, mol oranı bakımından %33 Co içeren ve NMC 111 (veya NMC 333) olarak adlandırılan türdür. Ancak artan spesifik enerji ihtiyacı ve dünya genelinde etik olmayan üretim koşulları, kısıtlı coğrafyada tedarik edilebilmesi ve yüksek üretim maliyeti gibi Co'nin sahip olduğu dezavantajlar (dünya genelinde etik olmayan üretim koşulları, kısıtlı coğrafyada tedarik edilebilmesi ve yüksek üretim maliyeti) elektrot aktif malzemenin sürdürülebilirliğine zarar vermiş, daha yüksek Ni ve daha düşük Co içeren yeni NMC türlerinin araştırılmasına yol açmıştır. Yıllar içerisinde bu ihtiyaçları karşılamak için NMC 532, NMC 622, NMC 721 ve NMC 811 katot elektrot aktif malzemeler geliştirilmiştir (Thackeray vd. 2007, Ghosh vd. 2021).

Son zamanlarda ise NMC katot elektrot aktif malzemelerine alternatif olarak geliştirilen nikelce zengin $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_z)\text{O}_2$ (NCA) katot elektrot aktif malzemeler, yüksek kapasitelerinden ötürü tercih edilse de yüksek nikel oranı güvenlik açısından risk oluşturmaktadır. Günümüzde Panasonic ve Samsung SDI firmaları NCA üretiminde öne çıkmaktadır. Bu noktada nikel içeriği yüksek tabakalı yapıya sahip katot malzemelerin sentezi için SK ON ve Samsung SDI önemli sonuçlar elde etmişlerdir. Leclanché 2024, LG Energy Solutions ve CATL 2025'den itibaren yüksek Ni içeren tabakalı yapıdaki malzemelerin kitlesel üretimine geçeceğini duyurmuştur. Kullanıcı olarak da Tesla ve GM motor LG ES firmasını NMCA kimyasına önem verirken, BMW, GM ve Toyota yüksek Ni içereklili malzemeyi sırasıyla 2025, 2026 ve 2028'de ticari uygulamada kullanacaklarını açıklamışlardır.

1.1.2. Spinel katot elektrot aktif malzemeler

1983 yılında, spinel yapıya sahip olan LiMn_2O_4 malzemesi, tabakalı katot elektrot aktif malzemelere alternatif olarak önerilmiştir. Spinel katot elektrot aktif malzemeler kübik kristal sistemi, $\text{Fd}3\text{m}$ uzay grubu ve LiM_2O_4 ($\text{M}=\text{Co}$, Ni veya Fe) bileşimine sahiptir. LiMn_2O_4 bileşiminin en önemli avantajı, Mn elementinin Co elementinden çok daha ucuz olmasıdır. Yapılan deneysel çalışmalar LiMn_2O_4 katot elektrot aktif malzemesinin Li metaline karşı 4,1 V gerilime kadar çalışabileceğini göstermiştir. Ayrıca LiMn_2O_4 yüksek akımlarda iyi şarj/deşarj performansı, elektrokimyasal tersinirlik, ısıl kararlılık ve düşük maliyet gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır (Li vd. 2009). Buna karşın LiMn_2O_4 katot aktif malzemesinin tabakalı katot elektrot aktif malzemelere göre düşük pratik kapasiteye ve kapasite korunumuna sahip olması ticari uygulama için önemli bir engel oluşturmaktadır. Kapasitedeki bu hızlı düşüş, 4V civarında elektrolitte bulunan HF asidinin Jahn Teller etkisindeki mangany çözmesinden kaynaklanmaktadır (Yamada 1996). LiMn_2O_4 , sahip olduğu elektronik konfigürasyon nedeniyle, Mn iyonlarının yarısını Mn^{3+} ve yarısını ise Mn^{4+} şeklinde içermektedir. Pilin yüksek akımlardadeşarj edilmesi durumunda lityum iyonlarının elektrolitteki difüzyon hızı, spinel LiMn_2O_4 partikülün içindeki difüzyon hızından çok daha yüksektir. Bu durum hem lityum iyonlarının spinel yüzeyine birikerek denge dışı dinamik bir durum oluşturmalarına hem de LiMn_2O_4 bileşiminde Mn^{3+} açısından zengin bir bölge oluşmasına neden olarak malzeme elektron konfigürasyonunda değişiklik meydana gelmesine neden olmaktadır. Oluşan Mn^{3+} iyonları Mn^{2+} iyonlarının sıvı elektrolit içinde çözünmesine ve kristal simetrisinde de dönüşüme neden olmaktadır (Van der Ven 2000, Tesfamhret vd. 2021).

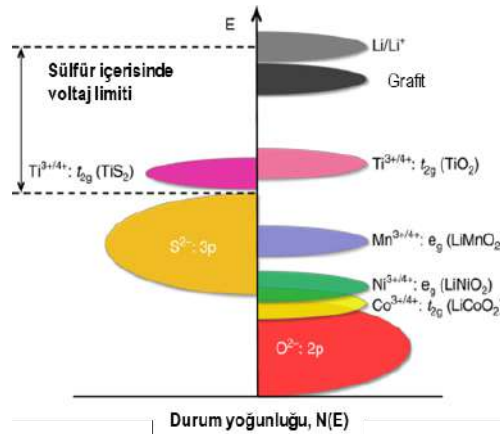
Nissan Leaf’de kullanılmış olan bu kimya temel olarak elektrikli bisiklet gibi maliyetin önem kazandığı uygulamalarda tercih edilmiştir.

1.1.3. Olivin tipi katot elektrot aktif malzemeler

Olivin tipi kristal yapıya sahip olan LiFePO_4 (LFP) ise, oksijenin güçlü kovalent bağlar ile fosfor-atomuna bağlanması nedeniyle düşük elektronik iletkenliğe sahip olmasına rağmen, tabakalı yapıda ve spinel yapıda katot elektrot aktif malzemelere göre daha yüksek termal kararlılığa ve daha güvenli yapıya sahiptir. LFP’nin elektronik ve iyonik iletkenliğini artırmak için partikül boyutunun küçültülmesi ve/veya iletken karbon ile kaplanması yaklaşımları kullanılmaktadır. Ancak bu yaklaşımlar, genelde katot aktif malzeme üretim maliyetinin artmasına neden olmaktadır.

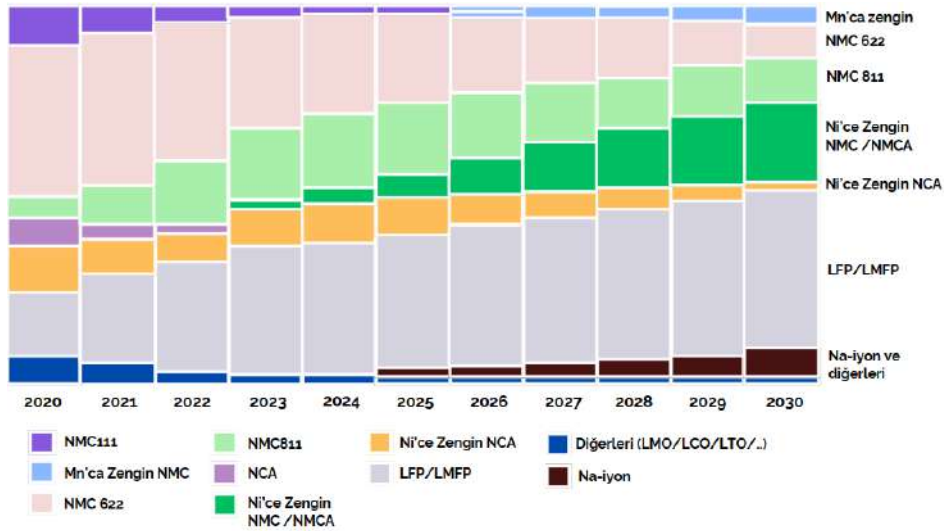
Pnma uzay grubuna ve ortorombik kristal sistemine sahip olan olivin yapısındaki katot elektrot aktif malzemeler Li difüzyonu için tek boyutlu tünelin bulunduğu ağ kafesine sahiptir. (Yamada vd. 2003). Bu durumda lityum iyonlarının difüzyonu sadece bir boyutta (010) gerçekleşmektedir (Şekil 2.c). Bu nedenle yapı hızlı iyon giriş ve çıkışına imkan vermemekte olup yüksek akım değerlerinde pil kapasitesinin düşük olmasına neden olmaktadır.

Günümüzde LFP kimyası Çin’de sıklıkla kullanılmaktadır. Son dönemde daha yüksek voltaja sahip LMFP kimyası üzerine de çalışmalar artmıştır. $\text{Fe}^{+3/+2}$ ’nin 3,6V’da $\text{Mn}^{+3/+2}$ ’nin de 4,1V’da tepkime verdiği bilindiği için LFP yapısına kısmen Mn ilavesiyle daha yüksek performans elde edilmesi beklenir. Günümüzde CATL, JEVE, Rept Battery firmaları bu kimya üzerine çalışmalarına devam etmektedir. Çinli Gotion ve Nio firmaları da bu kimyayı gelecek için ümit vaad edici olarak tanımlamışlardır.



Şekil 3. Çeşitli metalik türlerin redoks enerji seviyelerinin oksijenin 2p bandının üst enerji seviyesine göre konumları (Manthiram 2020)

Ticari katot aktif malzemelerinin 2020-2030 arasında beklenen tüketim miktarlarının yıllara göre dağılımı Şekil 4’de görülmektedir. Sonuçlar 2030 yılına kadar kobalt miktarı azaltılmış, nikel miktarı artırılmış katot kimyalarının kullanımının artacağına işaret etmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Ticari katot aktif maddelerin 2020-2030 yılları arasında beklenen tüketim miktarlarının yıllara göre batarya hücresi talep öngörüsü (Bernhart vd., 2023)

Katod elektrot aktif malzemelerin maliyet, kapasite, güç, güvenlik, performans ve ömür gibi özellikleri esas alınarak yapılan değerlendirme Şekil 5’de özet olarak sunulmuştur. Tablo 1’de en çok kullanılan katod elektrot aktif malzemelerin özgül kapasite ve enerji yoğunluğu değerleri verilmiştir. Nikel bakımından zengin olan NMC katod elektrot aktif malzemelerin enerji yoğunluğunun diğer kimyaların sergilediği enerji yoğunluğundan daha yüksek olduğu görülmektedir (Lee ve Manthiram 2022).



Şekil 5. Katod aktif malzemelerin maliyet, kapasite, güç, güvenlik, performans ve ömür özellikleri (Miao vd. 2019)

1.2. Katod elektrot aktif malzemeden beklenen özellikler

Günümüze kadar yapılan araştırma—sonuçları dikkate alındığında katod elektrot aktif malzeme özellikleri ve pil performansı arasında önemli ilişkiler olduğu bulunmuştur. Şekil 6, yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek performansa sahip katod elektrot aktif malzeme üretiminin pil performansı açısından ne kadar kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Katod özellikleri ve pil özellikleri arasındaki ilişki de Şekil 6’da özetlenmiştir.



Şekil 6. Katot elektrot aktif malzeme özelliklerinin pil davranışına olan etkisi (Şahan 2009).

Tablo 1. Ticari katot elektrot aktif malzemelerin özellikleri (Young vd. 2012, Nitta vd. 2015, André vd. 2015)

	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄	LiNiMnCoO ₂	LiNiCoAlO ₂
Yıl	1980	1983	1996	1999	1999
Kristal Yapı	Tabakalı Trigonal	Spinel Rombohedral/ Tetragonal (3D Li ⁺ difüzyonu)	Olivin Ortorombik (1D Li ⁺ difüzyonu)	Tabakalı Rombohedral	Tabakalı Hekzagonal
Voltaj (Li/Li⁺) (V)	~3,9	~4,1	~3,5	~3,7	~3,7
Teorik özgül kapasite (mA·sa⁻¹·g⁻¹)	274	148	170	~280	~279
Pratik özgül kapasite (mA·sa⁻¹·g⁻¹)	140	100-120	165	111:160 622:180	~180-200
Özgül enerji yoğunluğu (W·sa·kg⁻¹)	520-550	430-470	490-580	600-650	700-750
Hacimsel enerji yoğunluğu (W·sa·L⁻¹)	400	350	350	500	550
İletkenlik (S·cm⁻¹)	1.10 ⁻³	1.10 ⁻⁴	1.10 ⁻⁹	5.10 ⁻⁸	4.10 ⁻⁴
Birim alan başına kapasite (mA·sa·cm⁻²)	2,0	1,25	1,25	2,0	2,0
Kullanım alanı	Taşınabilir elektronik cihazlar	Yüksek güç yoğunluğu gerektiren cihazlar	Elektrikli araçlar (otobüs, kamyon, forklift)	Taşınabilir cihazlar, elektrikli araçlar	Üst segment elektrikli araçlar
Elektrikli araçlarda kullanım durumu		Nissan Leaf, BMW i3, Chevy Volt	Chevrolet Spark	Renault, BMW, Nissan, Peugeot	Tesla

Şekil 6'da sunulan bilgiler dikkate alınarak katot elektrot aktif malzemelerden beklenen özellikler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Kristal kafes, lityum iyonlarının yerleşmesine olanak verecek şekilde uygun büyüklükte boşluklar içermeli,
- Açık devre potansiyeli yüksek olmalı (Fermi düzeyi enerjisi ve Li⁺ iyonlarının konum enerjisi düşük olmalı),
- Elektrot potansiyeli, lityum miktarı ile fazla değişmemeli,



- Yüksek kapasiteye ulaşmak için formül birimi başına kristal kafese katkılanan lityum miktarı yeterince büyük olmalı,
- Özgül enerjinin büyük olması için formül ağırlığı küçük olmalı,
- Enerji yoğunluğunun büyük olması için molar hacim küçük olmalı,
- Şarj/deşarj hızının yüksek olması için lityumun kafesten ayrılma ve kafese giriş difüzyon hızı yüksek olmalı,
- Şarj/deşarj döngü sayısının büyük olması için lityum içerme tepkimesi yeteri kadar tersinir olmalı,
- Kristal kafesindeki konumların büyüklüğü elektrolitteki çözücü türlerin şarj/deşarj sırasında yerleşebileceği kadar büyük olmamalı,
- Elektrolite karşı kararlı olmalı,
- Yüksek akım yoğunluğunda kapasite korunumu için katot aktif malzemenin elektronik iletkenliği yeteri kadar büyük olmalı, (LMNO: 10^{-4} - 10^{-5} S·cm⁻¹, LFP: 10^{-9} S·cm⁻¹, NMC811: 10^{-5} S·cm⁻¹, NMC111: 10^{-8} S·cm⁻¹, NCA: 10^{-4} S·cm⁻¹)
- Ucuz olmalı, hammaddesi kolay bulunabilmeli ve çevre dostu olmalı,
- Kolay üretilebilmeli.

1.3. Katot elektrot aktif malzemelerin üreticileri ve üretim yöntemleri

Katot elektrot aktif malzemelerin üretim yönteminin malzemenin elektrokimyasal performansında oldukça etkili olduğu bilinmektedir. Hedeflenen uygulama alanına göre katot aktif malzemelerinin özellikleri (partikül boyut dağılımı, yüzey alanı, morfolojisi, kimyasal içerik, vb.) tasarlanmakta ve üretimi gerçekleştirilmektedir. Örneğin, NMC ve NCA katot elektrot aktif malzemelerin üretiminde birlikte çöktürme yöntemi tercih edilirken, LFP katot elektrot aktif malzemelerin üretiminde katı hal yöntemi/karbotermal indirgeme yöntemi tercih edilmektedir. Başlıca üretim yöntemlerine ait avantaj ve dezavantajlar Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Katot elektrot aktif malzemelerin üretim yöntemleri

	Avantajları	Dezavantajları
Birlikte çöktürme	Endüstriyel üretime uygun, küresel morfolojiye sahip partiküllerin elde edilebilmesi, elementlerin atomik düzeyde karışabilmesi;	Yıkama, kurutma işlemlerinin çok sayıda tekrarlı ve sürelerinin uzun olması, tam çökelmenin olamama durumu, yabancı iyon etkisi;
Sol-jel	Sentezin basit ve verimli olması, son ürünlerin saf olarak sentezlenebilmesi, öncül bileşenlerin çözelti fazında olması nedeniyle yüksek kimyasal reaktivite göstermeleri, gözenek ve partikül boyutunun ayarlanabilmesi, sentez sıcaklığının daha düşük olması;	Öncül bileşenlerin pahalı olması, daha uzun proses süresi, jelleşmeden sonraki kurutma sırasında partiküllerde mikro çatlakların oluşma riskinin yüksek olması, aşırı gözenek oluşumu ve sentez sırasında OH gruplarının varlığı;
Hidrotermal	Kolay, ekonomik ve yüksek verimlilikle nanoyapılı madde sentezlenebilmesi. partikül boyutlarının ayarlanabilmesi;	Uzun sentez süreleri ve pahalı reaktörlere ihtiyaç duyulması;
Katı hal tepkimesi	Daha az cihaza gereksinim olması, metal oksit veya karbonatlarının doğrudan kullanılabilmesi, karıştırmanın ardından ısıtma işlemi başlanabilmesi.	Başlangıç maddelerinin tam karışmaması, homojen olmayan partikül dağılımı, uzun süren ısıtma işlem basamakları ve yüksek ısıtma sıcaklığı



Tablo 3. Bazı pil üreticilerinin elektrik araç bataryalarında kullandığı katot elektrot aktif malzemeler ve hücre/batarya özellikleri

Araç modeli	Hücre kimyası	Hücre			Batarya		
		Hücre üretici	Hücre tipi	Özgül enerji yoğunluğu (W·sa/kg)	Hacimsel enerji yoğunluğu (W·sa/L)	Toplam pil kapasitesi (kW·sa)	Menzil (km)
BMW i3 (120 A.sa)	NMC 622	Samsung SD1	-	152	-	42,2	-
BYD e6	LFP	BYD	Prizmatik	120	220	61	300
Chevrolet Bolt EV	NMC 622	LG Chem.	Kese	151	228	65	417
Chevrolet Spark EV	LFP/C	LG Chem.	Kese	90	144	19	132
Eski BMW i3	NMC 111	Samsung SD1	-	174	352	33,77	-
Eski Renault ZOE	NMC 622	LG Chem.	Kese	145	-	44,1	-
Fiat 500e	NMC-LMO/C	Samsung SDI	Prizmatik	126	-	42	320
Ford Focus EV	NMC-LMO/C	LG Chem.	Kese	-	-	35,5	160
Honda Fit EV	NMC/LTO	Toshiba	Prizmatik	89	200	20	130
Hyundai Kona Electric	NMC 622	LG Chem.	-	142	164	64	484
Hyundai Ioniq Electric	NMC 622	LG Chem.	-	112	-	40,4	-
Jaguar I-Pace	NMC 622	LG Chem.	-	149	-	90	-
Kia Soul EV	NMC/C	SK Innovation	Kese	250	-	64	391
Mitsubishi i-MiEV	NMC-LMO/C	Li Energy Japan	Prizmatik	109	218	16	132
Nissan Leaf E Plus	NMC 532	Envision AESC	Kese	151	-	62	-
Nissan Leaf	NMC 532	Envision AESC	Kese	130	205	40	-
Peugeot e-208	NMC 532	CATL	-	140	-	50	-
Smart Fortwo EV	NMC/C	LG Chem.	Kese	152	316	17	145
Tesla Model 3	NCA/Si-C	Panasonic	Silindirik	260	683	80,5	350-500
Tesla Model S	NCA/C	Panasonic	Silindirik	236	673	102,4	330-500
Tesla Model X	NCA/Si-C	Panasonic	Silindirik	236	673	60-100	330-500
TOGG T10X	NMC 811	Farasis/Siro	Kese	-	-	88,5	523
VW eGolf	NMC/C	Samsung SDI	Prizmatik	185	357	36	300
Yeni Renault ZOE	NMC 721	LG Chem.	Kese	160	166	52	395



1.4. Lityum iyon pil pazarı ve katot elektrot aktif malzeme pazarında son durum:

Katot elektrot aktif malzemeler, sahip oldukları özelliklere göre farklı uygulama alanlarında tercih edilmektedir (Tablo 1). Dünya’da yüksek miktarda katot aktif malzeme üretimi yapan firmalar Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. 2023 yılında yüksek miktarda katot aktif malzeme üretimi yapan firmalar ve 2028 yılı üretim öngörüsü. (Int. Kyn. 2)

Sıra	Şirket	Üretim yapılan ülke	Üretilen kimya	2023 kapasitesi (kiloton/yıl)	2028 kapasitesi (kiloton/yıl)
1	Shenzen Dynanonic	Çin	LFP, LMFP	540	870
2	Hunan Yuneng	Çin	LFP, LMO, LCO	317	900
3	Lopal	Çin, Endonezya	LFP	270	440
4	Ningbo Ronbay	Çin, Güney Kore	NMC, NCA, LFP	253	348
5	Easpring	Çin, Finlandiya, Hindistan	LCO, NMC, LFP	246	566
6	Ecopro	Güney Kore, Macaristan, Kanada	NMC, NCA	179	422
7	Umicore	Güney Kore, Çin, Polonya, Belçika, Kanada	NMC, LCO	149	648
8	L&F	Güney Kore	NMC, LMO	131	281
9	Posco	Çin, Güney Kore, Kanada	NMC, LMO	128	264
10	Northvolt	İsveç, Kanada	NMC	0	312

Katot aktif malzeme üretimi temel olarak Çin, Güney Kore ve Japonya gibi Asya kıtasındaki ülkelerde gerçekleştirilmektedir. LFP üretiminde Çin’de Shenzhen Dynanonic, Hunan Yuneng ve Lopal firmaları yılda ortalama 1.000 tondan fazla malzeme üretmektedirler. Güney Kore’de ise L&F, Posco, Ecopro firmaları yılda ortalama 400 tondan fazla malzeme üretmektedirler. Varolan analizler günümüzde üretilen toplam katot aktif malzeme miktarının 3700 kiloton olduğunu, 2028’e kadar bu miktarın 8.350 kiloton’a çıkmasının beklendiğini göstermektedir. Varolan üretiminin bugün %78’ini Çin yaparken, 2028’de bu rakamın %59 mertebelerine düşeceği öngörülmektedir.

Avrupa ve Kuzey Amerika’da ise BASF, Ecopro ve Umicore yanı sıra Freyr Battery (Norveç, Finlandiya), Northvolt (İsveç, Kanada), Mitra Chem, Redwood Materials firmaları da üretime başlayacaklarını duyurmuşlardır.

Endonezya Dünya’da Nikel üretiminde öncü olması ve ülkeden nikel ihracatını hükümet politikası olarak yasaklaması ardından 2028’e kadar 75 ton katot aktif madde üretimi yapma hedefini açıklamıştır. Bu firmalar bu sebeple Endonezya’ya yatırım yapmaktadırlar.

Kitlesel açıdan bakıldığında 2025 yılına kadar toplamda 800 GW-sa büyüklüğünde pil üretimi yapacak fabrikanın açılması beklenmektedir (Int. Kyn. 3, 4). Kıtalar bazında kurulacak batarya fabrikaları ve fabrikalarda yapılması planlanan prosesler (elektrot üretimi, hücre birleştirme, modül ve paketleme) literatürde bulunmaktadır (Int. Kyn. 5).

Dünya’da önümüzdeki yıllarda faaliyet gösterecek pil fabrikalarının kullanacağı katot elektrot aktif malzemelerin listesi Tablo 5’de verilmiştir. Büyük bir kısmının henüz kurulum aşamasında olduğu bu firmalar, katot elektrot aktif malzeme üretim hatlarını tamamen devreye almamışlardır.



Tablo 5. Dünya genelinde faaliyette olan ve faaliyete geçmesi beklenen pil fabrikaları ve pillerde kullanılması planlanan katot elektrot aktif malzemeler. (Int. Kyn. 7, 8).

24m	A123	ACC	Altairnano	ABF	Amprius	AMTE Power	Aspisan Energy	ATL	ATLIS	BAK Energy	BasqueVolt
SSB	NMC, LFP	NMC, LFP	LTO	LFP	LCO, NCA, NMC	NCA, SiB	NMC	NMC	NMC	LFP	SSB, NMC
Beyonder	Blue Solutions	Britishvolt	BTS Power	BYD	CALB	CATL	CBAK	Cellforce Group	CHAM	CosMX	Custom Cell
LFP	Katı Hal	NMC	LFP	NMC, LFP, LMFP	NMC, LFP	LFP, NMC, LMFP, SiB	LFP, NMC	-	NMC	NMC	NMC, LFP, NMO
DMEGC	Durapower	EAS Batteries	Electrochem	Electrovaya	ElevenES	Enevate	Enovix	EnPower	Envision AESC	Eurocell	EVE
Alkalin, NMC	NMC	LFP, NCA	LIS	SSB	LFP	NMC	-	-	NMC	NMC, LCO	LFP, NMC
EVPST	FAAM	Factorial	Farasis	FDK	FEB	Frey Battery	Freyr	Gangfeng Lithium	Goldencell	Gotion	Greenway
LFP	LFP, NMC	SSB	LFP, NMC	NiMH	NMC	LFP	LFP	SSB, LFP, NMC	NMC, LFP	LFP	NMC, LFP
Grepow	GS Yuasa	Great Power	Hithium	Ilıka	iM3NY	Impact	InnoLith	InoBat	Inobat Auto	IonBlox	ItalVolt
NMC, LFP	NiCd	LFP, LMO, NMC	LFP	SSB	LFP	NMC	NMC	LFP	NMC	NMC	NMC
Kokam	Kore Power	Lechanche	LeydenJar	LG Energy	Lishen	LithiumWerks	MES	Microvast	Molicel	Morrow	Murata
-	NMC, LFP	NMC, LTO	NMC	NMC, NCA	LFP	LFP	NMC	NMC	NMC	NMC	NMC, NCA
Nanotech Energy	Narada	Natron Energy	Northvolt	Novali	Ola	One	Panasonic	Phi4tech	Phylion	PLB	PowerCo
-	LFP	SiB	NMC, SiB	LFP, NMC	NMC	LFP	NiMH, NMC, NCA	-	LFP	LFP	LFP, NMC
Prime Battery Technologies	Prime Planet Energy & Solutions	ProLogium	QinetiQ	Quantum Scape	REPT	Route Jade	Saft	Sakuu	Samsung	Samsung SDI	SES
NMC	SSB	SSB	LIS	SSB	LFP, NMC	LiPo	LFP, Alkalin	SSB	NMC, NCA	NMC, NCA	LFP, Alkalin, LTO
SinoWatt	Sion Power	Siro	SK Innovation	SK On	Solid Power	StoreDot	Sunwoda	SVOLT	Swiss Clean Battery	TeraFactory	Tesla
-	NMC, LFP	NMC	NMC	NMC	SsB	NMC, LFP	NMC, LFP	NMC, LFP	-	LFP	NCA, NMC
THLB	ThunderSky Winston	Toshiba	UniverCell	Varta	Veken	Verkor	Volkswagen	Welion	West Midlands	XALT Energy	YiFang Power
NMC, LFP	LFP	LTO	NCA, LFP, NMC	NMC, Alkalin	LFP, NMC	NMC, NCA	NMC	LTO, LFP, NMC, NCA, SSB	-	NMC	NiMH, LFP, NMC

SiB: Sodyum-iyon, SSB: Katı hal, LIS: Lityum-sülfür, LiPo: Lityum-polimer, NiMH: Nikel metal hidrür , NiCd: Nikel kadminyum

ABD Enerji Bakanlığı'nın 2019'da yayınladığı 'Enerji Depolama Teknolojisi ve Maliyet Karakterizasyonu Raporu'ndan alınan bilgiler doğrultusunda farklı enerji depolama sistemleri için sermaye, güç dönüştürme ve enerji üretim sistemlerinin inşaat ve satın alma dahil maliyetleri incelenmiştir. Çalışma Argonne Ulusal Laboratuvarı, Idaho Ulusal Laboratuvarı, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı, Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı ve Pasifik Kuzeybatı Ulusal Laboratuvarı personellerinden oluşan bir ekip tarafından yürütülmüştür. Projede, araştırılan 2018 yılına ait Li iyon-pil sistemleri maliyet analizinin sonuçları ve 2025'e ait tahmini değerler görülmektedir. Veriler artan üretim hacmine bağlı olarak 2025 yılında maliyetlerde düşüşün meydana gelebileceğini göstermektedir (Int. Kyn. 6).

Li iyon pil fabrikasında hücre üretiminde kullanılan malzemelerin ortalama birim fiyatları Tablo 6'da verilmiştir. Kullanılan malzemelerin miktarları ve dolayısıyla birim fiyatları pillerin kullanım alanına göre değişmektedir. Li iyon pillerde kW-sa başına maliyeti en yüksek olan bileşenlerin sırasıyla katot elektrot aktif malzemesi, anot elektrot aktif malzemesi ve elektrolit olduğu görülmektedir (Tablo 6).

Li iyon pilin hücre ve paket maliyetinin yıllara göre değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Bir lityum iyon hücresinde elektrot, elektrolit, seperatör ve diğer pil bileşenleri vardır. Modülde hücrelere ilave olarak çok sayıda kontrol ünitesi ve sensörler bulunur. Pakette ise modüllerin güvenle hizmet etmesi için batarya yönetim ve soğutma sistemleri bulunur. 2010-2017

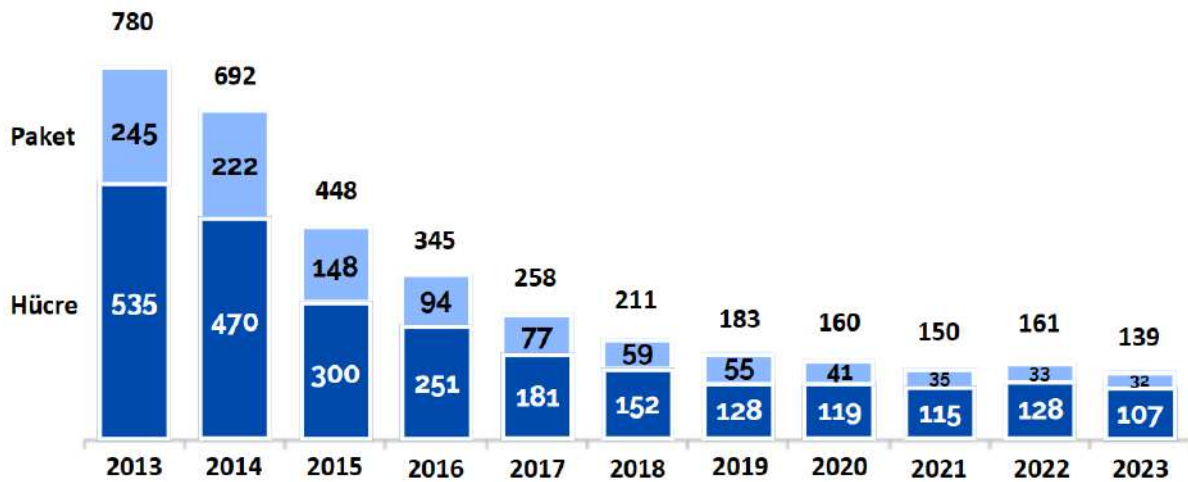
yılları arasında pil fiyatları % 80 azalarak yaklaşık 200 \$ / kW-sa'e düşmüştür. Ayrıca önümüzdeki 8 yıl içerisinde fiyatların yaklaşık 96 \$ / kW-sa değerine kadar düşeceği tahmin edilmektedir (EASE 2016).

Bir Li iyon pil paketine ait maliyet analizi, Şekil 8.a-b esas alınarak yapılabilir. Analize göre katot üretim maliyeti bir hücrenin maliyetinin %51'ini, paket maliyetinin %25'ini oluşturmaktadır. Belirtmek gerekir ki üretilen pil veya modülün tipine, kimyasına ve üretim hacmine bağlı olarak bu oranlar değişebilmektedir.

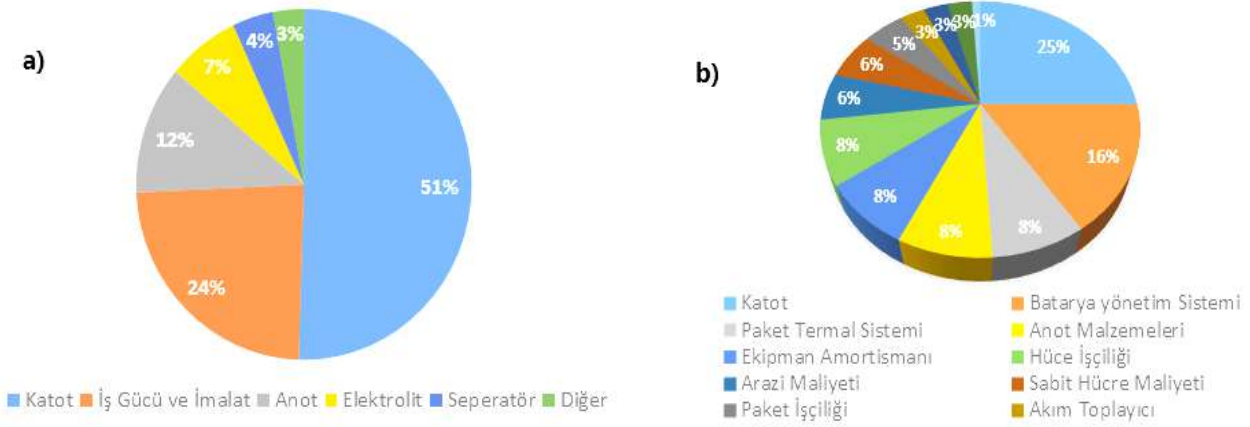
Tablo 7'de bir 10 kW.sa'lık batarya modülünde 1kW-sa enerji depolamak için farklı formülasyon ve özelliklere sahip katot elektrot aktif malzemelerin gerekli miktarlarının ve maliyetlerinin farklı olduğu görülmektedir. Ayrıca, tabakalı, spinel ve olivin yapıya sahip katot elektrot aktif malzemelerin maliyet oranları karşılaştırması da Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 6. Lityum iyon pil fabrikasında üretimde kullanılan malzemelerin ortalama fiyatları (Emilsson vd. 2019, Lowe vd. 2010, TC. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2021, Knehr vd. 2022, Int. Kyn. 9)

Malzeme	Tanımı	Birimi	Fiyatı
Anot aktif malzemesi	Doğal grafit/ Sentetik grafit	\$ /kg	10,0
Bağlayıcı	SBR	\$ / kg	1,92
Çözücü	Su	\$ /kg	-
Akım toplayıcı	Bakır folyo	\$ / m ²	0,2
Katot aktif malzeme	NMC111	\$ / kg	25,5
İletken madde	Karbon siyahı	\$ / kg	7,0
Bağlayıcı	PVDF	\$ / kg	15
Çözücü	NMP	\$ / kg	2,7
Akım toplayıcı	Alüminyum folyo	\$ /m ²	1,2
Ayırıcı (seperatör)	PP (kaplanmamış)	\$ /m ²	0,9
Elektrolit	LiPF ₆ -EC/DMC vs.	\$ / L	10,0



Şekil 7. Lityum iyon pilin hücre ve paket maliyetinin (\$/kW-sa) yıllara göre değişimi (Int. Kyn. 10)



Şekil 8. (a) Lityum iyon hücre ve (b) batarya paketi maliyet analizi (Int. Kyn. 11) (Houache vd. 2022, Pişkin 2018)

Tablo 7. Katot elektrot aktif malzemelerin enerji yoğunluğu, maliyeti ve kullanım ömrü karşılaştırması (Ahmed vd. 2017, Porzio vd. 2021, S. Ahmed vd. 2017, Int. Kyn. 12 ve 13, Jasper vd. 2022, Ma vd. 2021)

Katot elektrot aktif malzeme kimyası	1kWsa için katot miktarı (g /kW-sa) *	1kWsa için grafit anot miktarı (g /kW-sa) **	1 kg katot aktif malzeme fiyatı (\$)	Kullanım ömrü (%80 DOD'a ininceye kadar çevrim sayısı)
LiMn ₂ O ₄ (LMO)	2.341,74	793,59	9	2.000
LiNiMnCoO ₂ (NMC811)	1.257,53	841,18	26	2.000-6.000
LiNiMnCoO ₂ (NMC622)	1.481,48	840,45	25	2.000-6.000
LiNiMnCoO ₂ (NMC111)	1.757,45	858,02	23	4.000
LiFePO ₄ (LFP)	2.031,28	956,61	10	3.000
LiNiCoAlO ₂ (NCA)	1.358,70	857,71	23,4	5.000

*10 kW-sa'lık batarya modülünde 1 kW-sa enerji depolama için kullanılacak toplam katot miktarı

** 10 kW-sa'lık batarya modülünde 1 kW-sa enerji depolama için kullanılacak toplam grafit anot miktarı

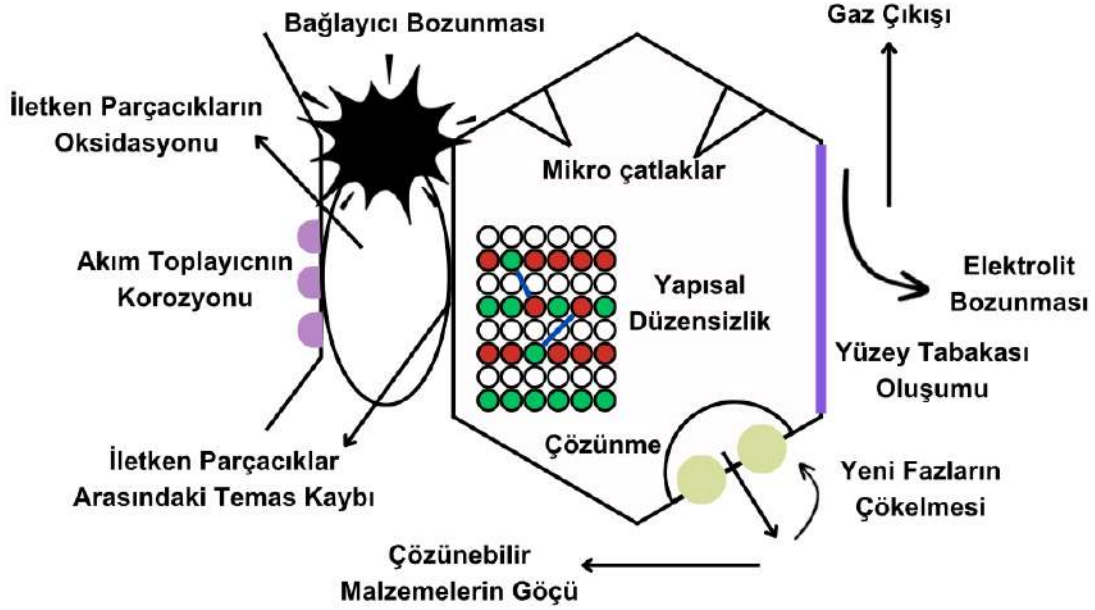
Katod elektrot aktif malzeme üretim maliyetini düşürmek için farklı yaklaşımlar sergilenmektedir. Bunlar temel olarak malzeme ve proses iyileştirme başlıkları altında değerlendirilebilir. Araştırmacılar bu çerçevede kobalt içermeyen malzeme kimyası geliştirmenin yanı sıra, üretim hacmini artırma, üretim yöntemini optimize etme (Alpay 2020, Topaktaş vd. 2024), hücre tasarımını optimize etme, 18650 yerine 21700 boyutunda hücre kullanılması üzerine de çalışmaktadır.

1.5. Katod elektrot aktif malzemelerin bozunma mekanizmaları ve performans iyileştirici yaklaşımlar

Nikelce zengin tabakalı yapıya sahip olan katod aktif malzemeler Ni içeriğiyle ilişkili olarak yüksek kapasite sergilemektedirler; ancak pratik uygulama sırasında çevrim sayısına bağlı kapasitede azalma ve termal kararsızlık kaynaklı güvenlik problemleri ortaya çıkmaktadır (Noh 2013). Nikelce zengin katod elektrot aktif malzemelerde karşılaşılan bu güvenlik sorunları, Şekil 9'da özetlenmiş olan çeşitli bozunma mekanizmalarından kaynaklanmaktadır.

Temel olarak bozunma mekanizmaları katod elektrot maddesinin üretimi ve test koşullarına bağlı olarak sınıflandırılabilir. Üretim koşullarındaki dengesizlik sebebiyle meydana gelen uygun olmayan morfoloji, heterojen atomik dizilim ve katyonik düzensizlik üretime bağlı oluşan bozunma mekanizmalarının en önemli sebepleridir (Zhao vd. 2017). Öte yandan, çevrim testi sırasında Ni iyonlarının bulunması gereken yerden Li tabakalarına göç etmesiyle tabakalı yapının kararsızlaşması ve spinel yapıya dönüşümü gerçekleşmektedir (Gu vd. 2012). Çevrim testi sırasında katod aktif malzeme yapısında meydana gelen faz dönüşümleri de birim hücrede boyutsal farklılaşmaya sebep olarak aktif maddede mikro çatlak oluşumuna (lityum iyonlarının aktif malzemeye giriş ve çıkışı esnasında malzemelerin molar

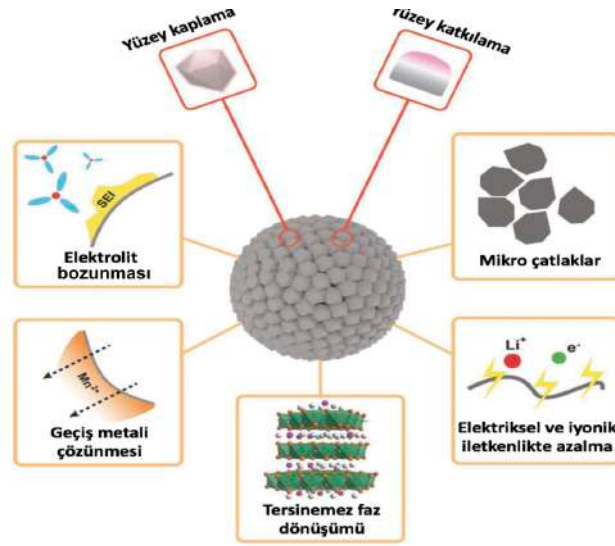
hacminde meydana gelen değişiklikler malzeme üzerinde gerinme, mekanik stresler ve faz geçişleri meydana getirerek zamanla hem yapısal hem de morfolojik bütünlüğünün azalmasına neden olur) ya da akım toplayıcı yüzeyinden sıyrılma/kopmalara sebep olabilmektedir. Ayrıca galvanostatik test sırasında bağlayıcı, iletken karbon, akım toplayıcı gibi bileşenlerin aşınması; elektrolit bileşenlerinin oksidasyonu sonrası elektrot/elektrolit ara yüzeyinde yüksek dirence sahip oksit film tabakasının oluşması ve katot aktif malzemesinden çözünen iyonların negatif elektrot ile etkileşime girmesi gibi durumlar katot aktif malzemelerde karşılaşılan başlıca bozunma mekanizmaları olarak gösterilmiştir (Lin vd. 2015, Qiu vd. 2021, Hamidah vd. 2018, Lei vd. 2022, Hestenes vd. 2022, Kim vd. 2019, Besli vd. 2018).



Şekil 9. Katot elektrot aktif malzemelerde görülen temel bozunma mekanizmaları (Lin vd. 2015)

Birbirine bağlı olan bütün bu mekanizmalardan birinin harekete geçmesi diğer mekanizmaları da tetiklemektedir. Bu bağlamda, Li iyon hücrelerin kararlılığını, çevrim ömrünü ve performansını iyileştirebilmek amacıyla katot bozunma mekanizmalarının iyi bir şekilde anlaşılması ve bu mekanizmalar paralelinde mevcut katot elektrot aktif malzemelerin modifiye edilmesi ya da yeni katot elektrot aktif malzemelerin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Katot elektrot aktif malzemelerin bozunmasının etkilerini önlemek veya azaltmak için kullanılan başlıca stratejiler aşağıda özetlenmiştir (Şekil 10):

- Katot elektrot aktif malzemelerin Mo^{6+} , Zr^{4+} , Ti^{4+} , B^{3+} , P^{5+} , Nb^{5+} , Ga^{3+} , Al^{3+} , Mg^{2+} , Ta^{5+} , F^- , Cu^{2+} ve Br^- gibi iyonlar ile katkılanması (Wang vd. 2023, Yan vd. 2020, Jiang vd. 2021, Ko vd. 2023, Sivlin 2019, Ahaliabadeh vd. 2022)
- Katot elektrot aktif malzemelerin metal oksitler (Al_2O_3 , TiO_2 ve ZrO_2), polimerler, fosfat vb. ile kaplanması (Ahmed vd. 2016, Min vd. 2017, Kwon vd. 2018, Nisar vd. 2019, Muralidharan vd. 2020, Tan vd. 2020, Qureshi vd. 2022, Somo vd. 2021, Kaur, Gates 2022, Ahaliabadeh vd. 2022),
- Tercihli kristal yönlenmeye sahip ve/veya tek kristal partikül büyütme (Engün vd. 2023, Kim vd. 2020, Li vd. 2017),
- Çekirdek-kabuk ve/veya derişim gradyanlı katot elektrot aktif malzemelerin üretimi (Sun vd. 2005, Kim vd. 2019, Liu vd. 2020, Park vd. 2021, Int. Kyn. 14)

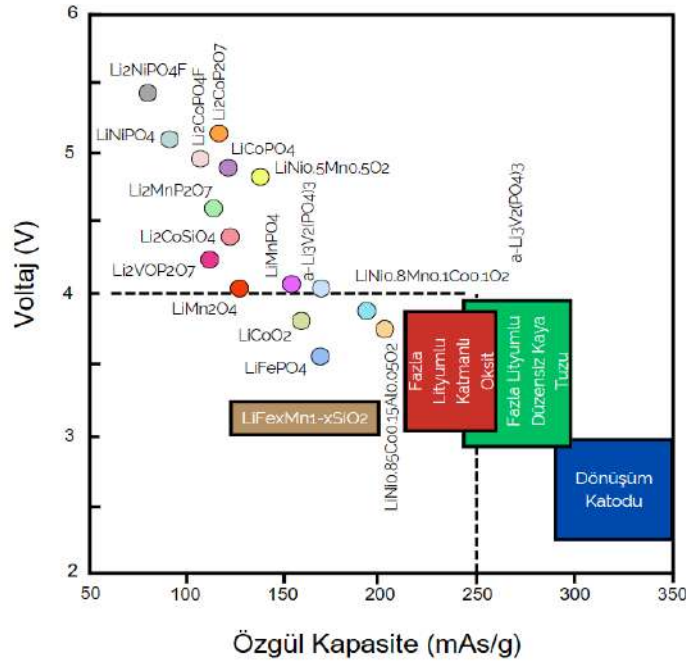


Şekil 10. Katot elektrot aktif malzemelerinin yüzey davranışları ve yüzey modifikasyon yöntemleri (Xiao vd. 2018)

1.6. Yeni nesil katot elektrot aktif malzemeler ve özellikleri

Günümüzde yeni nesil katot aktif malzemelerin sentezi üzerine araştırmalar sürmektedir. Farklı malzemelerin özellikleri Şekil 11’de ve Tablo 8’de özetlenmiştir. Buna göre maddeler 5 grupta incelenebilir.

- Lityumca zengin katot elektrot aktif malzemeler
- Organik yapıda katot elektrot aktif malzemeler
- Metal halojenür katot elektrot aktif malzemeler
- Yüksek voltajlı spinel katot elektrot aktif malzemeler
- Düzensiz kaya tuzu yapısında katot elektrot aktif malzemeler



Şekil 11. Yeni nesil katot elektrot aktif malzemeler (Ghosh vd. 2021).



Tablo 8. Yeni nesil katot elektrot aktif malzemeler ve özellikleri (Hy 2016, Luo 2016, Seo 2016, Li 2014, Zhu 2019, Sun 2020, Lyu 2017, Gu 2016, Oubaha 2019, Bhosale 2017, Zhao 2017, Xie, 2017, Wu 2017, Booth 2021, Clement 2020, Tidblad vd. 2021, Sheridan 2019, Sarwat vd. 2023, Zhang vd. 2022, Wu vd. 2023, Lee vd. 2023, Int. Kyn. 15).

Malzeme	Avantaj	Dezavantaj	Özellik (örnek formül)	Kullanım alanı	Var olan THS*	Üretici
Lityumca zengin malzemeler (1-x)LiMO ₂ -xLi ₂ MnO ₃ (M=Ni, Co)	Yüksek voltaj ve özgül kapasite. Mangan varlığı düşük maliyete sebep olur	İlk çevrim ile hızlı kapasite ve voltaj düşüşü, düşük yapısal kararlılık	Tabakalı Li ₂ MnO ₃ ve LiTMO ₂ 'den (TM = Ni, Co ve Mn) oluşan bir nanokompozit	Yüksek güç gereksimine sahip uygulamalar, elektrikli araçlar	9	Hitachi Maxell
Organik yapılu katot aktif malzemeler	Yüksek çevrimsel kararlılık, düşük moleküler ağırlık. Çevreci yöntemler ve bileşiklerden üretilebilme	Düşük çalışma voltajı ve özgül kapasite	Karbonil gruplar ile kararlı redoks özelliğine sahiplerdir. Kimyasal bileşimindeki çeşitlilik organik elektrotların moleküler düzeyde farklı tasarımlarının yapılmasını sağlar	Sabit sistemlerde (Baz istasyonları, yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanması vb.)	4	-
Metal halojenürler (Na – MeCl₂)	Yüksek voltaj ve özgül kapasite. Mangan varlığı düşük maliyete sebep olur	Yüksek üretim maliyeti ve üretim sırasında inert atmosfer gereksinimi. HF oluşumu	Halojen bazlı yapılardır. Tersinir reaksiyonlarda redoks merkezi başına 2 ile 3 adet lityum iyonu depolayabilmektedir. Metal nanotaneçiklerin LiF matrisinde dağıldığı bir yapıya sahiptir	Tüketici elektroniği ve elektrikli araçlar	9	ZEBRA
Yüksek voltaja sahip spinel yapılu malzemeler (LiMn _{1.5} Ni _{0.5} O ₄)	Kobalt içermez, uygun maliyetli ve sürdürülebilir. Yüksek çalışma voltajı, NMP içermeyen su bazlı üretim için uygun	Üretimi zordur, yüksek şarj durumlarında yapı içinde ve yüzeyinde kararsızlık, çalışma Voltajı uygun elektrolitin bulunmaması	Genel formülü LiMn _{2-x} M _x O ₄ (M = Co, Cr, Fe, Cu ve Ni) olan ve yüksek potansiyele sahip spinel yapılu malzemelerdir.	Tüketici elektroniği ve elektrikli araçlar	6-7	-
Düzensiz kaya tuzu yapılu katot aktif malzemeler Li _{1.3} Mn _{0.4} Nb _{0.3} O _{1-x} F _x Li _{1.2} Mn _{0.4} Ti _{0.4} O ₂	Yüksek özgül kapasite, düşük maliyet	Hızlı kapasite kaybı, düşük yapısal kararlılık, zor sentez süreci	Yüksek kapasiteleri hem katyon hem de anyon redoks tepkimelerinin katkılarında kaynaklanmaktadır.	Tüketici elektroniği ve elektrikli araçlar	5	-

THS*: Teknoloji Hazırlık Seviyesi

1.7. Lityum iyon bataryalarda güvenliğe katot açısından bakış

Li iyon hücrelerde pil performansı ve güvenliği, kullanıcı memnuniyeti ve sürdürülebilirlik açısından yüksek önem arz etmektedir (Weiss vd. 2021). Pilin performansı ve güvenliği servis sırasında maruz kaldığı sıcaklık, çalışma voltajı ve şarj/deşarj hızı gibi faktörler tarafından belirlenmektedir. Batarya performansını optimize etmek, güvenliği sağlamak ve ömrünü uzatmak için elektrikli araç bataryalarının genellikle belirli bir sıcaklık, voltaj ve akım aralığında aralığında çalışması önerilir (Tablo 9).

Sıcaklık Etkisi

Çalışma sıcaklığı elektrikli araçlarda batarya performansını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Elektrikli araç bataryalarında en iyi performansı elde etmek için bataryanın genellikle 20°C ila 30 °C sıcaklık aralığında çalıştırılması önerilmektedir. Sıcaklığın yükselmesi, katot aktif malzeme ve sıvı elektrolit arasındaki tepkimeleri hızlandırarak batarya hücrelerinin ömrünü kısaltmaktadır. Ayrıca, ortam sıcaklığının 60°C'yi geçmesi, batarya bileşenleri arasında zincirleme

ekzotermik tepkimeler meydana getirerek bataryanın aşırı ısınmasına, şişmesine, patlamasına ve hatta elektrikli aracın tamamen yanmasına neden olabilmektedir.

Çalışma Voltajı

Bataryalar genellikle belirli bir nominal voltajda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bataryanın belirlenen nominal voltaj değerinden yüksek bir voltajda şarj edilmesi aşırı şarj olmasına neden olabilir. Aynı şekilde, bataryayı nominal voltajından daha düşük bir voltajda kullanmak veya deşarj etmek de bataryanın aşırı deşarj olmasına neden olur. Her iki durumda da hem anot hem de katot tarafında elektrolit ve aktif malzeme arasındaki tepkime mekanizmaları harekete geçerek bataryanın ömrünü kısaltabilir ve bataryayı hasara uğratabilir.

Şarj/Deşarj Hızı

Bir pilin şarj veya deşarj hızı C-oranı ile belirlenmektedir. Bu oran, pilin içine veya dışına akan akımın (A) pil kapasitesine (A-sa) bölünmesiyle temsil edilmektedir. Örneğin, kapasitesi 1.000 mA-sa olan bir pil 500 mA ile boşaltılıyorsa, deşarj hızı 0,5C olur. Başka bir örnek ile açıklamak gerekirse 0,5C 'de boşalan bir pil iki saat boyunca 500 mA; 1C'de bir saat boyunca 1A; 2C'de 30 dakika boyunca 2A sağlamaktadır. Günümüzde pilin hızlı şarj edilmesi birçok uygulama için önemlidir. Bir elektrikli aracın şarj edilmesi için 8 saat beklemek yerine yarım saatte tamamen şarj edilebilmesi için batarya bileşenlerinin yüksek C-oranı şartlarını karşılaması gerekir.

Termal ısınma bir pilin hızlı şarj edilebilmesinin önündeki en büyük engellerden biridir. Katot aktif malzeme iç direncinden dolayı yüksek akım transferi sırasında aşırı ısı meydana gelir. Oluşan ısının yeterince hızlı giderilememesi durumunda sıcaklık hızla yükselerek batarya hasara uğrar. Pilin hızlı şarj edilebilirliğini etkileyen diğer önemli bir parametre ise katot aktif malzeme içerisinde Li iyon transferinin sınırlı olmasıdır. Li iyonların katot malzemenin kristal kafesi içine difüzyonu, meydana gelen hacim değişikliği ve konsantrasyon gradyanları nedeniyle strese neden olabilir. Yüksek ve tekrarlanan lityum giriş ve çıkışının katot matrisinde neden olduğu difüzyon kaynaklı stres nedeniyle katot partiküllerinde çatlama ve nihai parçalanma meydana gelmektedir. Parçalanmış birincil parçacıklar pozitif elektrot matrisinden ayrılarak katot aktif malzemeyi daha fazla elektrolite maruz bırakır ve böylece pilin performansı azalır ve pil hasara uğrayabilir (Ahmed, 2017).

Li iyon hücrelerde hızlı şarj performansı için kullanılacak olan katot aktif malzemenin seçiminde malzeme kimyası, kristal yapısı, tane boyutu ve morfolojisi önemlidir. Mevcut durumda yüksek şarj performansına sahip katot malzemelerin geliştirilmesinde nanoyapıların kullanılması, iletken ajan malzemelerinin kullanımı, katkılama ile Li iyon difüzyonu için boşluk oluşturulması gibi çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır (Meimei, 2023).

Bu bağlamda, elektrikli araçlarda kullanılan pillerde depolanan enerji, şarj ve deşarj akımlarının hızına bağlı olduğundan şarj ve deşarj sırasında belirlenen C oranlarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Farklı piller, optimum performans için farklı önerilen C oranlarına sahip olabilir ve belirtilen C oranının aşılması pilin verimliliğini, kapasitesini ve genel ömrünü etkilemektedir.

Çevrim Ömrü

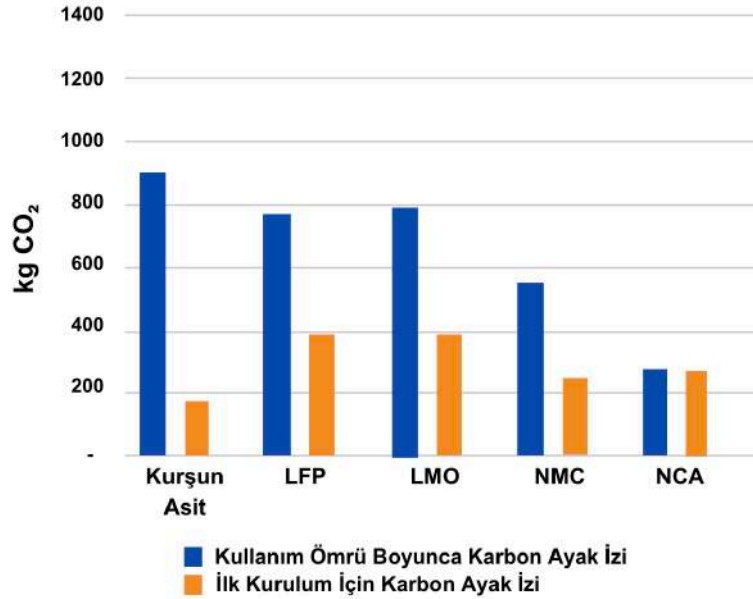
Li iyon hücrelerin çevrim ömrü, pilin kapasitesinde önemli ölçüde bir düşüş meydana gelmeden geçirdiği şarj ve deşarj çevrimlerini ifade eder. Başka bir deyişle, pilin zaman içinde performansını koruma yeteneğinin bir ölçüsüdür. Li iyon hücrelerin çevrim ömrü pilin deşarj derinliği, çalışma voltajı, sıcaklık, şarj ve deşarj hızları, şarj ve deşarj sıklığı, aktif malzeme kimyası ve üretim kalitesi gibi parametrelerden etkilenmektedir.

Ticari olarak kullanılan katot aktif malzemelerin kapasite, enerji yoğunluğu, çalışma voltajı, termal bozunma, çevrim ömrü ve şarj/deşarj hız kıyaslamaları Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Katot elektrot aktif malzemelerin kapasite, enerji yoğunluğu, çalışma voltajı, termal bozunma, çevrim ömrü ve şarj/deşarj hızlarının kıyaslanması.

	Deneysel kapasite (mA·sa·g ⁻¹)	Özgül enerji yoğunluğu (W·sa·kg ⁻¹)	Voltaj aralığı (V vs. Li ⁰ /Li ⁺)	Termal bozunma (°C)	Çevrim ömrü
LiCoO ₂	150	150-200	4,2-3,0	150	500-1.000
LiMn ₂ O ₄	120-130	100-150	4,2-3,0	250	300-700
LiNi _x Mn _y Co _z O ₂ (NMC)	150	150-220	4,2-3,0	210	1.000-2.000
LiNi _x Co _y Al _z O ₂ (NCA)	175	200-260	4,2-3,0	250	500
LiFePO ₄	160-170	90-120	3,65-2,5	270	> 2.000

1.8. Katot aktif malzemenin çevresel etkileri



Şekil 12. Sistem başına batarya yenilemeleri dikkate alındığında farklı pil kimyalarının karbon ayak izleri (Charles,2018)

Şekil 12.'de farklı pil kimyalarının hammaddeden itibaren üretimi ve devam eden yaşam döngülerinin karbon ayak izi karşılaştırması görülmektedir. Kurşun-asit en yüksek karbon ayak izi değerlerine sahipken NCA piller ham maddeden batarya oluşumuna kadarki süreçte (ilk kurulum) ve hem de kullanım ömrü boyunca en düşük karbon ayak izine sahip olan pil kimyası olarak tanımlanmıştır (Charles, 2018).

Farklı batarya türlerinin üretimi için CO₂ emisyon değerleri Tablo 10'da verilmiştir. Tablodaki karbon ayak izi hesaplamaları Yaşam Döngüsü Envanteri (Life Cycle Inventory, LCI) verileri kullanarak hesaplanmıştır. LCI verileri, ham maddenin çıkarılması, taşınması, malzemenin işlenmesi, katot malzemesinin üretimi, kullanım aşaması ve atık yönetimi aşamalarını içerir (Ou, 2017). 1 kg pil üretimi için farklı katot elektrot aktif malzemelerinin karbon ayak izleri birbirine yakındır. Buna rağmen farklı batarya kimyaları için karbon ayak izi değerlerindeki değişimler genellikle kW-sa enerji depolama kapasitesi başına gözlemlenir. Bu ise katot elektrot aktif malzemelerin sahip olduğu farklı enerji yoğunluklarının bir sonucudur. Pil üretiminin çevreye olan etkisi, pil üretim miktarı ile ilişkilidir. Düşük enerji yoğunluklu bir pilin, aynı kapasiteyi sağlamak için daha yüksek miktarda aktif malzeme gerektirir ve buna bağlı olarak çevreye olan olumsuz etkiler artacaktır.

Tablo 10: Batarya üretiminin CO₂ ayak izi (Katot elektrot aktif malzemenin döngü ömrü dikkate alınarak hesaplanmıştır. (Baumann 2017))

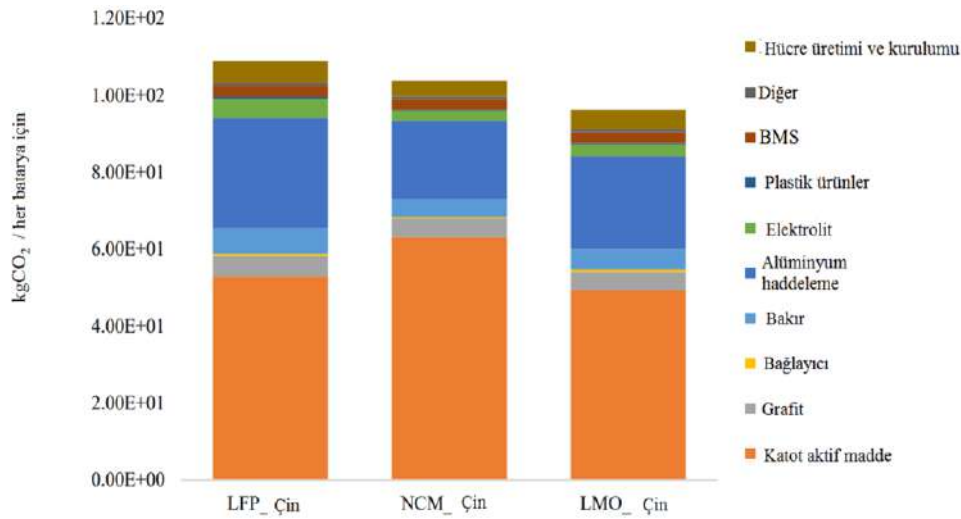
Katot elektrot aktif malzeme	Karbon ayak izi (kg _{CO2} /kg _{katot})	Enerji yoğunluğu (W·sa/ kg _{katot})	Karbon ayak izi (kg _{CO2} /kW·sa)
LFP	16,11	109	147,41
	13,98	83	168,56
LTO	14,19	52	270,99
LMO	13,80	116	118,90
NMC	14,12	130	108,30
	16,13	139	115,98
NCA	15,40	133	115,74

Karbon ayak izi hesabı yapılırken hammadde işlenmesi ve batarya bileşenlerinin üretilmesi adımları dikkate alındığında üretimin yapıldığı coğrafya ile madenlerin ilişkisinin de dikkate alınması gerekir (Şekil 13).

28 kW-sa kapasiteye sahip enerji depolama sistemi tasarlamak için (anot malzemesi olarak grafit kullanılmaktadır) LFP, NMC ve LMO katot elektrot aktif malzemelerinin kullanılması durumunda her bir sistem sırası ile 3.061 kg_{CO2}, 2.912 kg_{CO2} ve 2.705 kg_{CO2} sera gazı emisyonu sergiler. Kullanım ömrü dikkate alınmadığında aynı kapasite ile LMO katot aktif malzemenin kullanıldığı lityum pillerinin üretiminin nispeten daha düşük sera gazı emisyonlarına yol açmaktadır. Oysaki LMO'nun düşük çevrim ömrü sebebiyle uygulama alanında sık olarak yenilenmesi ihtiyacı dikkate alınırca bu verilerin yeniden hesaplanması gerekir.

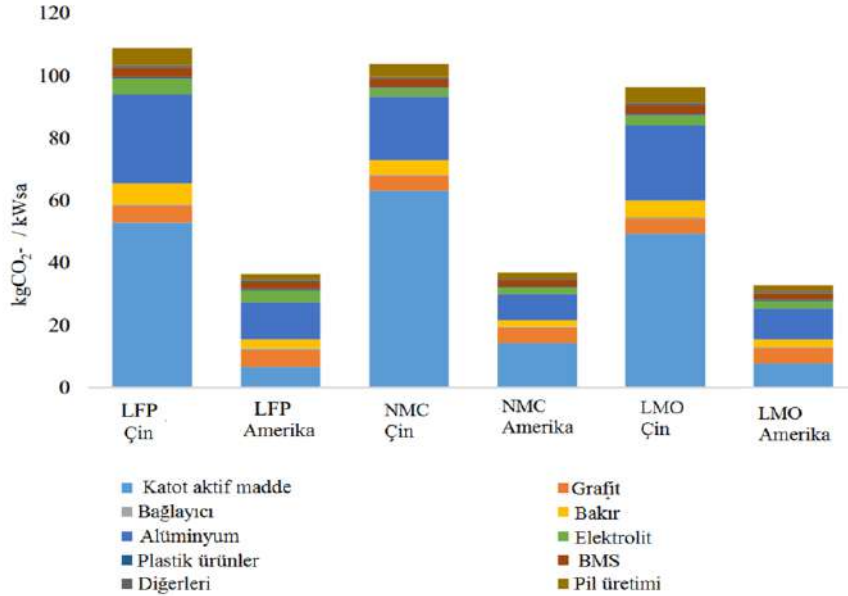
Çin pazarında en büyük paya sahip olan LFP (3.061 kg_{CO2}) ve NMC (2.912 kg_{CO2}) bataryaları ise birbirine yakın miktarda sera gazı emisyonu üretmektedir. Şekil 13'de de görüldüğü gibi, katot aktif malzemeler tüm batarya bileşenleri içinde en büyük sera emisyonuna sebep olmaktadır. LFP, NMC ve LMO için bu oran sırası ile %48,4, %60,7 ve %51,1 olarak hesaplanmıştır (Zhaxuan, 2017).

Çin'de üretilen LFP, NMC ve LMO bataryaları, Kuzey Amerika menşeyli bataryalara göre kW-sa başına sırasıyla 3, 2,8 ve 2,9 kat daha fazla CO₂ salınımı yapmaktadır. Bu durum katot aktif malzemelerinden ve kullanılan alüminyum folyodan kaynaklanmaktadır. Çin'de kullanılan elektrik sisteminin Kuzey Amerika'dakine kıyasla daha çok sera gazı emisyonuna sebep olmasından dolayı, üretiminde ağırlıklı elektrik kullanılan batarya bileşimlerinde karbon ayak izi çok daha yüksektir (Zhaxuan, 2017).

**Şekil 13.** Çin'de yaygın olarak kullanılan üç farklı kimyadaki lityum pil bileşenlerinin sera gazı katkıları (Hao, 2017)

Cevher üretiminden katot malzeme sentezine ait karbon ayak izleri incelendiğinde üretim için gerekli olan enerjiyi kömür veya doğalgazdan elde edildiği görülür. Fosil yakıtların büyük ölçekli üretimlerde kullanılması sera gazını artırarak çevreye zarar vermesiyle birlikte karbon ayak izini de artırmaktadır. Bu nedenle pilleri sıfırdan üretmek yerine, ömrü biten

pilleri geri dönüştürerek ham maddeden ve enerjiden tasarruf edilmesi sağlanabilir. Geri dönüşüm sayesinde batarya sektörünün karbon ayak izinin azaltılması önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Gopal,2023).



Şekil 14. Amerika ve Çin’de yaygın olarak kullanılan üç farklı kimyadaki lityum pil bileşenlerinin sera gazı katkıları (Hao, 2017)

2. ÖNERİLER

Yapılan araştırma ve incelemeler sonucunda ülkemizde batarya teknolojisinin gelişimi için bazı stratejik öneriler oluşmuştur:

- Katot elektrotlarının yüksek potansiyelde çalışması için uygun elektrolit ve bağlayıcıların geliştirilmesi,
- Ni bakımından zengin katot elektrot aktif maddelerin yerli imkanlar dikkate alınarak geliştirilmesi,
- Pil araştırma merkezlerinin kurulması,
- Karakterizasyon imkanlarının artırılması,
- Disiplinlerarası çalışma gruplarının artırılması,
- Deneyimli mühendislerin yetişmesi için imkanlar oluşturulması,
- Yurt dışı fonlarına başvuracak ortak projelerin yapılması.

KAYNAKLAR

- Ahaliabadeh, Z., Kong, X., Fedorovskaya, E., Kallio, T. 2022. Extensive comparison of doping and coating strategies for Ni-rich positive electrode materials. *Journal of Power Sources*, 540, 231633.
- Ahmed S., Bloom A., Andrew N., 2017, Enabling fast charging e A battery technology gap assessment, *Journal of Power Sources* 367.
- Ahmed, B., Xia, C., Alshareef, H.N. 2016. Electrode surface engineering by atomic layer deposition: A promising pathway toward better energy storage. *Nano Today*, 11(2), 250–271.
- Ahmed, S., Nelson, P.A., Gallagher, K.G., Susarla, N., Dees, D.W. 2017. Cost and energy demand of producing nickel manganese cobalt cathode material for lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 342, 733–740.



- Alpay, B.C. (2020). Reactor design, characterization and production of cathode active material via co-precipitation method for lithium ion batteries. Master's Thesis, Istanbul Technical University.
- André, D., Kim, S., Lamp, P., Lux, S. F., Maglia, F., Paschos, O., & Stiaszny, B. 2015. Future generations of cathode materials: an automotive industry perspective. *Journal of Materials Chemistry A, Materials for Energy and Sustainability*, 3(13), 6709–6732.
- Assessment and Exploitation of the Inherent Value of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) for Circular Economy 2018.
- Baumann, M. Peters, J. F. Weil, M. and Grunwald, A. 2017. CO₂ Footprint and Life-Cycle Costs of Electrochemical Energy Storage for Stationary Grid Applications, 5, 1071–1083.
- Besli, M.M., Xia, S., Kuppan, S., Huang, Y., Metzger, M., Shukla, A.K., Schneider, G., Hellstrom, S., Christensen, J., Doeff, M.M., Liu, Y. 2018. Mesoscale Chemomechanical Interplay of the LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ Cathode in Solid-State Polymer Batteries. *Chemistry of Materials*, 31(2), 491–501.
- Bernhart, W., & Hotz, T. 2023. Battery Monitor 2023: An assessment of the current and future battery value chain. Roland Berger; Roland Berger GmbH.
- Brandt, K., & Laman, F. C. 1989. Reproducibility and reliability of rechargeable lithium/molybdenum disulfide batteries. *Journal of Power Sources*, 25(4), 265–276.
- Bhosale, M. E., Chae, S., Kim, J. M., & Choi, J. Y. 2018. Organic small molecules and polymers as an electrode material for rechargeable lithium ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(41), 19885-19911.
- Booth, S. G., Nedoma, A. J., Anthonisamy, N. N., Baker, P. J., Boston, R., Bronstein, H., ... & Cussen, S. A. 2021. Perspectives for next generation lithium-ion battery cathode materials. *Apl Materials*, 9(10).
- Clément, R. J., Lun, Z., & Ceder, G. 2020. Cation-disordered rocksalt transition metal oxides and oxyfluorides for high energy lithium-ion cathodes. *Energy & Environmental Science*, 13(2), 345-373.
- Charles, R. 2018. Assessment and Exploitation of the Inherent Value of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) for Circular Economy.
- Delmas, C., Fouassier, C., Hagenmuller, P. 1980. Structural classification and properties of the layered oxides. *Physica B+C*, 99(1–4), 81–85.
- Dühnen S., Betz J., Kolek M., Schmuch R., Winter M., Placke T., 2020. Toward Green Battery Cells: Perspective on Materials and Technologies, *Small Methods*, 1-38.
- Elena M., Gregory S., Pascal H., Joern K., 2019, New Insights Related to Rechargeable Lithium Batteries: Li Metal Anodes, Ni Rich LiNi_xCo_yMn_zO₂ Cathodes and Beyond Them *Journal of The Electrochemical Society*, 166 (3).
- Emilsson E., Dahllöf L. 2019. Lithium-Ion Vehicle Battery Production Status on Energy Use, CO₂ Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling.
- Engün, S., Dermenci, K.B., Savacı, U., Turan, S. 2023. A novel scalable thinning route to enhance long-term stability of layered cathode materials for Li-ion batteries. *Journal of Materials Science*, 58(2), 864–879.
- European Commission, Joint Research Centre, Bielewski, M., Pfrang, A., Bobba, S., Clean Energy Technology Observatory, Batteries for energy storage in the European Union – Status report on technology development, trends, value chains and markets – 2022, Publications Office of the European Union, 2022
- Fouchard D, Taylor JB. 1987. The molice[®] rechargeable lithium system: Multicell aspects. *J Power Sources*. 21, 195-205
- Furukawa, H., Cordova, K. E., O’Keeffe, M., & Yaghi, O. M. 2013. The chemistry and applications of metal-organic frameworks. *Science*, 341(6149), 1230444.
- Fu, W., Wang, Y., Koon Yin Kong, Do Youb Kim, Wang, F., & Gleb Yushin. 2023. Materials and Processing of Lithium-Ion Battery Cathodes. *Nanoenergy Advances*, 3(2), 138–154.
- Ghosh, S., Charjee, U.B., Bhowmik, S., Martha, S.K. 2021. A Review on High-Capacity and High-Voltage Cathodes for Next-Generation Lithium-ion Batteries. *Journal of Energy and Power Technology*, 4(1), 1–1.
- Gu, M., Belharouak, I., Zheng, J., Wu, H., Xiao, J., Genc, A., Amine, K., Thevuthasan, S., Baer, D.R., Zhang, J.-G., Browning, N.D., Liu, J., Wang, C. 2012. Formation of the Spinel Phase in the Layered Composite Cathode Used in Li-Ion Batteries. *ACS Nano*, 7(1), 760–767.
- Gopal, S. 2023. Recycling of Lithium Batteries and GHG Emissions – Floodlight.
- Gu, P. Y., Zhao, Y., Xie, J., Binte Ali, N., Nie, L., Xu, Z. J., & Zhang, Q. 2016. Improving the performance of lithium–sulfur batteries by employing polyimide particles as hosting matrixes. *ACS applied materials & interfaces*, 8(11), 7464-7470.



- Hamidah, N.L., Wang, F.M., Nugroho, G. 2018. The understanding of solid electrolyte interface (SEI) formation and mechanism as the effect of fluoro-o-phenylenedimaleimide (F-MI) additive on lithium-ion battery. *Surface and Interface Analysis*, 51(3), 345–352.
- Hao H., Zhexuan M., Shuhua J., Zongwe L., 2017, GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China Han, *Sustainability*, 504.
- Hestenes, J.C., Sadowski, J.T., May, R., Marbella, L.E. 2022. Transition Metal Dissolution Mechanisms and Impacts on Electronic Conductivity in Composite LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ Cathode Films. *ACS Materials Au*, 3(2), 88–101.
- Houache, M., Yim, C.-H., Karkar, Z., Abu-Lebdeh, Y. 2022. On the Current and Future Outlook of Battery Chemistries for Electric Vehicles—Mini Review. *Batteries*, 8(7), 70.
- Huang, W., Zhu, Z., Wang, L., Wang, S., Li, H., Tao, Z., ... & Chen, J. 2013. Quasi-solid-state rechargeable lithium-ion batteries with a calix [4] quinone cathode and gel polymer electrolyte. *Angewandte Chemie International Edition*, 52(35), 9162–9166.
- Hy, S., Liu, H., Zhang, M., Qian, D., Hwang, B. J., & Meng, Y. S. 2016. Performance and design considerations for lithium excess layered oxide positive electrode materials for lithium ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 9(6), 1931–1954.
- Jasper, F. B., Späthe, J., Baumann, M., Peters, J., Ruhland, J., & Weil, M. 2022. Life cycle assessment (LCA) of a battery home storage system based on primary data. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132899–132899.
- Jiang, M., Danilov, D.L., Eichel, R., Notten, P.H.L. 2021. A Review of Degradation Mechanisms and Recent Achievements for Ni-Rich Cathode-Based Li-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials*, 11(48).
- Jiang, X., Wang, Z., Rooney, D., Zhang, X., Feng, J., Qiao, J., ... & Sun, K. 2015. A design strategy of large grain lithium-rich layered oxides for lithium-ion batteries cathode. *Electrochimica Acta*, 160, 131–138.
- Kaur, G., Gates, B.D. 2022. Review—Surface Coatings for Cathodes in Lithium Ion Batteries: From Crystal Structures to Electrochemical Performance. *Journal of The Electrochemical Society*, 169(4), 043504.
- Kim, M. G., Jo, M., Hong, Y. S., & Cho, J. 2009. Template-free synthesis of Li [Ni_{0.25} Li_{0.15} Mn_{0.6}] O₂ nanowires for high performance lithium battery cathode. *Chemical communications*, (2), 218–220.
- Kim, U., Ryu, H., Kim, J., Mücke, R., Kaghazchi, P., Yoon, C.S., Sun, Y. 2019. Microstructure-Controlled Ni-Rich Cathode Material by Microscale Compositional Partition for Next-Generation Electric Vehicles. *Advanced Energy Materials*, 9(15).
- Kim, U.-H., Kim, J.-H., Hwang, J.-Y., Ryu, H.-H., Yoon, C.S., Sun, Y.K. 2019. Compositionally and structurally redesigned high-energy Ni-rich layered cathode for next-generation lithium batteries. *Materials Today*, 23, 26–36.
- Kim, U.-H., Park, G.-T., Son, B.-K., Nam, G.W., Liu, J., Kuo, L.-Y., Kaghazchi, P., Yoon, C.S., Sun, Y.-K. 2020. Heuristic solution for achieving long-term cycle stability for Ni-rich layered cathodes at full depth of discharge. *Nature Energy*, 5(11), 860–869.
- Knehr, K. W., Kubal, J., Nelson, P. A., & Ahmed, S. 2022. Battery Performance and Cost Modeling for Electric-Drive Vehicles (A Manual for BATPAC v5.0).
- Ko, G., Jeong, S., Park, S., Lee, J., Kim, S., Shin, Y., Kim, W., Kwon, K. 2023. Doping strategies for enhancing the performance of lithium nickel manganese cobalt oxide cathode materials in lithium-ion batteries. *Energy Storage Materials*, 60.
- Kwon, Y., Lee, Y., Kim, S.-O., Kim, H.-S., Kim, K.J., Byun, D., Choi, W. 2018. Conducting Polymer Coating on a High-Voltage Cathode Based on Soft Chemistry Approach toward Improving Battery Performance. *ACS Applied Materials, Interfaces*, 10(35), 29457–29466.
- Lee, G., Lim, J., Shin, J., Hardwick, L. J., & Yang, W. 2023. Towards commercialization of fluorinated cation-disordered rock-salt Li-ion cathodes. *Frontiers in Chemistry*, 11.
- Lee, S., Manthiram, A. 2022. Can Cobalt Be Eliminated from Lithium-Ion Batteries? *ACS Energy Letters*, 7(9), 3058–3063.
- Lei, Y., Elias, Y., Han, Y., Xiao, D., Lu, J., Ni, J., Zhang, Y., Zhang, C., Aurbach, D., Xiao, Q. 2022. Mitigation of Oxygen Evolution and Phase Transition of Li-Rich Mn-Based Layered Oxide Cathodes by Coating with Oxygen-Deficient Perovskite Compounds. *ACS Applied Materials, Interfaces*, 14(44), 49709–49718.
- Li, J., Ma, Z.-F. 2019. Past and Present of LiFePO₄: From Fundamental Research to Industrial Applications. *Chem*, 5(1), 3–6.
- Li, J., Cameron, A.R., Li, H., Glazier, S., Xiong, D., Chatzidakis, M., Allen, J., Botton, G.A., Dahn, J.R. 2017. Comparison of Single Crystal and Polycrystalline LiNi_{0.5}Mn_{0.3}Co_{0.2}O₂ Positive Electrode Materials for High Voltage Li-Ion Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(7), A1534–A1544.
- Li, L., Lee, K. S., & Lu, L. 2014. Li-rich layer-structured cathode materials for high energy Li-ion batteries. *Functional Materials Letters*, 7(04), 1430002.
- Li, X., Xu, Y., Wang, C. 2009. Suppression of Jahn–Teller distortion of spinel LiMn₂O₄ cathode. *Journal of Alloys and Compounds*, 479(1–2), 310–313.



- Li, Y., Wu, C., Bai, Y., Liu, L., Wang, H., Wu, F., ... & Zou, Y. 2016. Hierarchical mesoporous lithium-rich Li [Li₀. 2Ni₀. 2Mn₀. 6] O₂ cathode material synthesized via ice templating for lithium-ion battery. *ACS applied materials & interfaces*, 8(29), 18832-18840.
- Liang, Y., Zhang, P., & Chen, J. 2013. Function-oriented design of conjugated carbonyl compound electrodes for high energy lithium batteries. *Chemical Science*, 4(3), 1330-1337.
- Liang, Y., Zhang, P., Yang, S., Tao, Z., & Chen, J. 2013. Fused heteroaromatic organic compounds for high-power electrodes of rechargeable lithium batteries. *Adv Energy Mater* 3 (5): 600–605.
- Lin, C., Tang, A., Mu, H., Wang, W., Wang, C. 2015. Aging Mechanisms of Electrode Materials in Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles. *Journal of Chemistry*, 1–11.
- Liu T., Pan, F., Amine K. 2020. Prospect and reality of concentration gradient cathode of lithium-ion batteries. *Jiegou Huaxue*, 39. 11-15.
- Lowe M., Tokuoaka S., Trigg T., Gereffi G., 2010. Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: the U.S. Value Chain.
- Lun, Z., Ouyang, B., Kwon, D. H., Ha, Y., Foley, E. E., Huang, T. Y., ... & Ceder, G. 2021. Cation-disordered rocksalt-type high-entropy cathodes for Li-ion batteries. *Nature materials*, 20(2), 214-221.
- Luo, K., Roberts, M. R., Hao, R., Guerrini, N., Pickup, D. M., Liu, Y. S., ... & Bruce, P. G. 2016. Charge-compensation in 3 d-transition-metal-oxide intercalation cathodes through the generation of localized electron holes on oxygen. *Nature chemistry*, 8(7), 684-691.
- Lu, P., Xia, Y., Sun, G., Wu, D., Wu, S., Yan, W., Zhu, X., Lu, J., Niu, Q., Shi, S., Sha, Z., Chen, Li, L., H., & Wu, F. 2023. Realizing long-cycling all-solid-state Li-In||TiS₂ batteries using Li_{6+x}MxAs_{1-x}S₅I (M=Si, Sn) sulfide solid electrolytes. *Nature Communications*, 14(1).
- Lyu, H., Li, P., Liu, J., Mahurin, S., Chen, J., Hensley, D. K., ... & Sun, X. G. 2018. Aromatic polyimide/graphene composite organic cathodes for fast and sustainable lithium-ion batteries. *ChemSusChem*, 11(4), 763-772.
- Ma, X., Chen, M., Zheng, Z., Bullen, D., Wang, J., Harrison, C., Gratz, E., Lin, Y., Yang, Z., Zhang, Y., Wang, F., Robertson, D., Son, S., Bloom, I., Wen, J., Ge, M., Xiao, X., Lee, I., Tang, M., & Wang, Q. 2021. Recycled cathode materials enabled superior performance for lithium-ion batteries. *Joule*, 5(11), 2955–2970.
- Maden Tetkik Ve Arama Genel Müdürlüğü, 2018, Dünyada Ve Türkiye’de Nikel, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, 13.
- Malte Kosfeld, Westphal, B., & Arno Kwade. 2023. Moisture behavior of lithium-ion battery components along the production process. *Journal of Energy Storage*, 57, 106174–106174.
- Manthiram, A. 2020. A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry. *Nature Communications*, 11(1).
- Masoumi M., 2019. Thermochemical and electrochemical investigations of Li(Ni,Mn,Co)O₂ (NMC) as positive electrode material for lithium-ion batteries. KIT Faculty of Mechanical Engineering Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
- Meimei Y., Hongjun L., Fen R., 2023, Fast-charging cathode materials for lithium & sodium ion batteries, *Materials Today*.
- Miao, Y., Hynan, P., von Jouanne, A., Yokochi, A. 2019. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*, 12(6), 1074.
- Min, K., Park, K., Park, S.Y., Seo, S.-W., Choi, B., Cho, E. 2017. Improved electrochemical properties of LiNi_{0.91}Co_{0.06}Mn_{0.03}O₂ cathode material via Li-reactive coating with metal phosphates. *Scientific Reports*, 7.
- Muralidharan, N., Essehli, R., Hermann, R.P., Amin, R., Jafta, C., Zhang, J., Liu, J., Du, Z., Meyer, H.M., Self, E., Nanda, J., Belharouak, I. 2020. Lithium Iron Aluminum Nickelate, LiNixFeyAlzO₂—New Sustainable Cathodes for Next-Generation Cobalt-Free Li-Ion Batteries. *Advanced Materials*, 32(34).
- Nisar, U., Al-Hail, S.A.J.A., Petla, R.K., Shakoor, R.A., Essehli, R., Kahraman, R., AlQaradawi, Kim, S.Y., Belharouak, D.K., Amin, I., M.R. 2019. Understanding the Origin of the Ultrahigh Rate Performance of a SiO₂-Modified LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ Cathode for Lithium-Ion Batteries. *ACS Applied Energy Materials*, 2(10), 7263–7271.
- Nisar, U., Muralidharan, N., Essehli, R., Amin, R., Belharouak, I. 2021. Valuation of Surface Coatings in High-Energy Density Lithium-ion Battery Cathode Materials. *Energy Storage Materials*, 38, 309–328.
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. 2015. Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18(5), 252–264.
- Noh J. 2013, *J. Power Sources*, 233121-130.
- Oubaha, H., Gohy, J. F., & Melinte, S. 2019. Carbonyl-based π-conjugated materials: from synthesis to applications in lithium-ion batteries. *ChemPlusChem*, 84(9), 1179-1214.
- Ozawa K. 1994. Lithium-ion rechargeable batteries with LiCoO₂ and carbon electrodes: The LiCoO₂/C system. *Solid State Ion.* 69, 212-221
- Ou, D. 2017. State of the art of Life Cycle Inventory data for electric vehicle batteries.



- Öztürk, M., Evin, E., Özkan, A., Banar, M., 2023. Comparison of waste lithium-ion batteries recycling methods by different decision making techniques. *Environ Res Tec*, Vol. 6, No. 3, pp. 226–241
- Padhi AK, Nanjundaswamy KS, Goodenough JB. 1997. Phospho-olivines as positive-electrode materials for rechargeable lithium batteries. *J Electrochem Soc*. 144, 1188
- Park, G.-T., Park, N.-Y., Noh, T.-C., Namkoong, B., Ryu, H.-H., Shin, J.-Y., Beierling, T., Yoon, Sun, C.S., Y.-K. 2021. High-performance Ni-rich $\text{Li}[\text{Ni}_{0.9-x}\text{Co}_{0.1}\text{Al}_x]\text{O}_2$ cathodes via multi-stage microstructural tailoring from hydroxide precursor to the lithiated oxide. *Energy, Environmental Science*, 14(9), 5084–5095.
- Pişkin, B., 2018, Development and Characterization Of New Layered Cathode Materials For Lithium Ion Batteries, Middle East Technical University.
- Porzio, J., & Scown, C. D. 2021. Life-Cycle Assessment considerations for batteries and battery materials. *Advanced Energy Materials*, 11(33).
- Qiu, B., Yin, C., Xia, Y., & Liu, Z. 2017. Synthesis of three-dimensional nanoporous Li-rich layered cathode oxides for high volumetric and power energy density lithium-ion batteries. *ACS applied materials & interfaces*, 9(4), 3661-3666.
- Qiu, Q.-Q., Yuan, S.-S., Bao, J., Wang, Q.-C., Yue, X.-Y., Li, X.-L., Wu, X.J., Zhou, Y.-N. 2021. Suppressing irreversible phase transition and enhancing electrochemical performance of Ni-rich layered cathode $\text{LiNi}_{0.9}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_{0.05}\text{O}_2$ by fluorine substitution. *Journal of Energy Chemistry*, 61, 574–581.
- Qureshi, Z.A., Tariq, H.A., Hafiz, H.M., Shakoor, R.A., AlQaradawi, S., Kahraman, R. 2022. Influence of graphene wrapped-cerium oxide coating on spherical $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ particles as cathode in high-voltage lithium-ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 920, 165989.
- Reddy, R. C. K., Lin, J., Chen, Y., Zeng, C., Lin, X., Cai, Y., & Su, C. Y. 2020. Progress of nanostructured metal oxides derived from metal–organic frameworks as anode materials for lithium–ion batteries. *Coordination Chemistry Reviews*, 420, 213434.
- Reddy, R. C. K., Lin, X., Zeb, A., & Su, C. Y. 2022. Metal–organic frameworks and their derivatives as cathodes for lithium-ion battery applications: a review. *Electrochemical Energy Reviews*, 1-36.
- Rozier, P., Tarascon, J.M. 2015. Review—Li-Rich Layered Oxide Cathodes for Next-Generation Li-Ion Batteries: Chances and Challenges. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(14), A2490–A2499.
- Sarwat, A. I., Khalid, A., Jalal, A. H., & Bhansali, S. 2023. Sizing and lifecycle assessment of electrochemical batteries for electric vehicles and renewable energy storage systems. In *IntechOpen eBooks*.
- Seo, D. H., Lee, J., Urban, A., Malik, R., Kang, S., & Ceder, G. 2016. The structural and chemical origin of the oxygen redox activity in layered and cation-disordered Li-excess cathode materials. *Nature chemistry*, 8(7), 692-697.
- Sivlin, D. 2019. Lityum iyon piller için birlikte çöktürme yöntemi ile kobalt içermeyen katot malzemesi üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Sheridan, E. 2019. BEACON -Battery Ecosystem Accelerator of Norway, Kick-Off.
- Shi, S. J., Tu, J. P., Tang, Y. Y., Zhang, Y. Q., Wang, X. L., & Gu, C. D. 2013. Preparation and characterization of macroporous $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.54}\text{Ni}_{0.13}\text{Co}_{0.13}\text{O}_2$ cathode material for lithium-ion batteries via aerogel template. *Journal of power sources*, 240, 140-148.
- Somo, T.R., Mabokela, T.E., Teffu, D.M., Sekgobela, T.K., Ramogayana, B., Hato, M.J., Modibane, K.D. 2021. A Comparative Review of Metal Oxide Surface Coatings on Three Families of Cathode Materials for Lithium Ion Batteries. *Coatings*, 11(7), 744.
- Song, Z., Zhan, H., & Zhou, Y. 2009. Anthraquinone based polymer as high performance cathode material for rechargeable lithium batteries. *Chemical communications*, (4), 448-450.
- Sun, T., Xie, J., Guo, W., Li, D. S., & Zhang, Q. 2020. Covalent–organic frameworks: advanced organic electrode materials for rechargeable batteries. *Advanced Energy Materials*, 10(19), 1904199
- Sun, Y.-K., Myung, S.-T., Kim, M.-H., Prakash, J., Amine, K. 2005. Synthesis and Characterization of $\text{Li}[(\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1})_{0.8}(\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_{0.2}]\text{O}_2$ with the Microscale Core–Shell Structure as the Positive Electrode Material for Lithium Batteries. *Journal of the American Chemical Society*, 127(38), 13411–13418.
- Şahan H., 2009. Lityum iyon pillerde katot aktif malzeme olarak kullanılan LiMn_2O_4 bileşiğinin elektrokimyasal performansının artırılması. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Şahan, H., Göktepe, H., Patat, Ş., Yıldız, S., Özdemir, B., Ülgen, A., Mukerjee, S., Abraham, K.M. 2019. Effect of silver coating on electrochemical performance of $0.5\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot 0.5\text{LiMn}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ cathode material for lithium-ion batteries. *Journal of Solid-State Electrochemistry*, 23(5), 1593–1604.
- Tan, X., Zhang, M., Li, J., Zhang, D., Yan, Y., Li, Z. 2020. Recent progress in coatings and methods of Ni-rich $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ cathode materials: A short review. *Ceramics International* 46(14).



Tidblad, A. A., Edström, K., Hernández, G., de Meatza, I., Landa-Medrano, I., Jacas Biendicho, Trilla, J., Buysse, L., Ierides, M., Horno, M., Kotak, B. P., Schweiger, Y., Koch, H.G., & Kotak, B. S. 2021. Future Material Developments for Electric Vehicle Battery Cells Answering Growing Demands from an End-User Perspective. *Energies*, 14(14), 4223.

TC. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Ankara Kalkınma Ajansı, 2021. Ankara Lityum İyon Batarya Hücresi Üretim Tesisi Ön Fizibilite Raporu.

Tesfamhret, Y., Liu, H., Chai, Z., Berg, E., Younesi, R. 2021. On the Manganese Dissolution Process from LiMn₂O₄ Cathode Materials. *ChemElectroChem*, 8(8), 1516–1523.

Thackeray M., Kang S., Johnson C., Vaughey J., Benedek R., Hackney S. 2007. Li₂MnO₃-stabilized LiMO₂ (M = Mn, Ni, Co) electrodes for lithium-ion batteries. *J Mater Chem.*, 17, 3112-3125.

Thackeray M, Johnson PJ, De Picciotto LA, Bruce PG, Goodenough JB. 1984. Electrochemical extraction of lithium from LiMn₂O₄. *Mater Res Bull*, 19, 179-187.

Topaktaş, İ., Karahan B.D., Keleş, Ö., (2024). The Effects of Feeding Rate and the Calcination Conditions on the NMC811 Cathodes for Lithium-ion Batteries. *International Graduate Research Symposium*. (submitted)

Van der Ven, A. 2000. Phase transformations and volume changes in spinel Li_xMn₂O₄. *Solid State Ionics*, 135(1–4), 21–32.

Wang, F., Robert, R., Chernova, N. A., Pereira, N., Omenya, F., Badway, F., ... & Graetz, J. 2011. Conversion reaction mechanisms in lithium ion batteries: study of the binary metal fluoride electrodes. *Journal of the American Chemical Society*, 133(46), 18828-18836.

Wang, J., Lei, X., Guo, S., Gu, L., Wang, X., Yu, A., Su, D. 2023. Doping Strategy in Nickel-Rich Layered Oxide Cathode for Lithium-Ion Battery. *Renewables*, 1(3), 316–340.

Weiss, M., Ruess, R. Kasnatscheew, J. Levartovsky, Y. Levy N. R., Minnmann, P., Stolz, L. Waldmann T., Wohlfahrt-Mehrens M., Aurbach, D., Winter, M., Ein-Eli, Y., Janek J., 2021. Fast Charging of Lithium-Ion Batteries: A Review of Materials Aspects. *Adv. Energy Mater.*, 11, 2101126.

Wu, F., & Yushin, G. 2017. Conversion cathodes for rechargeable lithium and lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 10(2), 435-459.

Wu, F., Maier, J., & Yu, Y. 2020. Guidelines and trends for next-generation rechargeable lithium and lithium-ion batteries. *Chemical Society Reviews*, 49(5), 1569-1614.

Wu, V. C., Evans, H. A., Giovine, R., Preefer, M. B., Ong, J., Yoshida, E., Pierre-Etienne Cabelguen, & Clément, R. J. 2023. Rapid and Energy-Efficient Synthesis of Disordered Rocksalt Cathodes. *Advanced Energy Materials*, 13(10).

Xiao, B., & Sun, X. 2018. Surface and subsurface reactions of lithium Transition Metal oxide cathode Materials: An Overview of the fundamental origins and remedying approaches. *Advanced Energy Materials*, 8(29).

Xie, J., Chen, W., Wang, Z., Jie, K. C. W., Liu, M., & Zhang, Q. 2017. Synthesis and exploration of ladder-structured large aromatic dianhydrides as organic cathodes for rechargeable lithium-ion batteries. *Chemistry–An Asian Journal*, 12(8), 868-876.

Xu, G., Nie, P., Dou, H., Ding, B., Li, L., & Zhang, X. 2017. Exploring metal organic frameworks for energy storage in batteries and supercapacitors. *Materials today*, 20(4), 191-209.

Yamada, A. 1996. Lattice Instability in Li (Li_xMn_{2-x})O₄. *Journal of Solid-State Chemistry*, 122(1), 160–165.

Yamada, A., Hosoya, M., Chung, S.-C., Kudo, Y., Hinokuma, K., Liu, K.-Y., Nishi, Y. 2003. Olivine-type cathodes. *Journal of Power Sources*, 119–121, 232–238.

Yan, W., Yang, S., Huang, Y., Yang, Y., Guohui Yuan. 2020. A review on doping/coating of nickel-rich cathode materials for lithium-ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 819.

Yilmaz, G., Peh, S. B., Zhao, D., & Ho, G. W. 2019. Atomic-and Molecular-Level Design of Functional Metal–Organic Frameworks (MOFs) and Derivatives for Energy and Environmental Applications. *Advanced Science*, 6(21), 1901129.

Young, K., Wang, C., Wang, L.Y., Strunz, K. 2012. Electric Vehicle Battery Technologies. *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*, 15–56.

Yu, F. D., Que, L. F., Wang, Z. B., Zhang, Y., Xue, Y., Liu, B. S., & Gu, D. M. 2016. Layered-spinel capped nanotube assembled 3D Li-rich architectures for high performance Li-ion battery cathodes. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(47), 18416-18425.

Zhao, E., Fang, L., Chen, M., Chen, D., Huang, Q., Hu, Z., Yan, Q., Wu, M., Xiao, X. 2017. New insight into Li/Ni disorder in layered cathode materials for lithium ion batteries: a joint study of neutron diffraction, electrochemical kinetic analysis and first-principles calculations. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(4), 1679–1686.

Zhao, Q., Zhu, Z., & Chen, J. 2017. Molecular engineering with organic carbonyl electrode materials for advanced stationary and redox flow rechargeable batteries. *Advanced Materials*, 29(48), 1607007.



Zhang, S., Ericsson, N., Sjödin, M., Hanna Karlsson Potter, Hansson, P., & Nordberg, Å. 2022. Prospective life cycle assessment of a flexible all-organic battery. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133804–133804.

Zhu, L., Ding, G., Xie, L., Cao, X., Liu, J., Lei, X., & Ma, J. 2019. Conjugated carbonyl compounds as high-performance cathode materials for rechargeable batteries. *Chemistry of Materials*, 31(21), 8582-8612.

Zhou H., Xin F., Pei B., Whittingham M. S, 2019. What Limits the Capacity of Layered Oxide Cathodes in Lithium Batteries? *ACS Energy Letters*.

Internet Kaynakları

- [1] <https://pushevs.com/2020/04/04/comparison-of-different-ev-batteries-in-2020/>, 2023.
- [2] https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2023/Fraunhofer-ISI_LIB-Roadmap-2023.pdf, 2023.
- [3] <https://cicenergigune.com/en/blog/gigafactories-europe-commitment-economic-recovery-battery-factories>, 2023.
- [4] <https://cicenergigune.com/en/blog/north-america-accelerates-commitment-development-gigafactory-industry>, 2023.
- [5] <https://battery-news.de/maschinen-und-anlagenbauer/>, 09.2023.
- [6] <https://energystorage.pnnl.gov/pdf/PNNL-28866.pdf>, 12.04.2024.
- [7] <https://www.batterydesign.net/battery-cell/cell-manufacturers/>, 12.04.2024.
- [8] <https://www.targray.com/content-data/mediafiles/images/LCO-Cathodes-SLCO03010-Targray.pdf>, 12.04.2024.
- [9] <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/styrene-butadiene-rubber-sbr-price-index/>, 12.04.2024.
- [10] <https://medium.com/@erofeev.yury/the-average-price-of-lithium-ion-batteries-fell-to-historical-lows-in-2023-758b2dce1248>, 12.04.2024.
- [11] <https://milpwr.org/wp-content/uploads/2023/01/Miltec20MPSC20Symposium2011-2021.pdf#page=1.00&gsr=0>, 12.04.2024.
- [12] <https://ecotreelithium.co.uk/news/lifepo4-battery-depth-of-discharge/>, 12.04.2024.
- [13] <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/479891/handbook-battery-energy-storage-system.pdf>, 12.04.2024.
- [14] <https://www.nationalacademies.org/documents/embed/link/LF2255DA3DD1C41C0A42D3BEF0989ACAECE3053A6A9B/file/D4C119888234FFE4486118DB145DDCD38A47C6175225?noSaveAs=1>, 12.04.2024.
- [15] https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/2023-05/DAY1_1405_Tien%20Duong_VTO.pdf, 12.04.2024.





SEPERATÖR MALZEMELERİ

B. Tanç Kaya^{1,2}, B. Zeytuncu Gökoğlu³[+], F. N. Uyumaz⁴, E. Ş. Cengiz⁴, M. V. Kahraman⁴

ÖZET

Lityum iyon pillerde seperatör, anot ve katot arasında fiziksel bir bariyer görevi görürken aynı zamanda iyonların serbestçe hareket etmesine olanak tanır. Bu ince, gözenekli yapı, çevrim testi sırasında oluşabilecek kısa devreleri önleyerek pilin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar. Seperatörün termal ve kimyasal stabilitesi, pilin genel güvenliği ve performansı için hayati önem taşır.

Günümüzde kullanılan ticari seperatörler genellikle polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi polimerlerden yapılmaktadır. Bu malzemelerin düşük maliyeti, kolay ve büyük hacimli üretim proseleri (ıslak ya da kuru) ve iyi mekanik dayanımları (>98,06 MPa) onları yaygın bir tercih haline getirmiştir. Buna karşılık düşük gözeneklilikleri (%40-50) ve düşük ıslanabilirlikleri (%30-160) ve düşük erime sıcaklıkları (130-150 °C) kullanım koşullarını sınırlamaktadır. Artan enerji yoğunluğu gereksinimleri ve güvenlik standartları, araştırmacıları daha ileri malzeme (kompozit, çok tabakalı, v.b.) uygulamaları ile yeni seperatör teknolojileri geliştirmeye yönlendirmiştir. Bu yeni yaklaşımlar arasında yüksek sıcaklık direncine sahip malzemeler, ıslatılabilirlik özelliklerini artıran yüzey modifikasyonları ve daha yüksek mekanik dayanıklılık sunan kompozit yapılar bulunmaktadır.

Dünya genelinde seperatör üretimi, Asya-Pasifik bölgesinde yoğunlaşmış durumdadır. Özellikle Çin, Japonya ve Güney Kore, bu alanda önde gelen üreticiler arasında yer almaktadır. Bu ülkeler, yüksek üretim kapasiteleri ve gelişmiş teknolojik altyapıları ile global pazarın büyük bir bölümünü kontrol etmektedirler. Bunun yanı sıra, Avrupa ve Kuzey Amerika'da da önemli üreticiler bulunmakta, bu bölgelerde yenilikçi ve çevre dostu seperatör teknolojilerine yönelik araştırmalar hız kazanmaktadır.

Türkiye, Li iyon pil ve seperatör üretiminde henüz global ölçekte bir oyuncu olmasa da, bu alanda önemli adımlar atmaktadır. Yerli üretim kapasitelerinin geliştirilmesi hem ekonomik hem de stratejik açıdan büyük önem taşımaktadır. Yerli seperatör üretimi, Türkiye'nin bu alandaki dışa bağımlılığını azaltabilir ve enerji depolama teknolojilerinde daha bağımsız bir konuma gelmesini sağlayabilir. Ayrıca, yerel Ar-Ge faaliyetlerinin teşvik edilmesi, üniversitelerin ve araştırma merkezlerinin desteklenmesi Türkiye'nin bu alandaki yenilikçi çözümler geliştirme kapasitesini artırabilir ve uluslararası rekabette daha güçlü bir pozisyona ulaşmasına yardımcı olabilir. Bu rapor, Li iyon pillerdeki seperatörlerin önemini vurgulamakta, seperatör türleri ve üretim proseleri hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca, Türkiye'nin bu alandaki gelişim potansiyelini ele almaktadır.

[+] bihtzeytuncu@itu.edu.tr

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, Nanobilim ve Nanomühendislik (NSE) Programı, Maslak, 34467 İstanbul, Türkiye.

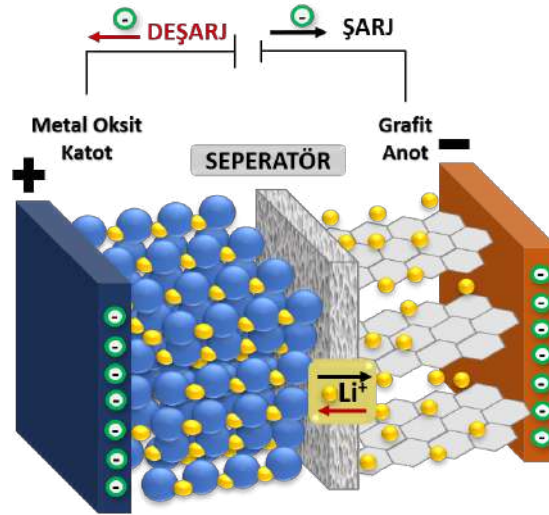
2 İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Maslak, 34467 İstanbul, Türkiye.

3 İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Maslak, 34469 İstanbul, Türkiye.

4 Marmara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Göztepe Yerleşkesi, Kadıköy 34722 İstanbul, Türkiye.

1. GİRİŞ

Seperatör (ayırıcı membran), Li iyon pilin iç kısmında anot ve katot arasında bulunan ince, gözenekli bir malzemedir (Bknz. Şekil 1). Selektif iyon taşınımına izin verirken, anot ve katodun doğrudan temasına engel olur. Seperatörün temel olarak iki işlevi vardır; birincisi, anot ve katot arasında fiziksel bariyer olarak elektriksel kısa devreleri önlemek, ikincisi ise elektrolit deposu görevi ile lityum iyonlarının katot ve anot arasında taşınmasını sağlamak ve pilin şarj/deşarj döngüsünü desteklemektir (Arora ve Zhang 2004, Demeuse, 2021). Seperatör, herhangi bir hücre reaksiyonuna doğrudan dahil değildir, ancak yapısı ve özellikleri, pil performansının belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Bu nedenle kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 1. Tipik bir lityum iyon pilde seperatör ve konumunun şematik gösterimi.

2. SEPERATÖR TASARIMINDA ÖNEMLİ PARAMETRELER

Seperatörler, Li iyon bataryaların, enerji depolama kapasitesi, güvenlik, ömür ve genel performans üzerinde kritik bir rol oynarlar. Bu nedenle seperatör tasarımı, batarya teknolojisinde önemli bir araştırma konusudur. Amerika Birleşik Devletleri'nde ileri batarya teknolojilerinin geliştirilmesi ve ticarileştirilmesini teşvik etmek için kurulmuş bir konsorsiyum olan USABC (United States Advanced Battery Consortium, Amerika Birleşik Devletleri İleri Batarya Konsorsiyumu) kriterlerine göre seperatör performansında rol alan bazı önemli parametrelerde hedeflenen değerler ve önerilen standart test metodları Tablo 1' de özetlenmiştir. Ancak, bu parametrelerin dışında seperatör performansını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır.

Kalınlık: Şarj edilebilir piller için üretilen çoğu ticari seperatörde kalınlık 20-25 μm arasında değişir. Daha ince seperatörler daha düşük iç direnç ve daha yüksek enerji ve güç yoğunlukları sunar ancak mekanik mukavemet ve güvenlikten ödün verebilir. Öte yandan daha kalın seperatörler, gelişmiş mekanik güç ve güvenlik sağlar. Seperatörün kalınlık homojenliği, istikrarlı ve uzun pil döngüsü ömrü için hayati önem taşır (Liu ve Chuan 2021).

Gözenek Boyutu ve Dağılımı: Gözenekler, elektrotlardan aktif malzemeler ve iletken katkı maddeleri de dahil olmak üzere partiküllerin nüfuz etmesini engelleyecek kadar küçük olmalıdır. Gözeneklerin düzgün dağılımı ve kıvrımlı yapısı dendritik lityum oluşumunu engelleyecek yönde katkıda bulunur ve penetrasyonunu önler. Lityum iyon Batarya (LiB)'da seperatörler için mikron altı gözenek boyutu (1 μm 'den az) arzu edilir.

Gözeneklilik: Seperatörler, yeterli iyonik iletkenlik için yeterli sıvı elektroliti tutmak üzere uygun gözenekliliğe sahip olmalıdır. Gözeneklilik çok düşükse, elektrotlar arasındaki yetersiz elektrolit nedeniyle iç direnç yüksek olacaktır. Ancak aşırı gözeneklilik batarya güvenliğini olumsuz etkileyebilir ve düşük mekanik dayanıma neden olabilir. LiB seperatörleri için %40-60 civarında bir gözeneklilik idealdir. Düzgün olmayan gözeneklilik, düzgün olmayan akım yoğunluğuna ve düşük batarya performansına yol açabileceğinden, homojen gözeneklilik dağılımı kritik öneme sahiptir (Demeuse 2021, Liu ve Chuan 2021).

**Tablo 1.** USABC 'ya göre Li iyon pillerde kullanıma uygun seperatörlerde aranan önemli parametreler, hedeflenen değerler ve önerilen test metodları (standartlar) (Int Kyn.1).

Parametre	Birim	Hedef	Test Metodu	
Kalınlık	µm	< 25±1	ASTM D5947-96, D2103	
Geçirgenlik	Gurley	s / 10 cm ³	< ~25	Pat. US 4464238
	MacMullin	boyutsuz	< 8	-
İslanabilirlik	boyutsuz	Elektrolitlerde ıslanma	-	
Kullanım ömrü	yıl	15	Uzun süreli hücre testleri	
Ortalama por boyutu	µm	< 0,2	ASTM E128-99	
Delinme dayanımı	gkuv / 25,4 µm film*	300	ASTM F1306-90	
Çekme Dayanımı	N / A	<%2 deformasyon, 6.895 N /mm ² (1.000 psi)	ASTM D882-00	
Termal Kararlılık	% büzüşme, (90°C' de 1 saatte)	<5	ASTM D1204	
Kapanma Sıcaklığı	°C	105±5	-	
Yüksek voltaj dayanımı	V	5,0	-	

* gkuv / 25,4 µm: 25,4 µm kalınlıktaki seperatöre uygulanan gram-kuvvet (gram-force).

Geçirgenlik: MacMullin sayısı veya Gurley değeri ile ifade edilen geçirgenlik, batarya seperatörleri için çok önemlidir. Gurley değeri, seperatörün hava geçirgenliğini ölçer. Genellikle belirli bir basınç altında belirli bir alanından geçen 10 mililitre (s/10 mL) veya 100 mililitre (s/100 mL) hava için saniye cinsinden ifade edilir. Düşük bir Gurley değeri, daha yüksek hava geçirgenliği gösterirken, daha yüksek bir Gurley değeri daha düşük hava geçirgenliği gösterir. Li iyon pillerde iyi bir seperatör performansı için istenen Gurley değeri tipik olarak 100 mililitre (s/100 mL) hava için 20 ila 60 saniye aralığındadır. Uygun bir Gurley değeri, uygun elektrolit ıslatılabilirliği ve iyon taşınımını sağlarken kısa devre riskini en aza indirir.

MacMullin sayısı, bir seperatörün iyonik iletkenlik ile iyon taşınım direnci arasındaki ilişkiyi temsil eden boyutsuz bir parametredir. MacMullin sayısı, elektrolitle doyurulmuş seperatörün direncinin saf direncine oranıdır ($\sigma_{\text{elektrolit}}/\sigma_{\text{seperatör}}$). yüksek bir MacMullin sayısı, daha büyük bir iyon taşınım direnci gösterirken, daha düşük bir MacMullin sayısı daha iyi iyon taşınım özelliği gösterir. Seperatörlerde düşük bir MacMullin sayısı arzu edilir, çünkü bu, iyon akışına daha düşük direnç ve dolayısıyla daha iyi batarya performansı anlamına gelir. Düzgün geçirgenlik, uzun bir çevrim ömrü elde etmek için kritik öneme sahiptir (Liu ve Chuan 2021, Yang vd. 2021, Jang vd. 2020, Arora ve Zhang 2004).

Mekanik Özellikler: Seperatörün mekanik dayanımı hem batarya montajı hem de batarya çalışma sürecinde oldukça önemlidir. Hücre çalışması sırasında seperatör, elektrot malzemelerinin hacimsel genişlemesi nedeniyle deformasyona maruz kalır. Seperatörlerin yüksek çekme dayanımına sahip olması önemlidir. Böylece, şarj ve deşarj sırasında oluşan genleşme ve büzüşme gibi mekanik streslere karşı seperatör esnekliğini ve yapısal bütünlüğünü koruyabilir. Sonuç olarak kısa devre riski azalır. Li iyon piller için seperatörlerin delinme dayanımı da kritik bir parametredir. Elektrot malzemelerinin veya dendritik lityumun neden olduğu kısa devreleri önlemek için yüksek delinme mukavemeti gereklidir. Mekanik mukavemet gözeneklilik ile negatif ilişkilidir. Bu nedenle, mükemmel elektrokimyasal performanslar elde etmek için gözeneklilik ve mekanik mukavemet arasında bir denge bulmak gerekir (Lee vd. 2014, Demeuse 2021, Yang vd. 2021).

Boyutsal ve Termal Kararlılık: Seperatörler sıvı elektrolit içine yerleştirilip daldırıldığında kıvrılmamalıdır. Seperatörlerin şekillerinin değişmesi veya kıvrılması akü montajı sırasında yanlış hizalamaya neden olabilir. Seperatörler ayrıca depolama ve çalışma sırasında büzülmeyle karşı dayanıklı olmalıdır. Sıcaklık yükseldiğinde önemli ölçüde büzülmemeleri veya kırılmamaları gerektiğinden termal kararlılık seperatörler için hayati önem taşır. Montaj ve kurutma işlemi sırasında termal büzülmenin en aza indirilmesi çok önemlidir. Genel olarak, 90°C'de 60 dakika sonra termal büzülme %5'ten az olmalıdır (Liu ve Chuan 2021, Lee vd. 2014).

Kimyasal ve Elektrokimyasal Kararlılık: Seperatörler, elektrolit ve elektrot malzemelerine maruz kaldıklarında kimyasal ve elektrokimyasal kararlılık sergilemelidir. Li-iyon pilin deşarj ve şarj döngüleri sırasında güçlü oksitleyici ve indirgeyici koşullar altında inert kalmalıdır. Pilin işlevini engelleyebilecek safsızlıkların oluşumundan kaçınılmalıdır. Seperatörler elektrolitin yüksek sıcaklıklardaki aşındırıcı yapısına dayanmalıdır (Demeuse 2021, Yang vd. 2021).

İslanabilirlik ve Elektrolit Tutma: İyon taşınması için elektrolit emilimi gerektiğinden, sıvı elektrolit tarafından ıslanabilirlik çok önemlidir. Seperatörler, düşük iç direnç ve yüksek iyonik iletkenlik için önemli miktarda sıvı elektroliti

emmeli ve tutmalıdır. Emilim oranı seperatörün malzemesine, gözenekliliğine ve gözenek boyutuna bağlıdır. Pil montajı sırasında hızlı emilim esastır (Demeuse 2021, Yang vd. 2021).

Dolambaçlılık değeri (tortuosity): Dolambaçlılık değeri, bir malzemenin içindeki partiküllerin/parçacıkların hareket etme yolunun karmaşıklığını ve dolambaçlılığını ifade eden bir özelliktir. Genellikle, gözenekli ortamlar ve malzemelerde partiküllerin hareketinin düz bir çizgi yerine dolambaçlı bir yol izlediği kabul edilir. Matematiksel tanımı, etkili yol uzunluğunun geometrik yol uzunluğuna oranıdır. Partiküllerin ne kadar fazla dolambaçlı bir yol izlediğini gösterir. Örneğin, dolambaçlılık değeri 1 olduğunda, hareket doğrusal ve engelsizdir; değer 1'den büyük olduğunda, hareket daha dolambaçlı ve karmaşıktır. Yüksek dolambaçlılık değerine sahip seperatörler, iyonların daha karmaşık ve dolambaçlı yollar izlemesine ve iyonik iletkenliğin azalmasına neden olabilir. Bu durum, batarya performansını ve enerji verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, Li iyon pil seperatörlerinin tasarımında ve üretiminde bu değer minimize edilmesi önemlidir (Landesfeind vd. 2016, Costa vd. 2019, Chen vd. 2022).

Maliyet: Şimdilik seperatör, üretim ekipmanı, enerji tüketimi ve malzeme maliyeti de dahil olmak üzere mevcut şarj edilebilir pillerin toplam maliyetinin %20'sinden fazlasını oluşturmaktadır. Bu nedenle, düşük maliyetli bir seperatör üretim sürecinin geliştirilmesi, maliyetin azaltılması için çok önemlidir (Luo vd., 2021).

3. SEPERATÖR TÜRLERİ

Seperatörler temel olarak dört ana başlık altında sınıflandırılabilir; 1) Mikro gözenekli (mikroporoz), 2) Dokunmamış film (non-woven), 3) Katı elektrolit seperatörler (jel-polimer elektrolitler) ve 4) Kompozit seperatörler. Üretim yöntemi ve gözeneklilik, gözenek boyutu dağılımı, kalınlık, elektrolit afinitesi ve mekanik özellikler dahil olmak üzere yapısal parametreler, bu türler arasında farklılık göstermektedir (Foreman vd. 2017).

3.1. Mikro Gözenekli (Mikroporoz) Polyolefin Seperatörler

Mikro gözenekli poliolefin seperatörler, Li iyon pillerde en yaygın kullanılan seperatörlerdir. Bu seperatörler tipik olarak polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi poliolefinlerden üretilmektedir. Ticari Li iyon pillerde ağırlıklı olarak tek katmanlı PE veya PP seperatörler kullanılmaktadır (Bknz Tablo 2). Bu tür seperatörler, genellikle yüksek gözenekliliğe sahip olup, bu da etkili iyon taşıma kapasitesi ve düşük iç dirençle sonuçlanarak pil performansını iyileştirmektedir (Arora ve Zhang 2004). Ancak, Li iyon piller için belirlenen yüksek enerji yoğunluğu, yüksek kapasite ve yüksek güvenlik standartlarına ulaşma konusunda zorluklar yaşamaktadırlar. Düşük erime noktaları (örneğin, PE için 135°C, PP için 165°C) (Zhang vd. 2015), termal kararsızlıkla sonuçlanabilir ki bu da iç kısa devreler, yangınlar ve patlamalar gibi risklere neden olabilmektedir. Daha düşük elastik modülleri, metal dendritleri engellemede yetersiz kalmakta, bu da batarya performansının düşmesine ve güvenlik risklerinin artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, sınırlı elektrokimyasal kararlılıkları (maksimum 4,5 V'a kadar) ve yetersiz iyonik iletkenlikleri, yüksek enerji yoğunlukları gerektiren pil teknolojilerinin geliştirilmesini kısıtlamaktadır (Lee vd. 2014, Yang vd. 2021). Bu dezavantajlar nedeniyle, seperatör pazarında alternatif polimerik malzemeler araştırılmaktadır.

Ayrıca, PP/PE/PP yapısındaki üç katmanlı seperatörler de ticari olarak üretilmekte ve Li iyon pillerin güvenliğini artırmak için kritik bir role sahiptir. Bu seperatörlerin en önemli özelliklerinden biri, pillerde oluşan aşırı ısınma durumlarında devreyi kapatma işlevinin aktive olmasıdır. Bu süreçte, hücre sıcaklığı polietilen (PE) tabakasının erime noktasına (135°C) ulaştığında, iç PE katmanı erimeye başlar. Bu erime, gözenekli yapıyı gözeneksiz bir hale dönüştürür, böylece elektrotlar arasındaki iyon taşınımını durdurur. Bu aşamada, dış polipropilen (PP) tabakası ise hücre sıcaklığı PP'nin erime noktası olan yaklaşık 160°C'ye ulaşmaya kadar yapısal bütünlüğünü korumaya devam eder. Bu özellik, aşırı ısınma durumlarında batarya güvenliğini sağlayarak olası hasar veya tehlikeleri önlemektedir.

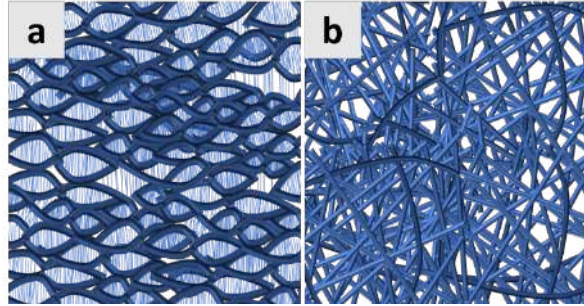
3.2. Dokunmamış Film (non-woven) Seperatörler

Her ne kadar mikro gözenekli poliolefin seperatörler (Bknz. Şekil 2a) pazarı domine etse de sınırlı elektrolit ıslanabilirliğine ve zayıf termal boyutsal kararlılığa sahip gibi önemli dezavantajları bulunmaktadır. Son yıllarda, dokunmamış film seperatörler (non-woven) olağanüstü yüksek gözeneklilikleri ve ıslanabilirlikleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Dokunmamış film seperatörler, tipik olarak rastgele yönlendirilmiş liflerin kimyasal, termal veya mekanik yöntemlerle birbirine bağlanmasıyla elde edilen lifli filmler/membranlar olarak tanımlanabilir (Bknz. Şekil 2b). Hem doğal malzemeler hem de sentetik malzemeler, dokunmamış film seperatörleri üretmek için kullanılabilirlerdir.

Tablo 2. Ticari mikro gözenekli polyolefin separatörlerin üretim yöntemleri ve karakteristik özellikleri (Int. Kyn. 2, Int Kyn. 3).

Üretici	Ürün İsmi	Malzeme	Üretim Yöntemi	Kalınlık (μm)	Gözeneklilik (%)	Gurley (s)	TD	MD	TD	MD	Delinme Mukavemeti (gf)
							Çekme Büzüşme (%)	Çekme Büzüşme (%)	Çekme Mukavemeti ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	Çekme Mukavemeti ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	
CELGARD	2400	PP	Kuru	25	41	620 (JIS)	0 (90 °C, 1 sa)	2,3 (90 °C, 1 sa)	140	1.420	450
	2500			25	55	200 (JIS)	0 (90 °C, 1 sa)	1,1 (90 °C, 1 sa-)	130	1.170	325
	PP1410			14	43	185 (JIS)	0 (105 °C, 1 sa)	0,4 (105 °C, 1 sa)	150	1.800	290
	PP1611			16	50	210 (JIS)	0 (105 °C, 1 sa)	0,8 (105 °C, 1 sa)	125	1.680	280
	S2010			20	54	200 (JIS)	0 (105 °C, 1 sa)	2,5 (105 °C, 1 sa)	110	2.050	400
	H1809	PP/PE/PP	Kuru	18	49	195 (JIS)	0 (105 °C, 1 sa)	2 (105 °C, 1 sa)	160	1.880	410
				5EP	5	44	110	1 (120 °C, 1 sa)	10 (120 °C, 1 sa)	≥ 1.100	≥ 1.500
9EPH	PE	Islak	9	48	75	4 (120 °C, 1 sa)	9,5 (120 °C, 1 sa)	≥ 800	≥ 1.100	255	

Tüm avantajlarının yanında büyük gözenekler dahili kısa devrelere, lityum dendritlerin aşırı büyümesine ve kendi kendine deşarja neden olmakta ve pil döngüsü performansını ve güvenliğini olumsuz etkilemektedir. Bununla birlikte, düşük gerilme mukavemetleri ve yavaş üretim süreçleri de büyük ölçekli ticarileştirmeyi zorlaştırmaktadır (Babiker vd. 2023). Bu eksikliklerin üstesinden gelmek için dokunmamış film separatörlere seramik kaplamalar ve inorganik dolgu malzemelerinin eklenmesi gibi modifikasyonlar yapılmaktadır (Zhang vd. 2015, Wang vd. 2020, Zhang vd. 2021). Bir başka yaklaşım da dokunmamış film separatörlerin ticari separatörler üzerine kaplama katmanları olarak kullanmaktır.


Şekil 2. (a). Mikro gözenekli poliolefin (b). Dokunmamış film separatörlerin yapılarının temsili gösterimi.

Bu separatörlerin karakteristik özellikleri poliolefin separatörler ile karşılaştırıldığında;

- Ticari poliolefin separatörler tek tabakalı PE, PP ve çok tabakalı PP/PE/PP olarak üretilmektedir. Dokunmamış film separatörlerin ise Polietilen tereftalat (PET), poliviniliden florür (PVDF), poliimid (PI), selüloz v.b. gibi birçok farklı polimer ve kombinasyonları için uygulamaları vardır. Ancak, henüz ticarileşmemiştir.
- Ticari poliolefin separatörler kuru / Islak proses ile üretilmektedir ve dolayısıyla büyük ölçekte üretim mevcuttur. Dokunmamış film separatörler için ise elektroçirme, ıslak serme, eriyik üfleme, v.b. yöntemler kullanılabilir. Ancak bu yöntemlerin henüz büyük ölçekte üretim uygulamaları yaygın değildir.
- Poliolefin separatörler mikro gözenekli bir yapıya sahipken, dokunmamış film separatörler rastgele yönlendirilmiş nanoliflerden oluşmaktadır.
- Poliolefin separatörler (%30-50) dokunmamış film separatörlere (%70-90) kıyasla daha düşük gözenekliliğe sahiptirler.
- Poliolefin separatörlerde por büyüklükleri (~30 nm) dokunmamış film separatörlere (<1 μm) kıyasla daha küçüktür. Bu özellik poliolefin separatörlerin avantajlarından biridir.

- Poliolefin seperatörlerin mekanik dayanımı (> 98,06 MPa) dokunmamış film seperatörlere kıyasla (<10 MPa) oldukça gelişmiştir.
- Dokunmamış film seperatörlerin termal dayanımları üretimlerinde oldukça çeşitli polimer türleri ve kombinasyonlarının kullanılabilmesi sebebiyle ayarlanabilmektedir ve genel olarak poliolefin seperatörlere kıyasla daha gelişmiştir.
- Dokunmamış film seperatörlerin daha yüksek gözenekliliğe sahip yapıları nedeniyle ıslanabilirlikleri poliolefin seperatörlere kıyasla oldukça gelişmiştir (Xing vd., 2022).

3.3. Katı Elektrolit Seperatörler

Pilin çalışabilmesi için, metal iyonlarının anot ve katot arasında taşınmasını sağlayan sıvı elektrolit ile doldurulması gerekmektedir. Bu durumda sıvı sızıntısı sonucu yangın ve patlama riskleri ortaya çıkmaktadır. Önceki bölümlerde bahsedilen seperatör türlerinin aksine elektrolit seperatörler yüksek iyonik iletkenlikleri sayesinde hem sıvı elektrolit hem de seperatör gibi davranabilmektedirler. Geleneksel sıvı elektrolitlerin katı elektrolitlerle değiştirilmesi, sızıntı ve kısa devre olmaksızın büyük mekanik deformasyonlara dayanabilen esnek Li iyon pillere giden yolu da açmaktadır. Katı elektrolit seperatörler, katı-seramik, katı-polimer ve jel-polimer olmak üzere dört çeşittir. Bu türlerin birbirlerine kıyasla avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Katı-seramik elektrolitlerin uygulamaları sert ve kırılğan yapıları nedeniyle sınırlıdır. Ayrıca, diğerlerine kıyasla daha düşük iyonik iletkenlik gösterirler. Katı polimer elektrolitler ise selüloz türevleri, polietilenoksit (PEO), polimetilmetakrilat (PMMA), polivinilidenflorür (PVDF) ve kopolimerleri v.b. kullanılarak elde edilmektedir. Esnek yapıları avantajlarıdır. Jel-polimer elektrolitler polimer matrise plastikleştirici veya jelleştirici katılarak elde edilen sıvı elektrolit içerisinde şişirilmiş polimer yapılarıdır. Plastikleştirici sayesinde iyonik iletkenlik artmaktadır. Yüksek iyonik iletkenlik ve mekanik dayanım sergilerler. Fiziksel ve kimyasal jel polimerler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Fiziksel jel-polimer elektrolitte polimer matris ve solvent arasında bağ oluşumu olmazken kimyasal jel polimer elektrolitte çapraz bağlanmaya neden olan çapraz bağlayıcı bulunmaktadır. Son olarak kompozit elektrolit seperatörler ise yüksek yüzey alanına sahip inorganik dolgu malzemelerinin polimer matrise katılması ile elde edilmektedir. Böylece iyonik iletkenlik, mekanik ve termal dayanım özellikleri geliştirilmektedir (Babiker vd. 2023, Deimede ve Elmasides 2015, Luo vd 2021). Katı elektrolit seperatörler üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen önemli sonuçlar Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Katı elektrolit seperatörler üzerine yapılan çalışmalar ve elde edilen önemli sonuçlar

Malzeme	Tür	İyonik iletkenlik (mS. cm ⁻¹)	Avantaj	Kaynaklar
PEGBCDMA	Katı-polimer	0,8	Yüksek iyonik iletkenlik ve elektrokimyasal dayanım	Fu vd. 2018
PDMS/PVDF	Jel-polimer	1,17	Yüksek iyonik iletkenlik	Li vd. 2011
MATEPP/ MMA/ TFMA	Jel-polimer	6,29	Mükemmel elektrokimyasal dayanım ve iyonik iletkenlik	Zheng vd. 2018
PEO-KFSI	Kompozit	0,27	Yüksek geri dönüşümlü kapasite	Fei vd. 2019

PEGBCDMA; Polietilen glikol-bis-karbamat dimetakrilat, PDMS; Polidimetilsiloksan, PVDF; polivinilidenflorür, MATEPP; di(2-metakriloyltrioksi etil)fenil fosfonat, MMA; Metil Metakrilat, TFMA; Trifloroetil Metakrilat, PEO-KFSI; Polietilenoksit-Potasyum Bis(florosülfonil) imid

3.4. Kompozit Seperatörler

Kompozit seperatörler elde etmek için çok farklı yaklaşımları uygulanabilmektedir; 1) polimer karışımlarının kullanılması, 2) inorganik katkıların yapıya dahil edilmesi, 3) yüzey modifikasyonları (kaplama ve aşılama), 4) çekirdek-kabuk yapısının elde edilmesi. Bu yaklaşımlar karşılaştırıldığında; kullanılan işlenmemiş malzeme ve katkı maddeleri arasında kaplama işleminde zayıf, karıştırma ve aşılama işlemlerinde iyi, çekirdek-kabuk yapısında ise mükemmel etkileşim (kararlılık) elde edilmektedir. Proseslerin zorluğu açısından kıyaslandığında karıştırma ve kaplama işlemleri kolay iken aşılama işlemi ve çekirdek-kabuk yapısının elde edilmesi daha zordur. Kaplama işleminde daha kalın, aşılama işleminde ise daha ince seperatörler elde edilebilirken, çekirdek-kabuk yapısı eldesinde ise seperatör kalınlığı ayarlanabilmektedir. (Yuan vd. 2021).

3.4.1. Polimer karışımları kullanarak kompozit separatör eldesi

Separatörlerin termal ve mekanik kararlılığı, elektrolit emilimi ve iyonik iletkenliği gibi özelliklerini geliştirmek için kullanılan yöntemlerden biri polimer karışımlarının kullanımıdır. Bu yöntemin arkasındaki fikir, belli başlı üstün özelliklere sahip birden fazla polimeri kullanarak birçok yönden gelişmiş özelliklere sahip yeni bir yapı elde etmektir. Yaygın olarak kullanılan polimerlere örnek olarak yüksek kimyasal ve mekanik dayanımları nedeniyle PVDF ve PAN (PAN ayrıca alev geciktirici özellik göstermektedir) ve yüksek termal dayanım gösteren polimid (PI) verilebilir. Bu strateji aracılığıyla, yüksek termomekanik stabilite ile birlikte sağlam elektrokimyasal performanslar elde edilebilir (Luo vd. 2021, Yu vd., 2023). Farklı polimer ve kopolimerlerin çeşitli kombinasyonları, istenen sonuçları elde etmek için son on yılda literatürde bildirilmiştir. Ayrıca, polimer karışımlarından yapılan separatörlerin üretimi hakkında yayımlanan araştırma makalelerini incelerken, çoğu polimer karışım separatörlerinin elektroçizme tekniği ile hazırlandığı gözlemlenmiştir (Bknz Tablo 4).

Tablo 4. Polimer karışımları kullanılarak separatör üretimi çalışmalarına örnekler, elde separatörlerin üretim yöntemleri ve özellikleri.

Malzeme ve katkı	Metod	Kalınlık (µm)	Termal Büzüşme (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Gözeneklilik (%)	İslanabilirlik (%)	İyonik İletkenlik (mS·cm ⁻¹)	Kaynaklar
PVDF ve PI	Elektroçizme	20	%0, 200 °C 60 dk	24,2	58	427	1,3	Park vd. 2016
PVDF-HFP ve PI	Elektroçizme	21	%0, 180 °C 30 dk	7,5	73	350	1,46	Chen vd. 2014
PVDF ve HDPE	NIPS	47	-	13,2	58	260	2,54	Liu vd. 2017
PEI ve PVDF	Elektroçizme	35	%0, 180 °C 30 dk	7	83,5	492,8	1,03	Zhai vd. 2016
PVDF ve PAN	Elektroçizme	-	%10, 200 °C 30 dk	25	-	320	1,45	Zhu vd. 2017
PAN ve PU	Elektroçizme	50	%0, 170 °C 30 dk	10	-	776	2,07	Zainab vd. 2016

PEI; Polieterimterler, PU; poliüretan

3.4.2. İnorganik katkılar kullanılarak kompozit separatör eldesi

Bu yöntemde, silisyum dioksit (SiO₂), alüminyum oksit (Al₂O₃), böhmüt (AlOOH) olarak bilinen alüminyum oksit hidroksit, titanyum dioksit (TiO₂), seryum oksit (CeO₂), magnezyum oksit (MgO), nikel oksit (NiO) ve zirkonyum dioksit (ZrO₂) dahil olmak üzere çeşitli oksit bazlı katkılar kompozit separatör elde etmek için doğrudan polimerik matrise dahil edilmektedir (blending) (Babiker vd. 2023, Lingappan vd. 2023). Yapılan çalışmalardan bazıları ve elde edilen kompozit separatörlerin özellikleri Tablo 5' te verilmiştir.

İnorganik bileşenlerin kullanılması, separatörlerin mekanik dayanıklılık, ıslanabilirlik, iyonik iletkenlik ve termal stabilite gibi kritik özelliklerinde iyileşmeler sağlamaktadır. Bu separatörler, yüksek gözeneklilik ve geniş yüzey alanına sahip lifli yapılar sergilemektedirler. Hidrofilik yapısı sayesinde, bu separatörler özellikle etilen karbonat (EC), propilen karbonat (PC) ve yüksek dielektrik sabitine sahip bütirolakton gibi siklik karbonatlar içeren organik elektrolitlerde etkili bir ıslanabilirlik gösterirler. Ayrıca, bu separatörler yüksek sıcaklıklarda (200°C) dahi iyi boyutsal kararlılık sergilemektedirler (Lingappan vd. 2023, Deimede ve Elmasides, 2015).

3.4.3. Yüzey modifikasyonu ile kompozit separatör eldesi

Yüzey modifikasyonu için iki farklı yöntem bulunmaktadır, yüzey kaplama (farklı polimerler veya inorganik malzemeler ile) ve yüzey aşılama (grafting).

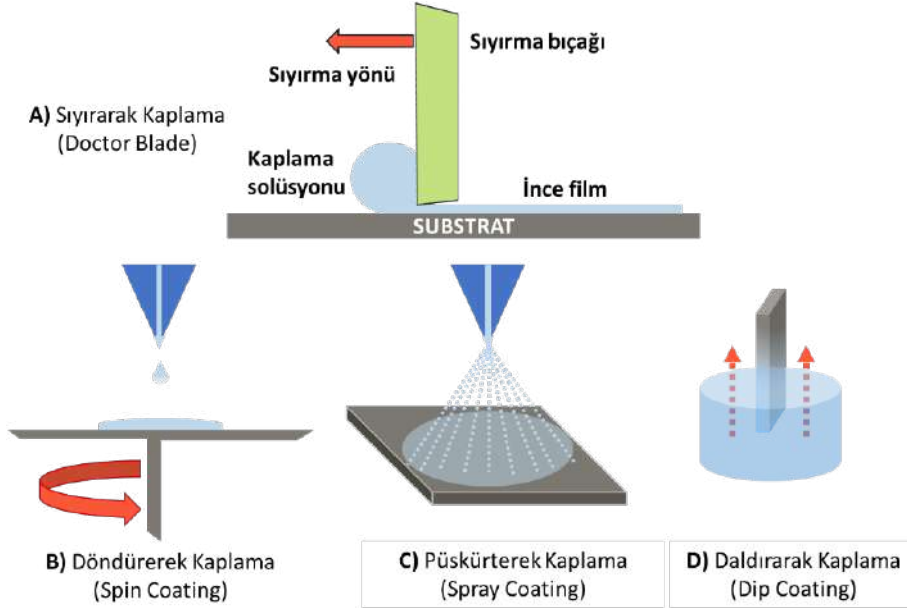
Yüzey kaplama: Bu yöntem ile farklı polimer türleri ve inorganik malzemeler kullanılarak çok tabakalı separatörler geliştirilmektedir (Bknz Tablo 6). Yüzey kaplama, separatörün hidrofilikliğini geliştirerek ıslanabilirliği artırır. Ancak, separatör gözenekliliği değişmediği için elektrolitin tutulmasını iyileştirmemektedir (Luo vd. 2021). Çok tabakalı separatörlerin hazırlanması için daha önce de bahsedilen üretim yöntemlerinden ıslak serme, faz değişimi ve elektroçizme yöntemleri uygulanabilmektedir. Ancak bunların dışında birçok yöntem çalışılmıştır. Genel olarak kaplama işleminde kaplanacak malzeme organik çözücü içerisinde dağıtılır, daha sonra elde edilen homojen çözeltiye polimerik bağlayıcı (PVDF) eklenir, oda sıcaklığında veya belirli bir sıcaklıkta karıştırılır. Son olarak polimerik separatöre bu çözelti ile muamele edilir (daldırma, püskürtme, v.b.) ve belirli bir sıcaklıkta vakum altında kurutulur. En yaygın kullanılan kaplama işlemleri; sıyırarak kaplama, daldırarak kaplama, döndürerek kaplama ve püskürterek kaplamadır (Bknz. Şekil 3).

Tablo 5. İnorganik katkıli separatör çalışmalarına örnekler, elde separatörlerin üretim yöntemleri ve özellikleri.

Malzeme ve katkı	Metod	Kalınlık (μm)	Termal Büzüşme (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	İlanabilirlik (%)	İyonik İletkenlik ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Kaynaklar
PP ve PEI/SiO ₂	Kendiliğinden ekleme	14	%25 (130 °C, 30 dk)	-	398	0,49	Wang vd. 2015
PVDF ve PMMA/SiO ₂	Elektroçirime	30	%0 (150 °C, 1 sa)	32,69	406	4,0	Fu vd. 2018
PP ve SiO ₂ /PDA	Daldırarak kaplama	-	%22 (160 °C, 30 dk)	-	130	0,55	Chao vd. 2018
PVDF-HFP ve ZrO ₂ fiber	Faz ayırma	30	%0 (170 °C, 2 sa)	>5	252,2	0,32	Wang vd. 2017
PI ve Al ₂ O ₃	Elektroçirime	20	%0 (200 °C, 1 sa)	38,6	864,2	-	Shayapat vd. 2017
PVDF ve Zeolit	Elektroçirime	26	%0 (150 °C, 1 sa)	3,2	378	1,72	Zhang vd. 2018
PVDF ve montmorillonit	Elektroçirime	36	%19 (150 °C, 1 sa)	-	342	4,2	Fang vd. 2016
Selütoz ve Al ₂ O ₃	Casting	30	%0 (180 °C, 30 dk)	140	625	4,91	Xu vd. 2017

PDA; Polidopamin.

Celgard Şirketi tarafından kuru işleme hazırlanan PP/PE ve PP/PE/PP gibi çok tabakalı mikro gözenekli separatörler, tek tabakalı PP veya PE'ye göre daha üstün termal stabilite ve güvenlik özellikleri göstermektedirler. PP ve PE dışında, diğer polimer malzemeler de çok tabakalı separatörlerin hazırlanmasında kullanılmaktadır. Bu tür çok tabakalı separatörlerin kullanıldığı Li-iyon piller, yüksek kapasite ve döngü stabilitesi sergilemektedirler (Waqas vd. 2019)



Şekil 3. Çok tabakalı separatörlerde uygulanan bazı kaplama işlemlerinin şematik gösterimleri.

**Tablo 6.** Çok tabakalı seperatör çalışmalarına örnekler, elde seperatörlerin üretim yöntemleri ve özellikleri.

Tabakalar	Metod	Kalınlık (μm)	Termal Büzüşme (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Gözeneklilik (%)	Islanabilirlik (%)	İyonik İletkenlik ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Kaynaklar
PP/PE/PP	Ticari	25	<%32 140 °C 60 dk	120 (MD) 11,5 (TD)	28,7	60,8	0,28	Waqas vd. 2019
PE/ Seramik	Islak serme	24	%5 160 °C 60 dk	-	68	95	0,65	Zhao vd 2017
PE/ SnO ₂	Faz Değişimi	17,4	<%0 130 °C 30 dk	122	-	119,4	0,72	Xiang vd. 2018
PP/ PVDF-HFP/SiO ₂	Faz Değişimi	-	<%18 150 °C 30 dk	2,80	-	281	1,9	Li vd. 2014
PVDF-HFP/ Al ₂ O ₃	ALD (Atomic Layer Deposition), elektroçürme	42	<%0 270 °C 30 dk	-	-	230	1,24	Shen vd. 2018
PVDF-HFP/ Al ₂ O ₃ /PE/ PVDF-HFP/ Al ₂ O ₃	Daldırarak kaplama	30	<%75 140 °C 30 dk	4	53	-	0,495	Jeong vd. 2010
PE/PET/PE	Daldırarak kaplama	22	<%0 200 °C 60 dk	111,8	68	110	0,58	Kim vd. 2016
PE/ PVDF-HFP/ Al ₂ O ₃ /PVDF	Elektroçürme, Faz değişimi	30	<%7,8 180 °C 60 dk	87	84	271	1,25	An vd. 2014
PVDF/PE/PVDF	Elektroçürme	20	<%3 170 °C 60 dk	11,2	55	380	2,5	Pan vd. 2018
PVDF-HFP/Selüloz/PVDF-HFP	Daldırarak kaplama, elektroçürme	27	<%0 200 °C 30 dk	50	65	280	1,04	Zhang vd. 2013
PI/PVDF/PI	Elektroçürme	50	<%2,7 160 °C 2 sa	8,2	83	476	3,46	Wu vd. 2015
PEEK/PMMA/PEEK	Elektroçürme	41,2	<%0 150 °C 12 sa	69,58	45,6	172,8	1,03	Li vd. 2018

PEEK; Polieter eter keton, PMMA; polimetil metakrilat

Yüzey aşılama (grafting): Kaplama işlemi sonucunda artan seperatör kalınlığı ve kapanmış gözenek yapıları batarya performansını olumsuz etkilemektedir. Bunun dışında bu işlemle inorganik partiküllerin homojen dağılımını sağlamak oldukça zordur. Aşılama işleminin ise en büyük avantajı seperatör kalınlığını ve polimer matrisini neredeyse değiştirmeden yapıdaki kimyasal bağları güçlendirmektir. Yüksek enerji ışınması (plazma, gama ışını, v.b.) polimer zincirlerinin çapraz bağlanma reaksiyonunu başlatmak için serbest radikaller üretebilir (hidroksil, karboksil, amino, imino, sülfonil vb. gibi hidrofilik gruplar), böylece seperatörün termal ve mekanik dayanıklılığında büyük ölçüde gelişme kaydedilebilmektedir (Luo vd. 2021). Yüzey işleme süresinin ve dozunun seperatör özellikleri üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Optimal sürenin ötesinde yapılan yüzey işlemi, gözenekli yapının tamamen yok olmasına yol açarak iyonik iletkenlikte ve mekanik dayanıklılıkta azalmaya neden olabilir.

Elektrolitlerin polimerlerle yüksek afinitesi ve inorganik malzemelerin sağlam termal stabilitesi nedeniyle, çeşitli polimerlerin, inorganik malzemelerin ve diğer polimerize monomerlerin elektron ışını, UV ve gama ışınları vasıtasıyla PE veya PP substratlar üzerine aşılama araştırmaçılar tarafından yoğun bir şekilde araştırılmıştır (Bknz Tablo 7). Aşılama polimerizasyon reaksiyonu sırasında, polimerler elektrolit ıslanabilirliğini arttırırken, seramik malzemeler aşılama seperatörlerin termal stabilitesini arttırır (Lingappan vd. 2023, Waqas vd. 2019).

Tablo 7. Yüzey aşılama çalışmalarına örnekler, elde seperatörlerin üretim yöntemleri ve özellikleri.

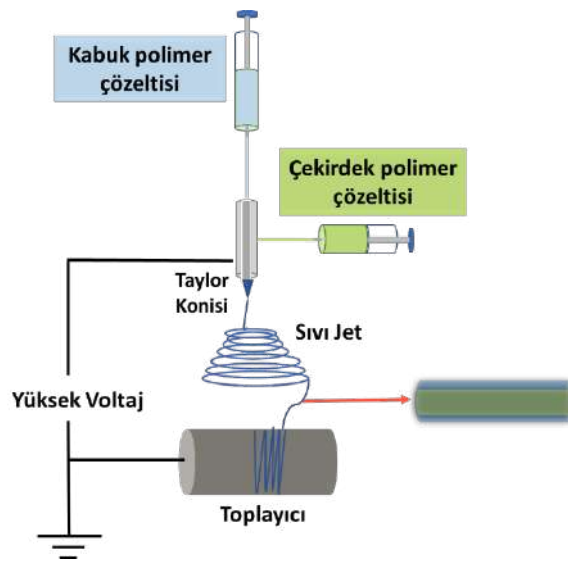
Temel ve aşılama malzeme	Metod	Kalınlık (µm)	Termal Büzüşme	Çekme Dayanımı (MPa)	Gözeneklilik (%)	İslanabilirlik (%)	İyonik İletkenlik (mS·cm ⁻¹)	Kaynaklar
PE ve SiO ₂	Aşılama	19	<%5 120 °C 30 dk	-	-	-	0,77	Na vd. 2019
PE ve TiO ₂	Aşılama	8	<%36 150 °C 30 dk	125	-	-	0,5	Zhu vd. 2016
PP ve PMA	Aşılama	26	<%35 150 °C 30 dk	-	47	450	1,57	Liu vd. 2017
PP ve PMA/SiO ₂	Aşılama	28	<%12 150 °C 30 dk	-	45	438	1,43	Liu vd. 2017
PI ve florlu gruplar	Elektroçirime, ısı ile çapraz bağlama	35	<%0 250 °C 60 dk	31,7	-	620,2	1,14	Kong vd. 2018

PMA; Polimetilakrilat

3.4.4. Çekirdek-kabuk yapılu kompozit seperatörler

Bu tür kompozit seperatörlerde çekirdek-kabuk yapısında lifler kullanılmaktadır. Çekirdek-kabuk arasındaki etkileşim kaplama işlemine kıyasla daha kuvvetlidir. Bu seperatörlerde, polimerik kabuk tabakası ısıyı algılama rolünü üstlenir ve gözenekleri tıkamak ve böylece elektrot reaksiyonlarını sonlandırmak için erirken, genellikle inorganik malzemelerin kullanıldığı çekirdek kısmı nispeten ısıya dayanıklıdır ve seperatörün büzülmesini önlemeye hizmet eder. Çekirdek-kabuk yapısına sahip ticari poliolenin bazı kompozit seperatörler nadiren incelenmiştir. Bununla birlikte, PVDF ve kopolimerlerinin kabuk yapısı olarak kullanılması, yüksek ıslanabilirlik, uygun gözenek boyutu ve gözenek dağılımı ve fonksiyonel grubun çekirdeklerle sıkı bağlantısı gibi mükemmel fiziksel özellikleri nedeniyle giderek yaygınlaşmaktadır.

Elektroçirime yöntemi ile yüksek termal kararlılığa sahip çekirdek malzemesi ve yüksek elektrokimyasal kararlılığa sahip kabuk malzemesi birbirine entegre edilebilmektedir. (Wang vd. 2022, Yuan vd., 2021). Çekirdek-kabuk yapısındaki kompozit seperatörlerin üretiminde kullanılan elektroçirime düzeneğinin ve elde edilen yapının temsili görseli Şekil 4' te verilmiştir. Çekirdek-kabuk nanoliflerin Li iyon piller için seperatör olarak kullanımı son araştırmalarda büyük ilgi görmüştür (Bknz Tablo 8). Bu seperatörler, Li iyon pillerin verimli çalışması için çok önemli olan geniş yüzey alanı, yüksek gözeneklilik ve gelişmiş güvenlik performansı gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, çekirdek-kabuk yapılu nanoliflerin kullanımının geniş bir kapatma sıcaklığı penceresi ve istikrarlı elektrokimyasal performans sağladığı gösterilmiştir, bu da onları Li-iyon pil seperatörleri için umut verici adaylar haline getirmektedir (Wei vd., 2020).



Şekil 4. Çekirdek-kabuk yapıda seperatörlerin üretiminde kullanılan elektroçirime sistemine bir örnek ve elde edilen fiber yapısının şematik gösterimi.

**Tablo 8.** Çekirdek-kabuk seperatörlere ait çalışmalara örnekler, elde seperatörlerin üretim yöntemleri ve özellikleri.

Kabuk	Çekirdek	Metod	Kalınlık (μm)	Termal Büzüşme	Çekme Dayanımı (MPa)	Islanabilirlik (%)	İyonik İletkenlik ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Kaynaklar
PI	TiO ₂	Elektroçirime	17	%0 (300 °C, 1 sa)	27,6	460	1,54	Dong vd. 2019
TiO ₂	PI	Hidroliz	27	%0 (300 °C, 1 sa)	20,2	455	1,47	Dong vd. 2019
PVDF	PI	Elektroçirime	20	%0 (200 °C, 1 sa)	-	427	1,3	Park vd. 2016
PVDF	PMIA	Elektroçirime	45	%0 (260 °C, 1 sa)	18,9	753	1,7	Wang vd. 2019

PMIA: Polimetilen izoftalamid

3.5. Fonksiyonel Seperatörler

3.5.1. Kapatma (shut-down) fonksiyonlu seperatörler

Kapatma fonksiyonu seperatörlerin en önemli güvenlik unsurlarından biridir. Hücre sıcaklığı seperatörlerin erime aralığına yükseldiğinde, seperatörün mikro gözenekleri eriyen parçalar tarafından kapatılır, bu da iki elektrot arasındaki iyonik taşıma yolunu bloke eder ve elektrokimyasal reaksiyonları sonlandırır. Seperatör malzemesi ayrıca yüksek sıcaklıkta eriyik bütünlüğüne sahip olmalı ve kapatma sıcaklığının üzerinde mekanik sağlamlık sergilemelidir. Seperatörün kapatılmasından sonra hücre sıcaklığının artmaya devam etmesi muhtemeldir. Seperatör, elektrotların fiziksel temas kurmasını ve dahili bir kısa devrenin güvenlik tehlikesi yaratmasını önlemek için yüksek sıcaklıklarda zamanın bir fonksiyonu olarak mekanik bütünlüğünü ve yüksek empedansını korumalıdır. Çok katmanlı seperatörlerin birçoğu, katmanlardan ikisinin farklı faz geçiş sıcaklıklarına sahip olduğu bir kapatma özelliği ile tasarlanmıştır. Hücrenin sıcaklığı arttıkça, düşük erime noktalı bileşen eriyerek diğer katı katmanın gözeneklerini doldurur ve hücrede iyon taşınmasını ve akım akışını durdurur (Lingappan vd. 2023, Deimede ve Elmasides, 2015). Bu tür seperatör üretiminde yapılan çalışmalar Tablo 9’ da özetlenmiştir.

Tablo 9. Kapatma (shut-down) fonksiyonuna sahip seperatörler üzerine yapılmış çalışmalara örnekler ve elde edilen seperatörlerin özellikleri

Malzeme	Kalınlık (μm)	Gözeneklilik (%)	Elektrolit Alımı (%)	İyonik İletkenlik ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Kapanma sıcaklığı (°C)	Kaynaklar
PEI/PBI	28	54	225	0,59	140-200	Yoo vd. 2015
PE/PI	26	60	400	1,34	120-200	Shi vd. 2015
PE/PET	22	65	60	0,58	140-200	Kim vd. 2016
PAN/PES	-	59,3	665	2,1	110-250	Wei vd. 2020
PVDF/PMIA	45	72,9	753	1,7	180	Zhai vd. 2014
PEEK/PMMA	12,7	64,1	172,8	-	270	Li vd. 2018

PET: Polietilen tereftalat, PMIA: Poli(m-fenilen izoftalamid)

3.5.2. Dendrit büyümesini inhibe eden seperatörler

Lityum dendrit oluşumu seperatörü delip katot malzemeleriyle doğrudan temas etme potansiyeline sahiptir. Bu durum kısa devrelere ve termal kaçış veya patlamalara yol açabilmektedir. Dendrit büyümesi üzerinde sıcaklık, akım yoğunluğu ve elektrolitler gibi çeşitli parametreler etkili olabilir. PP seperatörler, iyon taşınmasını kolaylaştıran ancak Li⁺ konsantrasyon gradyanını dengelemeyen düz gözeneklere ve düşük gözenek bağlantısına sahiptir. Buna karşılık, PE seperatörler daha yüksek gözenek bağlantısına sahiptir ve bu da iyon geçişinde etkili olacağından iyon konsantrasyon gradyanının homojen olmasını sağlayacaktır. Düzenli bir gözenek yapısına sahip seperatör, düzgün bir Li⁺ iletim kanalı

sağlayabilir ve düzgün lityum birikimini kolaylaştırabilir (Tong ve Li 2023). Faz değişim yöntemi ve elektroçirme ile hazırlanan seperatörlerde, seperatörün yapısı, iyon iletim hızını iyileştirmek için öncü maddenin ve deneysel parametrelerin düzenlenmesiyle optimize edilebilir. Pilin iyon taşıma özellikleri, seperatör yüzeyine polar grupların (karboksil ve amino) aşılması veya hidrofilik malzemelerin (inorganik partiküller ve polar polimer) yüzeye kaplanması ile etkili bir şekilde iyileştirilebilir. Böylece, mekanik bariyerler aracılığıyla lityum dendritlerin oluşumunu engelleyen veya pilin ağırlığını veya hacmini önemli ölçüde artırmadan Li⁺ iyon geçişini ve birikimini düzenleyebilen fonksiyonel seperatörler elde edilebilir. İşlevsel seperatörlerle Li dendritlerini bastırma stratejileri üç kategoriye ayrılabilir: (i) mekanik bariyerler aracılığıyla Li dendrit büyümesini önlemek, (ii) seperatörden geçerken Li⁺ iyon akışını yeniden dağıtmak ve (iii) Li⁺ çekirdeklenme yerlerinin düzgün bir şekilde birikmesini sağlamak (Babiker vd., 2023, Lingappan vd. 2023, Tong ve Li 2023).

3.5.3. Alev geciktirici seperatörler

Seperatörlerin yüksek sıcaklıklarda çalışması zorunluluğu kullanım alanına göre gereklilik göstermektedir. Pilin sıcaklığı termal başlangıç noktasının üstüne çıktığında, kontrol edilemeyen bir ısı üretir. Bu durum, duman, yangın ve hatta patlamalara yol açan bir zincir reaksiyonuna neden olur. Bu nedenle, şarj edilebilir pilin kontrol edilemeyen sıcaklık artışı, pil endüstrisinin gelişimini önemli ölçüde engellemiştir. Piller yanarken, seperatör doğru şekilde işlev görmeye devam edebilir, böylece daha fazla bozulmayı önleyebilir ve hatta yangın söndürücü olarak hareket edebilir. Bu nedenle, sonraki nesil ve güvenli enerji depolama cihazları için mükemmel alev geciktirici özelliklere sahip gelişmiş ticari seperatörler geliştirmek acil bir ihtiyaçtır.

Genel olarak, polimer seperatörlerin alev geciktirici özelliği sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) ve yanma deneyi ile değerlendirilmiştir. LOI, oksijen ve nitrojen içindeki oksijenin hacim konsantrasyonunu temsil eder. Oksijen indeksi ne kadar yüksekse, alev geciktirici performans o kadar iyi olur. Yanma deneyi, seperatörlerin alev geciktirici özelliğini karakterize etmenin bir başka basit yoludur. Ateşleme eylemi sırasında hiç yanma olmazsa, seperatör "alev geciktirici" olarak kabul edilir (en az 30 saniye boyunca devam eder) (Babiker vd. 2023, Li vd. 2020).

Alev geciktirici özelliklere sahip pil seperatörleri oluşturmak için üç farklı yaklaşım kullanılabilir: (1) Elektrokimyasal performansı veya diğer özellikleri artırmak için inorganik nanopartiküllerin katılması ile doğal olarak yanmaz polimerin geliştirilmesi. (2) Nanokompozit teknolojisi aracılığıyla, alev geciktirici katkı maddelerinin seperatör üretimi sırasında polimere dağıtılarak ve karıştırılarak matrise dahil edilmesi. (3) Alev geciktirici katkı maddelerinin yapıştırıcılar aracılığıyla polimerik seperatörlerin yüzeyine (örneğin, poliolefin seperatörler) kaplanması ve bağlanması ile alev geciktiriciliğin elde edilmesi. Bunlar genellikle laboratuvarında sentezlenmiş veya endüstriyel olarak mevcut ürünlerden türetilmiştir (Babiker vd. 2023, Tong ve Li 2023).

Cl/Br içeren polimerler, alevi koruyan serbest zincir radikallerini gidermek için halojen radikalleri veya halojenürleri serbest bırakabilir. Alev geciktirici polimerler, güçlü F-C bağı nedeniyle diğer polimerlerden daha kararlı olan aromatik heterosiklikler ve nitril grupları içerir. Yanmaz polimerler yanmaz seperatör olarak ayrı ayrı hazırlanabileceği gibi ticari seperatörü modifiye etmek için de kullanılabilir. Alev geciktirici malzemelerle (PBI, PEEK ve PI gibi) birleştirilmiş seperatörler alev direncini etkili bir şekilde artırabilse de yanmaz seperatörün üretim süreçleri hala karmaşıktır. Birçok nanofiber bazlı polimer seperatörün mekanik mukavemeti ve elektrolit ıslanabilirliği gerçek gereksinimleri karşılayamamaktadır. Ayrıca, alev dirençli polimerlerin çoğu çok daha pahalıdır. Bu nedenle, bu özelliğe sahip yeni malzemelerin ve üretim süreçlerinin araştırılması büyük önem arz etmektedir (Babiker vd. 2023, Tong ve Li 2023).

Günümüzde, seperatör teknolojisindeki yenilikler, sadece tek bir fonksiyonel özellik yerine, bunların kombinasyonlarına ve ek fonksiyonel özelliklere odaklanmaktadır. Bu bağlamda, çevre dostu ve maliyet açısından etkin, doğadan ilham alınarak geliştirilen seperatörler ilgi görmektedir. Ayrıca, spesifik kapasiteye katkıda bulunan redoks-aktif seperatörler gibi yeni nesil malzemeler üzerindeki araştırmalar önem kazanmaktadır. Bunun yanı sıra, kendi kendini iyileştirebilme ve onarılabilme yeteneğine sahip seperatörler, pil teknolojisindeki dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü artırmak adına kritik öneme sahiptir. Bu yöndeki çalışmalar, pil teknolojisinin geleceğini şekillendirmeye devam etmektedir ve bu alandaki araştırmalar hızla ilerlemektedir. Bu gelişmeler hem çevresel sürdürülebilirliği hem de pil teknolojilerinin performansını iyileştirmeyi hedeflemektedir.

4. SEPERATÖR ÜRETİM PROSESLERİ

Seperatör üretiminde kuru proses, ıslak proses, kuru serme, ıslak serme, faz inversiyonu, elektrospinning ve eriyik üfleme gibi çok çeşitli süreçler kullanılabilir. Bununla birlikte, büyük ölçekli ticari mikro gözenekli seperatörlerin üretimi için iki temel üretim süreci ıslak ve kuru süreçlerdir. Faz inversiyon yöntemi de mikro gözenekli seperatörlerin üretilmesi için uygulanırken, dokunmamış film seperatörler kuru serme, ıslak serme, eriyik üfleme ve elektrospinning işlemleri dahil olmak üzere çeşitli yöntemlerle hazırlanmaktadır (Waqas vd. 2019, Deimede ve Elmasides 2015).

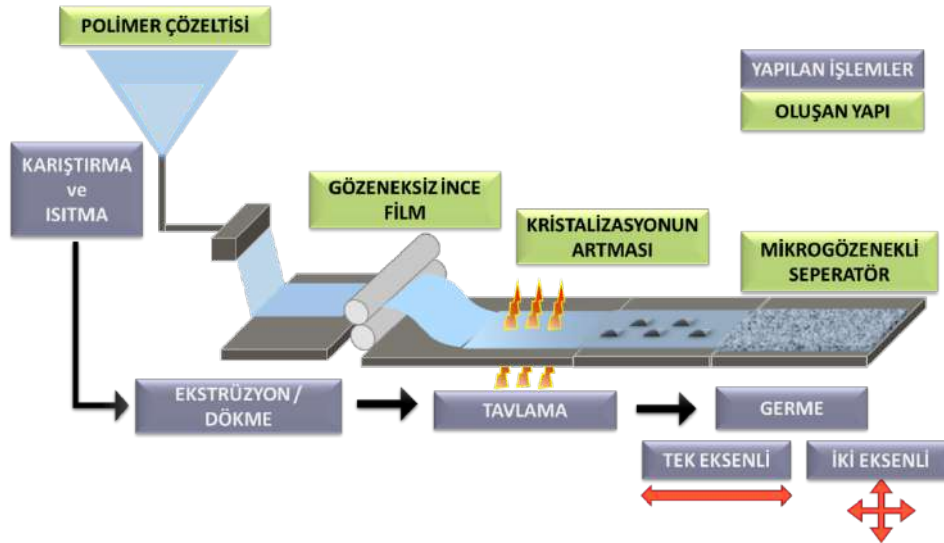
4.1. Mikro Gözenekli Seperatörlerin Üretim Süreçleri

Büyük ölçekli ticari mikro gözenekli seperatörlerin üretimi için iki temel üretim metodu kuru ve ıslak proseslerdir. Her iki yöntemde de amaç polimer filmi elde etmek ve daha sonra gözenekli bir yapı oluşturmak için germe işlemi uygulamaktır.

4.1.1. Kuru proses

Genel olarak ısıtma, ekstrüzyon, tavlama ve gerdirme adımlarını içermektedir. İlk olarak poliolefin reçine ısıtılarak ergiyik haline getirilmekte ve ekstrüde edilerek film halinde dökülmektedir. Elde edilen gözeneksiz film, polimerin camı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığı (T_m) arasındaki bir sıcaklıkta tavlama yapılmaktadır. Böylece, kristallinite artırılmakta ve kristal boyutu kontrol edilmektedir. Son olarak kristal lameller arasındaki arayüzleri ayırarak mikro gözenekli yapı elde etmek için germe işlemi uygulanmaktadır. Germe işlemi tek eksenli (uniaxial) ve çift eksenli (biaxial) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kuru proses adımlarının ve örnek mikro gözenekli seperatör üretim hattının şematik gösterimi Şekil 5'te verilmiştir.

Genellikle, tek eksenli gerilmiş filmler iyi mekanik özelliklere sahiptir (gerilme mukavemeti >150 MPa), ancak ısı ile yüksek büzüşme davranışı göstermektedir. Buna karşılık, çift eksenli gerilmiş filmler ise düşük gerilme mukavemetine (<15 MPa) sahipken, ısı ile ihmal edilebilir büzüşme davranışı sergilemektedir. Bu nedenle, kuru proses yüksek kristalliniteye sahip polimerler için uygundur. Bu işlemde kullanılan polimerin kristallinitesi ve kristal yapısı, tavlama sıcaklığı ve süresi, gerdirme oranı ve yönü mikro gözenekli seperatörlerin yapısını etkileyen önemli parametrelerdendir (Luo vd.2021, Mun ve Won 2021).



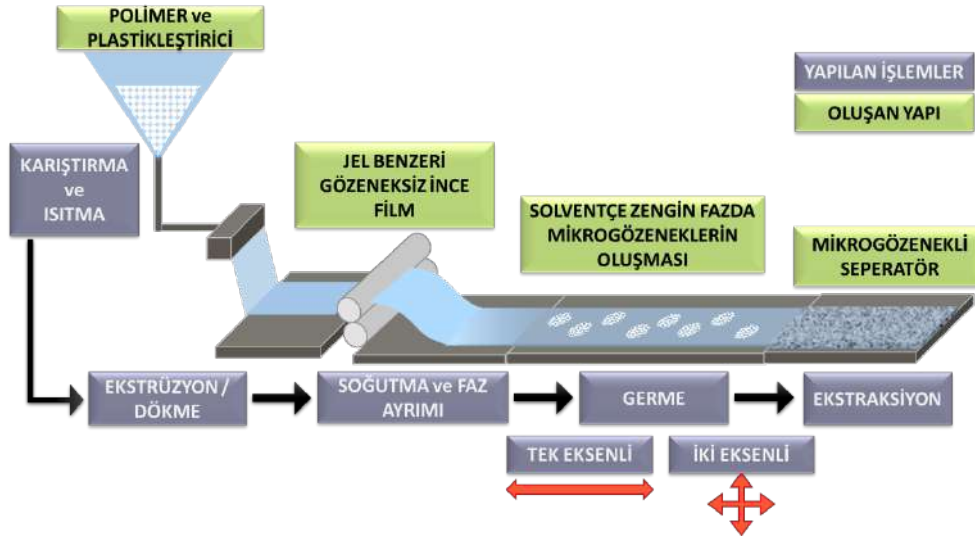
Şekil 5. Kuru proses ile mikro gözenekli seperatör üretiminin şematik gösterimi.

4.1.2. Islak Proses

Bu üretim yöntemi şu adımlardan oluşmaktadır; 1) polimerik reçinenin plastikleştirici veya düşük molekül ağırlıklı kimyasallar (parafin yağı v.b.) ile karıştırılması, 2) ısıtılarak eriyik haline getirilmesi, 3) eriyiğin ekstrüde edilerek jel benzeri bir film elde edilmesi, 4) bu filmin makine yönünde veya çift eksenli olarak gerilmesi, 5) plastikleştiricinin uçucu çözücülerle yapıdan uzaklaştırılması (ekstraksiyon) ve mikro gözenekli yapının oluşması (Deimede ve Elmasides, 2015, Lee vd. 2014). Germe işlemi jel benzeri film elde edildikten sonra yapılabilir. Bu durumda daha küçük ortalama gözenek boyutu ve daha homojen gözenek boyutu dağılımına sahip olduğu ortaya konmuştur. Islak proses adımlarının ve bu yöntemle üretilen mikro gözenekli seperatör üretim hattının şematik gösterimi Şekil 6'da verilmiştir. Islak proses

ile elde edilen mikro gözenekli separatörlerin morfolojisi çözelti bileşimi, solventlerin ekstraksiyon işlemi, tavlama sıcaklığı ve süresi ve gerdirme oranı ve yönü parametrelerinden oldukça etkilenmektedir (Deimede ve Elmasides, 2015).

Gözenek yapılarındaki farklılıklar dikkate alındığında, kuru proses ile üretilen separatörler, açık ve düz gözenek yapıları gösterirken, ıslak proses ile üretilen separatörler, kıvrımlı ve birbirine bağlı gözenek yapılarına sahiptir. Bu nedenle, kuru proses ile üretilen separatörler yüksek enerji yoğunluğu gerektiren bataryalar için daha uygunken, ıslak proses ile üretilen separatörler yapıları sayesinde lityum dendritik büyümesini durdurarak batarya kullanım ömrünü uzatma potansiyeline sahiptir (Zhang vd. 2015, Lee vd. 2014, Lingappan vd. 2023). Kuru proses, ıslak prosese göre daha kolay bir yöntemdir. Ancak, bu yöntem ile üretilen membran separatörler enine yönde esnek değildir ve üretim sırasında kolayca parçalanabilir (Luo vd. 2021).



Şekil 6. Islak proses ile mikro gözenekli separatör üretiminin şematik gösterimi.

Önemli separatör üreticileri olan Celgrad LLC ve Ube Corp. Ltd. PP ve PE separatör ürün gruplarının üretiminde genellikle kuru prosesi tercih etmektedir. (Tanjia 2009, Mun ve Won 2021, Arora ve Zhang 2004, Lee vd. 2014). Islak proses ise değiştirilebilir proses koşulları ve hem yarı kristal hem de amorf polimerlere uygulanabilirliği nedeniyle kuru prosese göre çok yönlüdür. Global marketin yaklaşık %80' i bu yöntemi tercih etmektedir (Asahi Kasei, Toray, Mitsui Chemicals) (Deimede ve Elmasides, 2015).

4.1.3. Faz ayrımı/değişimi (phase inversion) yöntemi

Faz ayrımı, gözenekli yapıların oluşumunda uzun zamandır kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, yapıların elastikiyetini koruyarak gözenek oluşumunu mümkün kılar, bu sayede separatörün termal büzülme ve gerilme aşamaları sırasında oluşabilecek ürün kusurları minimize edilmektedir. Bu yöntem faz ayrımına neden olan etmenlere göre dört farklı alt kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar; 1) daldırma ile çöktürme, 2) ısı yolla indüklenen faz ayrımı (Thermally Induced Phase Separation, TIPS), 3) buharlaşma ile indüklenen faz ayrımı (Evaporation Induced Phase Separation, EIPS), 4) buhar kaynaklı faz ayrımı (Vapor Induced Phase Separation, VIPS) yöntemidir (Zare ve Kargari 2018). Genellikle, bir polimer çözeltisi ince bir tabaka halinde uygulanır ve ardından çözücü özelliği olmayan bir koagülasyon banyosuna batırılır. Çözücü ile çözücü olmayan maddenin karışabilirliği, termodinamik açıdan metastabil ve/veya kararsız bir sistem oluşturarak gözenekli bir yapıyı teşvik eder. Bu süreçte, iki çözücünün özellikleri, oluşan membranın morfolojisini ve gözenekliliğini önemli derecede etkilemektedir. Poli-(viniliden florür) (PVDF) homopolimerleri, ko-polimerleri ve poliimid (PI) bazlı mikro gözenekli separatörlerin morfolojisi, kullanılan çözücü ve çözücü olmayan maddelerin kombinasyonuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Membranın her iki yüzeyinde gözeneklerin asimetrik dağılımı, "sünger benzeri" ile "parmak benzeri" yapılar arasında morfolojik değişimlere yol açmaktadır (Wang vd. 2022, Yuan vd. 2021, Zare ve Kagari 2018).

4.2. Dokunmamış Film (non-woven) Separatörlerin Üretim Süreçleri

Dokunmamış film separatörler ıslak serme, kuru serme, eriyik üfleme ve elektroçirime (elektrospinning) teknikleriyle üretilebilmektedir. Belirtilen üretim yöntemleri ile polietilen tereftalat (PET), poliviniliden florür (PVDF) ve kopolimerleri, polivinil alkol (PVA), poliakrilonitril (PAN), poliimid (PI), selüloz ve bunların karışımları gibi çok çeşitli dokunmamış film separatörleri üretmek mümkündür (Bknz Tablo 10). Üretim yöntemi ve kullanılan malzemeye bağlı olarak elde edilen separatörler çok farklı özellikler sergileyebilmektedir. Örneğin; ıslak ve kuru serme yöntemleri ile üretilen separatörler büyük gözenek boyutları (20-50 nm) ve artan kalınlık (100-200 mm) sergilemektedir. Buna karşılık eriyik üfleme ve elektroçirime yöntemlerinde ise mikrometre altı veya nano ölçekte lif çaplarına sahip separatörlerin üretilmesi mümkündür. Yapılan yoğun araştırma ve çalışmaların ardından, büyük ölçekli dokunmamış film separatör üretimi yavaş yavaş olgunlaşmakta ve büyük ölçekli uygulama potansiyeli göstermektedir (Deimede ve Elmasides 2015, Zhang vd. 2021).

Tablo 10. Farklı malzemeler kullanılarak (doğal veya sentetik) üretilen dokunmamış film separatörlere örnekler ve özellikleri.

Malzeme	Metod	Kalınlık (μm)	Gözeneklilik (%)	Islanabilirlik (%)	Mekanik Dayanım (MPa)	Erime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Kaynaklar
Selüloz	Elektroçirime	27	65	280	50	200	Zhang vd., 2013
Selüloz	Islak serme	19	-	-	55	-	Chun vd., 2012
PVDF	Eriyik üfleme	40-160	-	1.148 (maks.)	-	-	Lusio vd., 2021
PVDF	Elektroçirime	-	84,1	400	3,25	161	Liang vd., 2013
PVA	Islak proses	28	62	230	11,5	180	Xiao vd., 2015
PAN	Elektroçirime	25	54	174	32	200	Cho vd., 2008
PAN	Elektroçirime	200	83	-	16,3	-	Zhao vd., 2020
PI	Elektroçirime	40	72,4	250	17,5	180	Miao vd., 2013
PET	Elektroçirime	-	89	500	12	250	Hao vd., 2013
PVDF/PAN	Elektroçirime	-	80	-	18,6	-	Lv vd., 2017

4.2.1. Kuru ve ıslak serme (laid) yöntemi

Kuru serme yöntemi bir film oluşturmak için geçirgen bir konveyör bandına doğru hava yoluyla taşınan tek tek kesikli elyafları içermektedir. Oluşturulan film termal, mekanik veya kimyasal yöntemlerle bağlanabilir. Örneğin, elyafların kimyasal olarak bağlanması, mekanik bütünlük kazandırmak için ağa ıslak bir kimyasal yapıştırıcı (bağlayıcı) eklenmektedir. Islak serme yöntemi ise, kullanılacak elyafların suda süspanse edildiği modifiye bir kağıt yapım sürecidir. Bu yöntemde suyu elyaftan ayırmak için özel kağıt makineleri kullanılır ve bu makineler daha sonra yapıştırılan ve kurutulan tek tip bir malzeme tabakası oluşturur. Yapıştırıcı olarak kullanılan en yaygın malzeme, poliakrilat, stiren-bütadien polimeri vb. gibi çapraz bağlanabilir bir sentetik polimerin su bazlı emülsiyonu veya dispersiyonudur (lateks). Rulo ürün endüstrisinde, dokunmamış filmlerin %5-10'u ıslak serme teknolojisi kullanılarak üretilmektedir (Deimede ve Elmasides 2015, Yu vd., 2023).

Mevcut çalışmalar göstermiştir ki, ıslak ve kuru serme yöntemleri ile imal edilen dokunmamış film separatörler, kısa devre olaylarını önlemede kritik olan yüksek gözenekliliği sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu separatörlerin gözenek boyutları 20 ila 50 mikrometre arasında değişmekte ve kalınlıkları 100 ila 200 mikrometre arasında bulunmaktadır. Bu özellikler, pilin enerji yoğunluğu açısından istenmeyen sonuçlar doğurabilmektedir. Bu durum, Li iyon pil uygulamaları için daha uygun alternatiflerin araştırılmasını zorunlu kılmaktadır (Deimede ve Elmasides 2015, Zhang vd. 2021).

4.2.2. Eriyik üfleme (melt-blown) yöntemi

Kuru proses olan bu yöntemde ilk olarak, eritilmiş polimer, çok sayıda elyaftan oluşan bir polimer ağ oluşturmak için delikleri olan bir düze veya kalıptan ekstrüde edilmektedir. Oluşan lifler gerilir ve yüksek hızlı sıcak hava ile soğutulur.

İkinci adımda ise, elde edilen ağ rulolar halinde toplanır ve daha sonra yeterli mekanik mukavemete sahip dokunmamış filmi oluşturmak için yüksek sıcaklık ve basınçta kalenderleme yoluyla bağlanır.

4.2.3. Elektroeğirme (electrospinning) yöntemi

Dokunmamış seperatörlerin tüm hazırlama yöntemleri arasında elektroeğirme, geniş yüzey alanı ve yüksek gözenekliliğe sahip tamamen birbirine bağlı bir gözenek yapısı oluşturma kapasitesi nedeniyle oldukça dikkat çekmektedir. İşleme parametrelerinin kontrol edilmesiyle, elde edilen elektroeğirme seperatörlere %30-90 aralığında gözenekler ve mikrometre altı ile birkaç mikrometre aralığında gözenek boyutları kazandırılacaktır (Zhang vd. 2015). Tipik bir elektroeğirme düzeneği, yüksek voltajlı bir güç kaynağı, bir şırınga, bir eğirme nozulu ve topraklanmış bir kolektörden oluşmaktadır. Bu işlemde, öncelikle şırıngada bulunan polimer çözeltisi ile topraklanmış toplayıcı arasına yüksek voltaj uygulanmaktadır. Belirli bir voltajda elektrostatik kuvvet nozulün ucundaki polimer çözeltisinin yüzey gerilimini yenmekte ve sıvı jeti oluşarak, püskürtülmektedir. Fışkıran yüklü jetler arasındaki elektrostatik itme, çözücünün buharlaşması ile artar ve jeti birkaç küçük jete bölerek toplayıcıya ulaştırmaktadır. Bu küçük jetler toplayıcıya ulaştığında katılır ve fiberleri oluşturur. Sonuç olarak, fiberler toplayıcı üzerinde biriktirilerek dokunmamış seperatör elde edilmektedir (Lu vd. 2021). Elektroeğirme ile dokunmamış filmler, yüksek gözeneklilik, küçük gözenek boyutu, birbirine bağlı açık gözenek yapısı, yüksek geçirgenlik ve geniş yüzey alanı dahil olmak üzere birçok avantaja sahiptir. Bu yöntem ile tek katmanlı dokunmamış seperatörlerin yanında, çok katmanlı seperatörler de sıralı eğirme yoluyla kolayca üretilebilmektedir. Çok katmanlı seperatörler, çeşitli öncül çözeltilerin ve elyaf katmanlarının üstün özelliklerini birleştirerek en iyi mekanik mukavemeti, yüksek termal kararlılığı ve pil performansını sağlayabilir. Örneğin, PVDF ve PE katmanları tipik olarak batarya güvenliğini artırmak için bir termal kapatma katmanı olarak tasarlanabilmektedir (Babiker vd. 2023).

5. SEPERATÖR PAZARI

5.1. Dünya’da Seperatör Üretimi

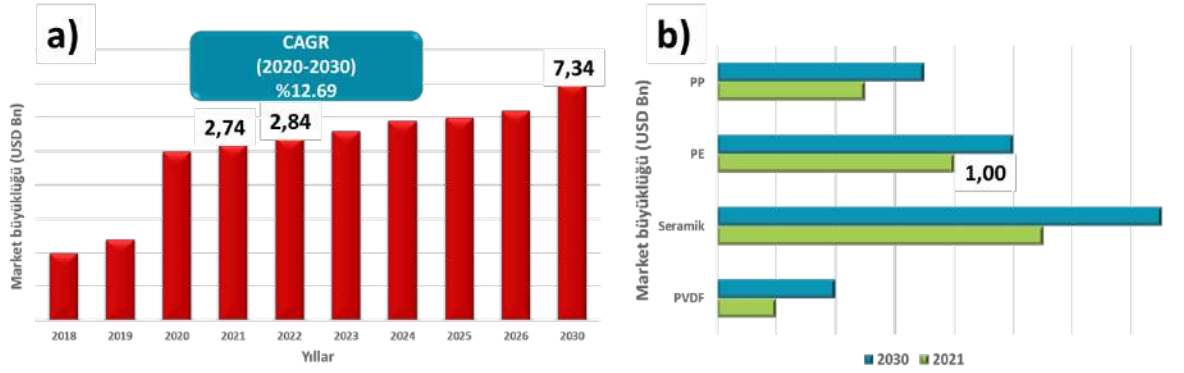
Batarya seperatörleri pazar büyüklüğü 2021 yılında 2,74 milyar ABD doları olarak değerlendirilmiştir. Sektörün 2022 yılında 2,84 milyar ABD doları olan büyüklüğünün 2030 yılına kadar 7,34 milyar ABD dolarına ulaşacağı ve tahmin döneminde (2022-2030) %12,69'luk bir yıllık bileşik büyüme oranı (CAGR) sergileyeceği öngörülmektedir. Tüketici elektroniği, otomotiv ve diğerleri gibi çeşitli son kullanım uygulamaları için bataryalara olan talepteki artış, pazarın büyümesini sağlayabilir. Pazara ait öngörülen birleşik büyüme oranı ve seperatör malzemelerine göre büyüme oranı Şekil 7’ de verilmiştir. Günümüzde LiB için seperatör pazarında Asya Pasifik (Çin, Japonya, Hindistan, Güney Kore, Avustralya, Endonezya ve diğerleri) en büyük payı temsil etmektedir. LiB için seperatör üretiminin yaklaşık %84’ ü Japonya, Çin ve Güney Kore tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu ülkeler aynı zamanda LiB üretimi için kullanılan malzemelerin üretiminde de öncü durumdadırlar. Daha sonra Kuzey Amerika (Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada) ve Avrupa (Almanya, Fransa, Birleşik Krallık, İtalya, İspanya, Rusya ve diğerleri) gelmektedir (Int Kyn 4-7).

Dünya’da seperatör üretiminde önemli firmalar şöyle sıralanabilir;

Japonya	: Toray Industry Inc., Asahi Kasei Corporation, W-Scope Corporation, Ube Corporation, Sumitomo Chemical Co. Ltd., Teijin Limited.
Güney Kore	: SK Innovation Co. Ltd.
A.B.D.	: ENTEK International LLC, Hollingsworth & Vose, B&F Technology.

Tablo 11’ de de verilen seperatör marketini domine eden ilk beş firma ise şöyledir;

- Asahi Kasei Corporation,
- Toray Industry Inc.,
- Sumitomo Chemical Co. Ltd.,
- SK Innovation Co. Ltd.,
- Ube Corporation (Int Kyn 5 ve 6).



Şekil 7. (a) Separatör market büyüklüğünün yıllara göre değişimi ve tahmini bileşik büyüme oranı (CAGR), **(b)** Separatör üretiminde yaygın olarak tercih edilen malzemelerin kullanım oranlarının yıllara göre öngörülen artışı (Int Kyn 4, Int Kyn 5' ten değiştirilerek alınmıştır).

Asya Pasifik bölgesi, hızlı sanayileşme, yükselen tüketici elektroniği pazarları ve yenilenebilir enerjiye yapılan önemli yatırımlarla desteklenen Li-iyon separatör endüstrisi için önemli bir pazar itici güçtür. Çin, Japonya ve Güney Kore gibi ülkeler önde gelen tüketici elektroniği üreticileri ve elektrikli araç (EA) pazarındaki kilit oyuncular. Bu ülkeler sıkı emisyon düzenlemeleri getirdikçe ve elektrikli araçların benimsenmesini teşvik ettikçe, yüksek kaliteli Li-iyon pillere ve dolayısıyla separatörlere olan talep hızla artmaktadır. Ayrıca, yerel hükümetler ve şirketler Ar-Ge'ye büyük yatırımlar yaparak separatör geliştirmeleri de dahil olmak üzere batarya teknolojisinde inovasyonu teşvik etmektedir. Asya Pasifik'in artan tüketici talebi, temiz enerji ve elektrikli mobilitayı destekleyen hükümet politikaları ve teknolojik inovasyondan oluşan benzersiz karışımı, Li-iyon pil separatör pazarının büyümesi için verimli bir zemin oluşturmaktadır (Int Kyn. 4-7).

Tablo 11. Bazı ticari separator üreticileri ve kimyasal bileşimleri.

Üretici	Ülke	Malzeme
Celgard LLC	ABD	PE, PP, PP/PE/PP
Asahi Kasei Chemicals	Japonya	PE, PP ve oksitli yapılar ile modifiye edilmiş polyolefin
Entek Membranes	ABD	PE, PP
SK Energy	Güney Kore	PE
Tonen	Japonya	PE, PE-PP

Dünya genelinde artan gereksinimleri karşılamak için yeni tesisler inşa edilmekte ve mevcut tesisler yenilenmektedir. Bununla birlikte, seramik kaplamalı ve çok katmanlı separatörler de dahil olmak üzere daha güvenli, daha verimli ve uygun maliyetli separatörleri oluşturmak için Ar-Ge'ye yapılan yatırımların hızlanması pazarı önemli ölçüde desteklemektedir. Buna ek olarak, çeşitli endüstriler ve düzenleyici kurumlar tarafından dayatılan sıkı güvenlik ve performans standartlarını karşılamaya yönelik artan odaklanma da pazarı olumlu yönde etkilemektedir. Çevresel kaygıların artmasıyla birlikte şirketler, kullanılan malzemelerden üretim süreçlerine kadar ürünlerini daha sürdürülebilir hale getirmek için çalışmaktadır. Bunun yanı sıra, markalar ürünlerini tüketici elektroniği ve otomotivden endüstriyel ve tıbbi uygulamalara kadar farklı sektörlerin ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde uyarlamaktadır. Ayrıca, kilit oyuncular, potansiyel müşterileri gelişmiş separatör teknolojilerinin faydaları hakkında bilgilendirmek için eğitim kampanyaları, web seminerleri ve düşünce liderliği makaleleri de yürütmektedir (Int Kyn 4-7).

5.2. Türkiye' de Separatör Üretimi

Türkiye'nin gelişmiş pazarlara olan yakınlığı, Asya kökenli batarya üretici firmalar için yatırım olanakları açısından çekici bir hedef haline gelmesini sağlamaktadır. Batarya pazarının henüz olgunlaşmamış olması, Türkiye için potansiyel fırsatlar sunmaktadır. Savunma sanayii alanında son yıllarda kaydedilen gelişmeler ve teknoloji tedarikçilerinin ulaştığı yetkinlik düzeyi, diğer sektörlerin gelişimini de pozitif yönde etkilemektedir. Otomotiv ve tüketici elektroniği sektörlerinin Türkiye'de gelişmiş olması, batarya üretimine başlama sürecinde avantajlar sağlamaktadır. Ülkenin üretim kapasitesinin artması ile birlikte, pil bileşenlerinden separatörlerin yerel üreticiler tarafından üretilebilir hale gelmesi beklenmektedir. Türkiye'nin batarya üretimi konusunda önemli bir merkez olabilmesi için, madencilikten geri dönüşüme, hücre tasarımından anahtar teslim fabrika kurmaya kadar geniş bir yelpazede yetkinlik geliştirmesi gerekmektedir. Ülkenin mevcut sanayi altyapısı ve teknik bilgi seviyesi, bu süreçleri yönetebilecek kapasitededir. Mevcut



endüstrilerde kullanılan makineler, seperatör üretimi için gerekli ekipmanların tasarımı ve üretimi açısından uygun temeller sunmaktadır.

Ülkemizde Birol Plastik PE seperatör üretimini yapmaktadır. RotaLab ise pil ve yakıt hücresi geliştirme, ince film kaplama ve gelişmiş karakterizasyon cihazları ile hizmet vermektedir (Int Kyn 8, Int Kyn 9). Firma bünyesinde seperatör üretiminde yaygın olarak kullanılan daldırarak kaplama, döndürerek kaplama ve püskürterek kaplama ekipmanları mevcuttur. Ayrıca, üniversite ve araştırma kurumları, gelişmiş seperatörlerin geliştirilmesi için hayati önem taşıyan malzeme bilimi ve kimya mühendisliği alanlarında yenilikçi araştırmaların merkezidir. Endüstri ortaklarıyla yapılan işbirlikleri, laboratuvar ölçeğinden endüstriyel ölçekte üretime geçişi hızlandırabilir. Bunun için üniversitelerin ve araştırmacıların desteklenmesi, üniversitelerdeki laboratuvar ve karakterizasyon olanaklarının geliştirilmesi oldukça önemlidir.

6. ÖNERİLER

Bu rapor, Li iyon pillerde kullanılan seperatörlerin önemine ve çeşitli türlerine odaklanarak, bu teknolojinin gelişimindeki kritik rolünü vurgulamaktadır. Seperatörlerin üretim süreçlerine dair detaylı bilgiler sunarak, bu konuda derinlemesine bir anlayış sağlamıştır. Ayrıca, rapor Türkiye'nin bu alandaki gelişim potansiyelini ele alarak, yerel üretimin ve araştırmanın önemine işaret etmektedir. Li iyon pil teknolojisinde seperatörlerin rolünü ve önemini yeniden teyit etmek, bu alandaki yeniliklere ve gelişmelere dikkat çekmek, ve Türkiye'nin bu alandaki ilerlemesinin hem yerel hem de global pazarlar için önemini vurgulamak uygun olacaktır.

Sonuç olarak, Li iyon pillerdeki seperatörler sadece pil performansı ve güvenliği için değil, aynı zamanda sürdürülebilir ve yenilikçi enerji çözümlerine yönelik küresel çabalar için de hayati önem taşımaktadır. Türkiye'nin bu alandaki yatırım ve gelişim çabaları, ülkenin enerji depolama teknolojilerinde daha bağımsız ve rekabetçi bir konuma gelmesini sağlama potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, yerel üretim kapasitelerinin ve Ar-Ge faaliyetlerinin desteklenmesi, Türkiye'nin bu hızla gelişen sektörde önemli bir oyuncu olmasına yardımcı olabilir. Bu rapor, bu kritik teknolojinin anlaşılması ve geliştirilmesinde bir rehber olarak hizmet etmekte olup, ileriye dönük araştırmalar ve uygulamalar için bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

KAYNAKLAR

- An, M. Y., Kim, H. T., & Chang, D. R. (2014). Multilayered separator based on porous polyethylene layer, Al₂O₃ layer, and electrospun PVdF nanofiber layer for lithium batteries. *Journal of solid state electrochemistry*, 18, 1807-1814
- Arora, P., & Zhang, Z. 2004. Battery separators. *Chemical reviews*, 104(10), 4419-4462.
- Babiker, D. M., Usha, Z. R., Wan, C., Hassaan, M. M. E., Chen, X., & Li, L. (2023). Recent progress of composite polyethylene separators for lithium/sodium batteries. *Journal of Power Sources*, 564, 232853.
- Cai, M., Yuan, D., Zhang, X., Pu, Y., Liu, X., He, H., ... & Ning, X. (2020). Lithium ion battery separator with improved performance via side-by-side bicomponent electrospinning of PVDF-HFP/PI followed by 3D thermal crosslinking. *Journal of Power Sources*, 461, 228123.
- Chao, C. Y., Feng, Y. F., Hua, K., Li, H., Wu, L. J., Zhou, Y. S., & Dong, Z. W. (2018). Enhanced wettability and thermal stability of polypropylene separators by organic-inorganic coating layer for lithium-ion batteries. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(28), 46478.
- Chen, W., Liu, Y., Ma, Y., Liu, J., & Liu, X. (2014). Improved performance of PVdF-HFP/PI nanofiber membrane for lithium ion battery separator prepared by a bicomponent cross-electrospinning method. *Materials Letters*, 133, 67-70.
- Chen, Z., Danilov, D. L., Eichel, R.-A., Notten, P. H. L., 2022. Porous Electrode Modeling and its Applications to Li-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials*, 12, 2201506.
- Cho, T. H., Tanaka, M., Onishi, H., Kondo, Y., Nakamura, T., Yamazaki, H., ... & Sakai, T. (2008). Battery performances and thermal stability of polyacrylonitrile nano-fiber-based nonwoven separators for Li-ion battery. *Journal of Power Sources*, 181(1), 155-160.
- Chun, S. J., Choi, E. S., Lee, E. H., Kim, J. H., Lee, S. Y., & Lee, S. Y. (2012). Eco-friendly cellulose nanofiber paper-derived separator membranes featuring tunable nanoporous network channels for lithium-ion batteries. *Journal of Materials Chemistry*, 22(32), 16618-16626.



- Costa, C. M., Lee, Y. H., Kim, J. H., Lee, S. Y., & Lanceros-Méndez, S., 2019. Recent advances on separator membranes for lithium-ion battery applications: From porous membranes to solid electrolytes. *Energy Storage Materials*, 22, 346-375.
- Deimede, V., & Elmasides, C. (2015). Separators for lithium-ion batteries: a review on the production processes and recent developments. *Energy technology*, 3(5), 453-468.
- DeMeuse, M. T., 2021. *Polymer-based separators for Lithium-ion batteries: production, processing, and properties*. Elsevier.
- Dong, G., Liu, B., Kong, L., Wang, Y., Tian, G., Qi, S., & Wu, D. (2019). Neoteric polyimide nanofiber encapsulated by the TiO₂ armor as the tough, highly wettable, and flame-retardant separator for advanced lithium-ion batteries. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(21), 17643-17652.
- Dong, G., Liu, B., Sun, G., Tian, G., Qi, S., & Wu, D. (2019). TiO₂ nanoshell@ polyimide nanofiber membrane prepared via a surface-alkaline-etching and in-situ complexation-hydrolysis strategy for advanced and safe LIB separator. *Journal of Membrane Science*, 577, 249-257.
- Fang, C., Yang, S., Zhao, X., Du, P., & Xiong, J. (2016). Electrospun montmorillonite modified poly (vinylidene fluoride) nanocomposite separators for lithium-ion batteries. *Materials Research Bulletin*, 79, 1-7.
- Fei, H., Liu, Y., An, Y., Xu, X., Zhang, J., Xi, B., ... & Feng, J. (2019). Safe all-solid-state potassium batteries with three dimensional, flexible and binder-free metal sulfide array electrode. *Journal of Power Sources*, 433, 226697.
- Foreman, E., Zakri, W., Hossein Sanatimoghaddam, M., Modjtahedi, A., Pathak, S., Kashkooli, A. G., ... & Farhad, S., 2017. A review of inactive materials and components of flexible lithium-ion batteries. *Advanced Sustainable Systems*, 1(11), 1700061.
- Fu, G., Soucek, M. D., & Kyu, T. (2018). Fully flexible lithium ion battery based on a flame retardant, solid-state polymer electrolyte membrane. *Solid State Ionics*, 320, 310-315.
- Fu, Q., Lin, G., Chen, X., Yu, Z., Yang, R., Li, M., ... & Chen, J. (2018). Mechanically reinforced PVdF/PMMA/SiO₂ composite membrane and its electrochemical properties as a separator in lithium-ion batteries. *Energy Technology*, 6(1), 144-152.
- Hao, J., Lei, G., Li, Z., Wu, L., Xiao, Q., & Wang, L. (2013). A novel polyethylene terephthalate nonwoven separator based on electrospinning technique for lithium ion battery. *Journal of Membrane Science*, 428, 11-16.
- Jang, J., Oh, J., Jeong, H., Kang, W., & Jo, C., 2020. A review of functional separators for lithium metal battery applications. *Materials*, 13(20), 4625.
- Jeong, H. S., Hong, S. C., & Lee, S. Y. (2010). Effect of microporous structure on thermal shrinkage and electrochemical performance of Al₂O₃/poly (vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) composite separators for lithium-ion batteries. *Journal of Membrane Science*, 364(1-2), 177-182.
- Kim, Y., Lee, W. Y., Kim, K. J., Yu, J. S., & Kim, Y. J. (2016). Shutdown-functionalized nonwoven separator with improved thermal and electrochemical properties for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 305, 225-232.
- Landesfeind, J., Hattendorff, J., Ehrl, A., Wall, W. A., & Gasteiger, H. A., 2016. Tortuosity determination of battery electrodes and separators by impedance spectroscopy. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(7), A1373.
- Lee, H., Yanilmaz, M., Toprakci, O., Fu, K., & Zhang, X., 2014. A review of recent developments in membrane separators for rechargeable lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 7(12), 3857-3886.
- Lee, Y., Park, J., Jeon, H., Yeon, D., Kim, B. H., Cho, K. Y., ... & Lee, Y. M. (2016). In-depth correlation of separator pore structure and electrochemical performance in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 325, 732-738.
- Li, H., Chen, Y. M., Ma, X. T., Shi, J. L., Zhu, B. K., & Zhu, L. P. (2011). Gel polymer electrolytes based on active PVDF separator for lithium ion battery. I: Preparation and property of PVDF/poly (dimethylsiloxane) blending membrane. *Journal of membrane science*, 379(1-2), 397-402.
- Li, X., Zhang, M., He, J., Wu, D., Meng, J., & Ni, P. (2014). Effects of fluorinated SiO₂ nanoparticles on the thermal and electrochemical properties of PP nonwoven/PVdF-HFP composite separator for Li-ion batteries. *Journal of membrane science*, 455, 368-374.
- Li, Y., Yu, L., Hu, W., & Hu, X. (2020). Thermotolerant separators for safe lithium-ion batteries under extreme conditions. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(39), 20294-20317.
- Li, Z., Li, C., Wang, X., Peng, C., Cai, Y., & Huang, W. (2018). A hybrid system dynamics and optimization approach for supporting sustainable water resources planning in Zhengzhou City, China. *Journal of Hydrology*, 556, 50-60.
- Li, Z., Xiong, Y., Sun, S., Zhang, L., Li, S., Liu, X., ... & Xu, S. (2018). Tri-layer nonwoven membrane with shutdown property and high robustness as a high-safety lithium ion battery separator. *Journal of membrane science*, 565, 50-60.
- Liang, Y., Cheng, S., Zhao, J., Zhang, C., Sun, S., Zhou, N., ... & Zhang, X. (2013). Heat treatment of electrospun Polyvinylidene fluoride fibrous membrane separators for rechargeable lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 240, 204-211.



- Liang, Z., Zhao, Y., & Li, Y. (2019). Electrospun core-shell nanofiber as separator for lithium-ion batteries with high performance and improved safety. *Energies*, 12(17), 3391.
- Lingappan, N., Lee, W., Passerini, S., & Pecht, M. (2023). A comprehensive review of separator membranes in lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113726.
- Liu, F., & Chuan, X., 2021. Recent developments in natural mineral-based separators for lithium-ion batteries. *RSC advances*, 11(27), 16633-16644.
- Liu, J., He, C., He, J., Cui, J., Liu, H., & Wu, X. (2017). An enhanced poly (vinylidene fluoride) matrix separator with high density polyethylene for good performance lithium ion batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 21, 919-925.
- Luiso, S., Henry, J. J., Pourdeyhimi, B., & Fedkiw, P. S. (2021). Meltblown polyvinylidene difluoride as a Li-ion battery separator. *ACS Applied Polymer Materials*, 3(6), 3038-3048.
- Luo, W., Cheng, S., Wu, M., Zhang, X., Yang, D., & Rui, X. (2021). A review of advanced separators for rechargeable batteries. *Journal of Power Sources*, 509, 230372.
- Lv, R., Zhu, Y., Liu, H., Na, B., Huang, Y., & Xie, X. (2017). Poly (vinylidene fluoride)/poly (acrylonitrile) blend fibrous membranes by centrifugal spinning for high-performance lithium ion battery separators. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(8).
- Miao, Y. E., Zhu, G. N., Hou, H., Xia, Y. Y., & Liu, T. (2013). Electrospun polyimide nanofiber-based nonwoven separators for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 226, 82-86.
- Mun, S. C., & Won, J. H. (2021). Manufacturing Processes of Microporous Polyolefin Separators for Lithium-Ion Batteries and Correlations between Mechanical and Physical Properties. *Crystals*, 11(9), 1013. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/cryst11091013>
- Pan, J. L., Zhang, Z., Zhang, H., Zhu, P. P., Wei, J. C., Cai, J. X., ... & Yang, Z. Y. (2018). Ultrathin and strong electrospun porous fiber separator. *ACS Applied Energy Materials*, 1(9), 4794-4803.
- Park, S., Son, C. W., Lee, S., Kim, D. Y., Park, C., Eom, K. S., ... & Jo, S. M. (2016). Multicore-shell nanofiber architecture of polyimide/polyvinylidene fluoride blend for thermal and long-term stability of lithium ion battery separator. *Scientific reports*, 6(1), 36977.
- Shen, X., Li, C., Shi, C., Yang, C., Deng, L., Zhang, W., ... & Zhao, J. (2018). Core-shell structured ceramic nonwoven separators by atomic layer deposition for safe lithium-ion batteries. *Applied Surface Science*, 441, 165-173.
- Shayapat, J., Chung, O. H., & Park, J. S. (2015). Electrospun polyimide-composite separator for lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 170, 110-121.
- Shi, C., Zhang, P., Huang, S., He, X., Yang, P., Wu, D., ... & Zhao, J. (2015). Functional separator consisted of polyimide nonwoven fabrics and polyethylene coating layer for lithium-ion batteries. *Journal of power sources*, 298, 158-165.
- Tanjia, H. (2009). Secondary batteries – lithium rechargeable systems – lithium-ion separators, in: J. Garche, C.K. Dyer, P.T. Moseley, Z. Ogumi, D.A.J. Rand, B. Scrosati (Eds.), *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Elsevier Science Publishers, New York, pp. 356–367.
- Tong, B., & Li, X. (2024). Towards separator safety of lithium-ion batteries: a review. *Materials Chemistry Frontiers*.
- Wang, D., Mei, Y., & Huang, G. (2018). Printable inorganic nanomaterials for flexible transparent electrodes: from synthesis to application. *Journal of Semiconductors*, 39(1), 011002.
- Wang, E., Chiu, C. H., & Chou, P. H. (2020). Safety assessment of polyolefin and nonwoven separators used in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 461, 228148.
- Wang, F., Ke, X., Shen, K., Zhu, L., & Yuan, C. (2022). A Critical Review on Materials and Fabrications of Thermally Stable Separators for Lithium-Ion Batteries. *Advanced Materials Technologies*, 7(5), 2100772.
- Wang, L., Deng, N., Ju, J., Wang, G., Cheng, B., & Kang, W. (2019). A novel core-shell structured poly-m-phenyleneisophthalamide@polyvinylidene fluoride nanofiber membrane for lithium ion batteries with high-safety and stable electrochemical performance. *Electrochimica Acta*, 300, 263-273.
- Wang, M., Chen, X., Wang, H., Wu, H., Jin, X., & Huang, C. (2017). Improved performances of lithium-ion batteries with a separator based on inorganic fibers. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(1), 311-318.
- Wang, Z., Guo, F., Chen, C., Shi, L., Yuan, S., Sun, L., & Zhu, J. (2015). Self-assembly of PEI/SiO₂ on polyethylene separators for Li-ion batteries with enhanced rate capability. *ACS applied materials & interfaces*, 7(5), 3314-3322.
- Waqas, M., Ali, S., Lv, W., Chen, D., Boateng, B., & He, W. (2019). High-performance PE-BN/PVDF-HFP bilayer separator for lithium-ion batteries. *Advanced Materials Interfaces*, 6(1), 1801330.



- Wei, Z., Gu, J., Zhang, F., Pan, Z., & Zhao, Y. (2020). Core-shell structured nanofibers for lithium ion battery separator with wide shutdown temperature window and stable electrochemical performance. *ACS Applied Polymer Materials*, 2(5), 1989-1996.
- Wu, D., Shi, C., Huang, S., Qiu, X., Wang, H., Zhan, Z., ... & Lin, L. (2015). Electrospun nanofibers for sandwiched polyimide/poly(vinylidene fluoride)/polyimide separators with the thermal shutdown function. *Electrochimica Acta*, 176, 727-734.
- Xiang, Y., Zhu, W., Qiu, W., Guo, W., Lei, J., Liu, D., ... & Li, J. (2018). SnO₂ functionalized polyethylene separator with enhanced thermal stability for high performance lithium ion battery. *ChemistrySelect*, 3(3), 911-916.
- Xiao, W., Zhao, L., Gong, Y., Liu, J., & Yan, C. (2015). Preparation and performance of poly(vinyl alcohol) porous separator for lithium-ion batteries. *Journal of Membrane Science*, 487, 221-228.
- Xing, J., Li, J., Fan, W., Zhao, T., Chen, X., Li, H., ... & Zhao, Y. (2022). A review on nanofibrous separators towards enhanced mechanical properties for lithium-ion batteries. *Composites Part B: Engineering*, 110105.
- Xu, Q., Wei, C., Fan, L., Peng, S., Xu, W., & Xu, J. (2017). A bacterial cellulose/Al₂O₃ nanofibrous composite membrane for a lithium-ion battery separator. *Cellulose*, 24, 1889-1899.
- Yang, B., Wang, L., Zhang, M., Li, W., Zhou, Q., & Zhong, L., 2021. Advanced separators based on aramid nanofiber (ANF) membranes for lithium-ion batteries: a review of recent progress. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(22), 12923-12946.
- Yang, M., & Hou, J. (2012). Membranes in Lithium Ion Batteries. *Membranes*, 2(3), 367-383. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/membranes2030367>
- Yoo, Y., Kim, B. G., Pak, K., Han, S. J., Song, H. S., Choi, J. W., & Im, S. G. (2015). Initiated chemical vapor deposition (iCVD) of highly cross-linked polymer films for advanced lithium-ion battery separators. *ACS applied materials & interfaces*, 7(33), 18849-18855.
- Yu, Y., Liu, M., Chen, Z., Zhang, Z., Qiu, T., Hu, Z., ... & Zhu, M. (2023). Advances in Nonwoven-Based Separators for Lithium-Ion Batteries. *Advanced Fiber Materials*, 5(6), 1827-1851.
- Yuan, B., Wen, K., Chen, D., Liu, Y., Dong, Y., Feng, C., ... & He, W. (2021). Composite separators for robust high rate lithium ion batteries. *Advanced Functional Materials*, 31(32), 2101420.
- Zainab, G., Wang, X., Yu, J., Zhai, Y., Babar, A. A., Xiao, K., & Ding, B. (2016). Electrospun polyacrylonitrile/polyurethane composite nanofibrous separator with electrochemical performance for high power lithium ion batteries. *Materials Chemistry and Physics*, 182, 308-314.
- Zare, S., & Kargari, A. (2018). Membrane properties in membrane distillation. In *Emerging Technologies for Sustainable Desalination Handbook* (pp. 107-156). Butterworth-Heinemann.
- Zhai, Y., Xiao, K., Yu, J., & Ding, B. (2016). Closely packed x-poly(ethylene glycol diacrylate) coated polyetherimide/poly(vinylidene fluoride) fiber separators for lithium ion batteries with enhanced thermostability and improved electrolyte wettability. *Journal of Power Sources*, 325, 292-300.
- Zhai, Y., Wang, N., Mao, X., Si, Y., Yu, J., Al-Deyab, S. S., ... & Ding, B. (2014). Sandwich-structured PVdF/PMIA/PVdF nanofibrous separators with robust mechanical strength and thermal stability for lithium ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(35), 14511-14518.
- Zhang, H., Zhou, M. Y., Lin, C. E., & Zhu, B. K. (2015). Progress in polymeric separators for lithium ion batteries. *RSC advances*, 5(109), 89848-89860.
- Zhang, J., Liu, Z., Kong, Q., Zhang, C., Pang, S., Yue, L., ... & Cui, G. (2013). Renewable and superior thermal-resistant cellulose-based composite nonwoven as lithium-ion battery separator. *ACS applied materials & interfaces*, 5(1), 128-134.
- Zhang, J., Xiang, Y., Jamil, M. I., Lu, J., Zhang, Q., Zhan, X., & Chen, F. (2018). Polymers/zeolite nanocomposite membranes with enhanced thermal and electrochemical performances for lithium-ion batteries. *Journal of Membrane Science*, 564, 753-761.
- Zhang, L., Li, X., Yang, M., & Chen, W. (2021). High-safety separators for lithium-ion batteries and sodium-ion batteries: advances and perspective. *Energy Storage Materials*, 41, 522-545.
- Zhao, H., Deng, N., Kang, W., Li, Z., Wang, G., & Cheng, B. (2020). Highly multiscale structural Poly(vinylidene fluoride)hexafluoropropylene/poly-m-phenyleneisophthalamide separator with enhanced interface compatibility and uniform lithium-ion flux distribution for dendrite-proof lithium-metal batteries. *Energy Storage Materials*, 26, 334-348
- Zhao, X., Zhang, Z., Yang, S., & Liang, G. (2017). Inorganic ceramic fiber separator for electrochemical and safety performance improvement of lithium-ion batteries. *Ceramics International*, 43(17), 14775-14783.
- Zheng, J., Zhao, Y., Feng, X., Chen, W., & Zhao, Y. (2018). Novel safer phosphonate-based gel polymer electrolytes for sodium-ion batteries with excellent cycling performance. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(15), 6559-6564.
- Zhu X., Jiang, X., Ai, X., Yang, H., Cao, Y., 2016. TiO₂ ceramic-grafted polyethylene separators for enhanced thermostability and electrochemical performance of lithium-ion batteries. *Journal of Membrane Science*, 504, 97-103.



Zhu, Y., Yin, M., Liu, H., Na, B., Lv, R., Wang, B., & Huang, Y. (2017). Modification and characterization of electrospun poly (vinylidene fluoride)/poly (acrylonitrile) blend separator membranes. *Composites Part B: Engineering*, 112, 31-37.

İnternet Kaynakları

- [1] https://uscar.org/wpfd_file/lithium-battery-separator-goals/, 14.12.23.
- [2] <https://www.celgard.com/product-data>, 14.12.23.
- [3] <https://entek.wpenginepowered.com/wp-content/uploads/2021/05/Lithium-Prod-Portfolio-21-04-23.pdf>, 29.03.24.
- [4] <https://www.marketresearchfuture.com/reports/battery-separator-market-7833>, 14.12.23.
- [5] <https://www.imarcgroup.com/lithium-ion-battery-separator-market>, 14.12.23.
- [6] <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/lithium-ion-battery-separator-market>, 14.12.23.
- [7] <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-battery-separator-market>, 14.12.23.
- [8] <https://www.biolplastik.com.tr/>, 14.12.23.
- [9] <http://www.rotalab.com/tr/kurumsal/hakkimizda.html>, 14.12.23.



ELEKTROLİTLER

M. A. Zabara¹, B. Yarar Kaplan¹, K. B. Dermenci², A. L. Demirel³, S. Alkan Gürsel^{1,4}, A. Yürüm^{1,4}[+]

ÖZET

Dünyada sürdürülebilir enerjiye geçişi hızlandırmak için elektrikli araçların teşvik edilmesiyle artan enerji depolama ihtiyacını karşılamak üzere; bataryanın önemli bileşenleri arasında yer alan Li iyon elektrolit malzemelerinin sürdürülebilir, ekonomik, çevreci teknolojiler ile birleştirilerek araştırılması ve elde edilen verilerin mevcut batarya teknolojilerine entegre edilerek uzun ömürlü, elektrokimyasal ve termal kararlı, yüksek iyonik iletkenliğe sahip ve güvenli malzemeleri geliştirmek büyük önem taşımaktadır.

Artmakta olan enerji depolama ihtiyacı, elektrikli araçların yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edilmesiyle birlikte küresel talebi artırmaktadır. Bu durum, Li iyon elektrolitler için büyük bir pazar potansiyeli oluşturmaktadır. Çevresel kaygılar ve sürdürülebilirlik konusunda artan farkındalık, geleneksel organik çözücülerin yerine daha güvenli ve çevre dostu yeni nesil elektrolitlerin geliştirilmesini teşvik etmektedir. Li iyon elektrolit araştırmaları, nanoteknoloji, malzeme bilimi ve kimya gibi disiplinlerdeki gelişmelerden de yararlanmaktadır. Bu, yeni nesil elektrolitlerin performansında önemli bir ilerleme potansiyeli sunmaktadır. Dünyanın önde gelen şirketleri, Li-iyon batarya teknolojilerinin geliştirilmesine ve üretiminin artırılmasına yönelik önemli yatırımlar yapmaktadır. Bu, Li iyon elektrolitler için de önemli bir destek anlamına gelmektedir.

Türkiye'de Li iyon elektrolit bileşenleri üretilmesi de elektrolit bileşenlerinin sentezinde kullanılan temel petrokimyasal hammaddeler büyük ölçekte üretilmektedir. Bu hammaddelere sahip bir ülke olmak yerli üretim için önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Ayrıca, Türkiye'de üniversiteler ve araştırma kuruluşları Li iyon pil teknolojileri üzerinde çalışmalar yürütmektedir. Bu çalışmalar, yeni nesil Li iyon elektrolitlerin geliştirilmesine de katkıda bulunma potansiyeline sahiptir. Türkiye'deki otomotiv ve pil üreticileri, Li iyon elektrolit teknolojileri geliştiren şirketlerle ve araştırma kuruluşları işbirliği yaparak rekabet güçlerini artırabilirler.

Sonuç olarak, Li iyon elektrolitleri geleceğin enerji teknolojilerinin temel unsurlarından biridir. Dünyada ve Türkiye'de artan enerji depolama ihtiyacı, sürdürülebilirlik trendleri ve teknolojik gelişmeler, Li iyon elektrolitler için büyük bir potansiyel yaratmaktadır. Ülkemiz üniversite ve araştırma kurumlarında yeterli bilgi birikimine sahip bilim insanları mevcut olmakla birlikte yeni elektrolit geliştirme ve karakterizasyonuna yönelik yeterli alt yapı mevcut değildir. Türkiye, hammadde kaynakları, araştırma ve geliştirme potansiyeli, sanayi iş birliği fırsatları ve devlet teşvikleri ile bu potansiyelden yararlanmak için önemli avantajlara sahiptir. Bu alandaki yatırımların artırılması ve üniversiteler, sanayi kuruluşları ve kamu kuruluşları arasındaki iş birliğinin geliştirilmesi, Türkiye'nin Li iyon elektrolit teknolojilerinde yer almasını sağlayabilir.

[+] alp.yurum@sabanciuniv.edu

1 Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi, Orta Mah. Üniversite Cad. No: 27/1, Tuzla, 34956 İstanbul.

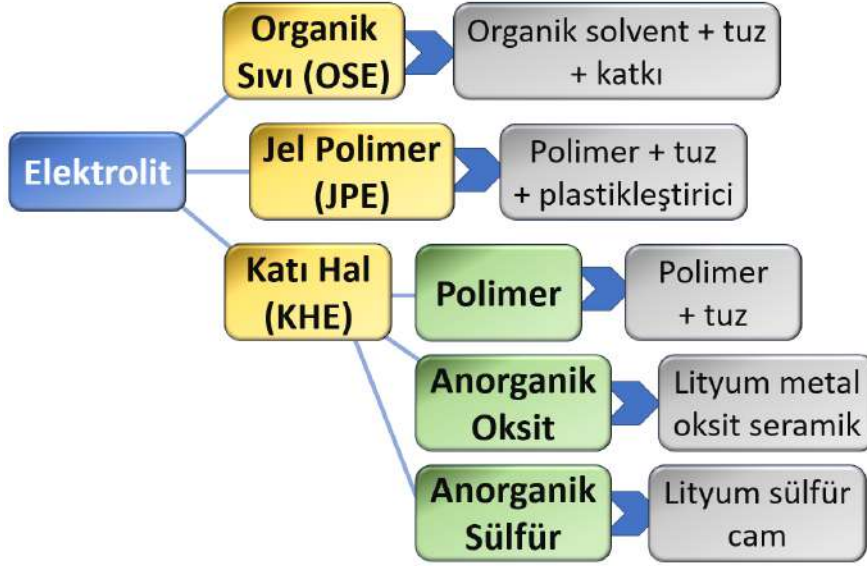
2 Vrije Universiteit VUB Main Campus Etterbeek Pleinlaan 2, Elsene, 1050 Brussel, Belgium.

3 Koç Üniversitesi, Rumelifeneri Yolu, Sarıyer, 34450 İstanbul, Türkiye

4 Sabancı Üniversitesi, Orta Mah. Üniversite Cad. No: 27/1 Tuzla, 34956 İstanbul.

1. GİRİŞ

Li iyon pillerin temel işleyişinde elektrolitler hayati bir rol oynar. Bu özel sıvılar, lityum iyonlarının, şarj sırasında, pilin katodundan anoda akışını sağlayan bir ortam görevi görür. Elektrolitler üç ana kategoriye ayrılır: organik sıvı (OSE), jel (JPE) ve katı (KHE) (Şekil 1). Ticari olarak kullanılan pillerin çoğunda, lityum hekzaflorofosfat (LiPF_6) gibi bir lityum tuzu, etilen karbonat (EC) ve dimetil karbonat (DMC) karışımı gibi organik çözücülerde çözünmüş olarak bulunan organik elektrolitler kullanılır. Bu tür elektrolitler yüksek iyonik iletkenlik ve nispeten düşük maliyet gibi avantajlara sahip olsa da, yanıcılık ve çevresel dezavantajları da beraberinde getirmektedir.

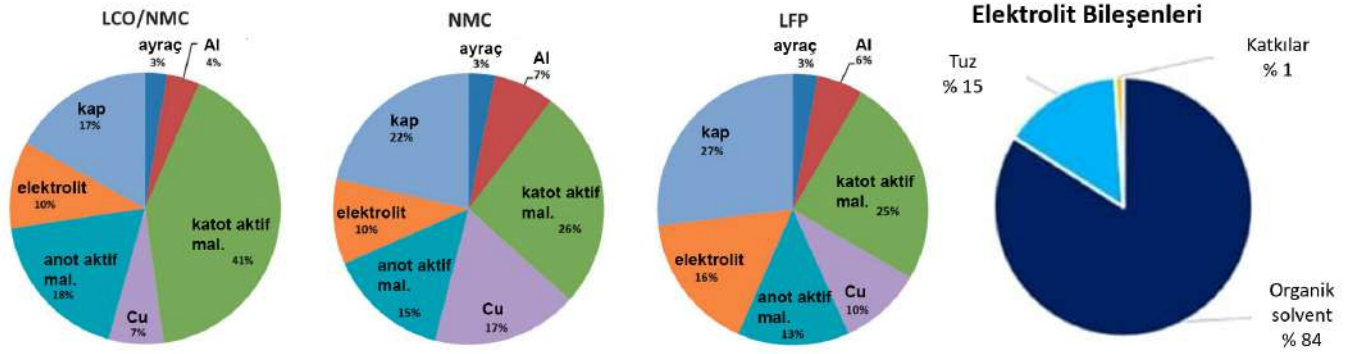


Şekil 1. Elektrolitlerin genel sınıflandırması (Gri kutular genel içeriği vermektedir. KHE altında polimer ve anorganik elektrolitler birleştirilerek hibritler de elde edilebilmektedir)

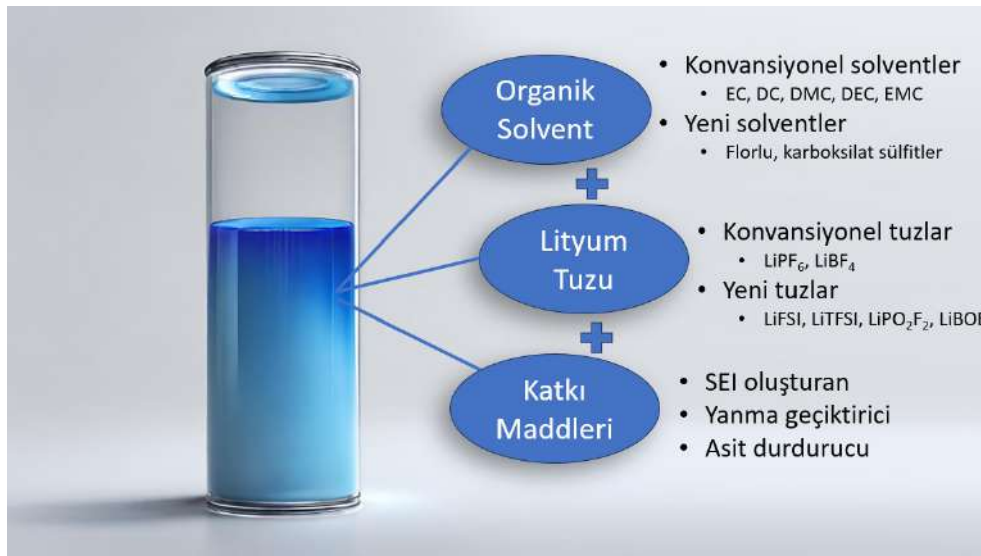
Geleneksel organik elektrolitler, Li-iyon pillerinde yaygın olarak kullanılan bileşenlerdir ve pilin kütlege yaklaşık %10-16'sını oluşturmaktadır (Şekil 2) (Jephcott, 2023). Bu elektrolitler çeşitli avantajlara sahiptir. İlk olarak, organik elektrolitler iyi bir iletkenlik özelliğine sahiptir, bu da lityum iyonlarının piller içinde hızlı ve etkili bir şekilde hareket etmesini sağlar. Ayrıca, organik elektrolitler, diğer pillerle göre, geniş bir elektrokimyasal pencereye sahiptir, yani pilin çalışma gerilim aralığını genişletir (<4,5 V, saf su için bu değer <1,23 V) ve yüksek enerji yoğunluğu (hücre bazında ~220 W-sa/kg) sağlar. Yüksek iletkenlikleri hücredeki iç direnci azaltmasını sağlayarak bataryanın hızlı şarj/deşarj edilmesine olanak tanır. Bu avantajların yanı sıra organik elektrolitlerin bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, yanıcı ve patlayıcı olma riski taşırlar ki bu özellik bataryalarda güvenlik endişeleri doğurabilir. Ayrıca, organik elektrolitler zamanla bozulabilir ve bu durum batarya ömrünün kısılmasına yol açabilir. Bunun yanı sıra, zamanla kararlılığın azalması gibi bazı sorunlar da ortaya çıkabilir. Bu nedenle, araştırmacılar daha güvenli, kararlı ve yüksek performanslı elektrolit malzemeleri geliştirmek için çalışmaktadır.

Li iyon pillerinde, organik elektrolitler genellikle lityum tuzları ve organik çözücüler kullanılarak oluşturulur. Örneğin, yaygın olarak kullanılan lityum tuzları arasında lityum perklorat (LiClO_4), lityum hekzaflorofosfat (LiPF_6), lityum hekzaflorarsenat (LiAsF_6), lityum borofluorür (LiBF_4) ve lityum asetat ($\text{LiC}_2\text{H}_3\text{O}_2$) bulunur. Bu tuzlar, lityum iyonlarının iletimini sağlamak için çözücülerde çözünürler (Şekil 3).

Li iyon pil elektrolitlerine katkı maddeleri eklemek, pilin performansını ve ömrünü önemli ölçüde artırmak için kritik öneme sahiptir. Katkı maddeleri farklı işlevlere sahiptir: elektrokimyasal kararlılığı arttırmak, ikincil reaksiyonlara karşı pasifleşme filmini güçlendirmek, şarj vedeşarj sürelerini iyileştirmek, aşırı ısınmayı engellemek ve termal kararlılığı arttırmak olarak sıralanabilir. Bu nedenle, katkı maddeleri pil performansının optimizasyonu ve güvenilirliğinin sağlanması için vazgeçilmez bir bileşendir.



Şekil 2. Sıvı elektrolitli bir lityum iyon pilin kütlece bileşenleri (Jephcott 2023, Golubkov vd. 2014)



Şekil 3. Sıvı elektrolit bileşenleri

Geleneksel jel elektrolitler, Li-iyon pillerinde yaygın olarak kullanılan başka bir bileşendir ve pazarda Li-polimer piller olarak bilinirler. Organik elektrolitlerle karşılaştırıldığında bazı farklı özelliklere sahiptir. Jel elektrolitler, organik çözücüler ve polimerik elektrolit katkı maddelerinin bir kombinasyonunu içerir (Baskoro vd. 2019) (Tablo 1). Bu kombinasyon, elektroliti jel kıvamına getirir ve pilde daha yüksek mekanik dayanıklılık sağlar. Jel elektrolitlerin avantajlarından biri, organik elektrolitlere kıyasla daha düşük buharlaşma eğilimine sahip olmalarıdır. Organik elektrolitlerin 55 °C üstünde kullanılması riskliken, jel elektrolitlerde bu sıcaklık 100 °C'ye kadar çıkmaktadır (Wang vd. 2021). Bu, pilin daha uzun bir kullanım ömrüne sahip olmasını sağlar. Ayrıca, jel elektrolitlerin yüksek viskoziteye sahip olmaları, elektrolit akışını azaltır ve pilin termal kararlılığını artırır. Bununla birlikte, jel elektrolitlerin düşük iletkenlik özelliği pilin performansını etkileyebilir. Organik elektrolitlere kıyasla daha yüksek bir iç dirence sahiptirler. Ayrıca, jel elektrolitlerin sentezi daha karmaşık olabilir ve maliyetli olabilir. Bu nedende, organik elektrolitlerle karşılaştırıldığında, jel elektrolitlerin avantajları ve dezavantajları arasında bir denge sağlamak önemlidir ve pil tasarımında tercih edilen özelliklere bağlı olarak kullanılabilirler.

Tablo 1. Jel elektrolit bileşenleri

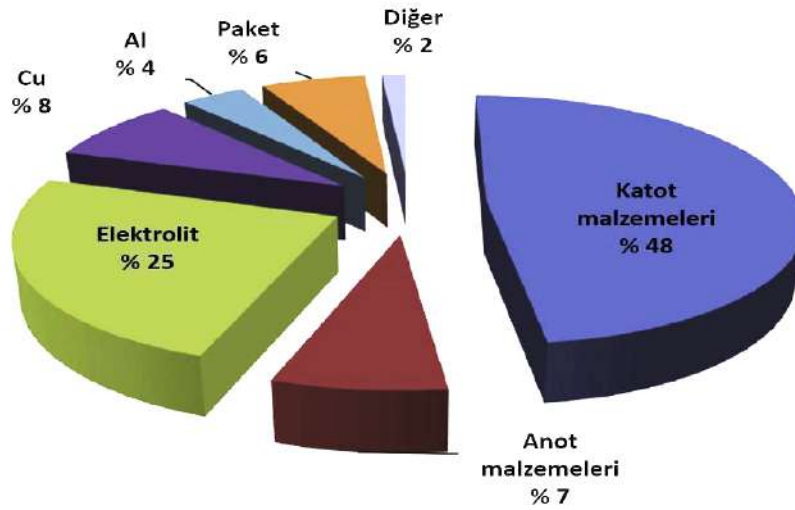
Tuz	Polimer	Plastikleştirici
LiPF ₆ (Lityum hekzaflorofosfat)	PEO (Poliäten oksit)	EC (Etilen karbonat)
LiTFSI (Lityum bis(triflorometansülfonil)imid)	PAN (Poliakrilonitril)	DMC (Dimetil karbonat)
LiBOB (Lityum bis(oksالاتo)borat)	PVDF (Polivinilidenflorit)	PC (Propilen karbonat)
LiFSI (Lityum bis(florosülfonil)imid)	PMMA (Polimetil metakrilat)	EMC (Metil etil karbonat)
LiClO ₄ (Lityum perklorat)	PVDF-HFP (Polivinilidenflorit-hekza florpropilen)	DEC (Dietyl karbonat)
LiAsF ₆ (Lityum hekzafloraarsenat)		
LiBF ₄ (Lityum borofluorür)		
LiC ₂ H ₃ O ₂ (Lityum asetat)		

Organik sıvı ve jel elektrolitler de bazı zorlukları beraberinde getiriyor. Sıvı elektrolitlerin yanıcılığı ve patlama potansiyeli güvenlik endişelerini körüklerken, jel elektrolitler güvenliği artırsa da daha düşük iletkenlik nedeniyle pil performansını düşürebiliyor. Bununla beraber, pil araştırmaları sürekli devam etmektedir. LG Chem gibi şirketler, güvenliği korurken pil performansını artırmak için jel elektrolitlerin iletkenliğini yükseltmeye odaklanıyor.

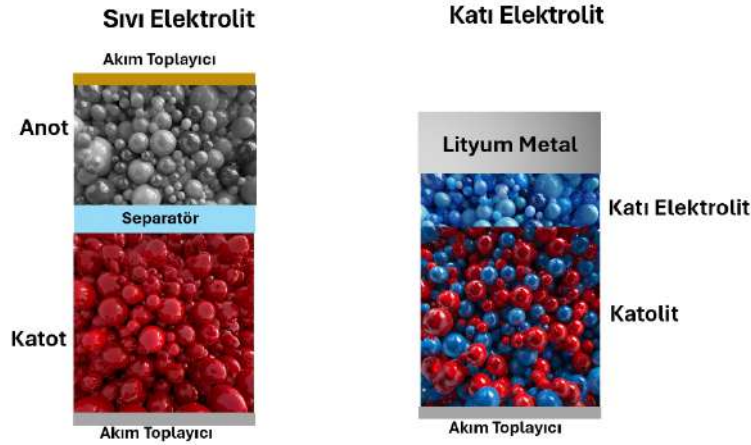
Li iyon pillerin enerji depolama teknolojilerinde giderek artan önemi ile birlikte, pil güvenliği ve enerji yoğunluğu çok önemli konular haline gelmiştir. Geleneksel Li iyon pillerde kullanılan sıvı elektrolitlerin yanıcılık riski ve sınırlı termal kararlılığı, güvenlik açısından endişeler yaratmaktadır. Bu nedenle, daha güvenli ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip piller geliştirmek için alternatif çözümler aranmaktadır. Bu noktada, katı elektrolitler önemli bir potansiyel ortaya koymaktadır. **Katı elektrolitler**, duruma göre yüksek iyonik iletkenlik, geniş çalışma sıcaklık aralığı ve yüksek termal kararlılık gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, yanıcı sıvı elektrolit içermemeleri ile pilin güvenliğini artırmaktadır. Bu özellikler, katı elektrolitleri geleceğin enerji depolama teknolojilerinde kritik bir rol oynayacak hale getirmektedir.

Katı elektrolitler, enerji depolama cihazları için güvenilir ve yüksek performanslı bir seçenek sunduğundan Li iyon piller için katı elektrolitlerin ayrı bir önemi vardır. Sıvı elektrolitlerde görülen birçok sorun katı elektrolitlerle giderilebilir. Belli bir standart olmasa da, katı hal pillerde yaklaşık olarak kütlece %25 katı elektrolit olduğu hesaplanmaktadır (Şekil 4). Katı elektrolit tasarımlarında polimer katı elektrolitler, esneklikleri ve kolay entegre edilebilmeleri sayesinde dikkat çekmektedir. Örneğin, PEO gibi polimerler, Li iyonların iyonik iletimini sağlamak için kullanılabilir. Bununla birlikte, polimer katı elektrolitlerin düşük iletkenlik değerleri dezavantaj olarak kabul edilebilir. Katı elektrolitlerdeki diğer bir tasarım da seramik katı elektrolitlerdir. Bu elektrolitler yüksek iletkenlik değerleri ve kimyasal kararlılıkları nedeniyle oldukça caziptirler. Mesela, lityum lantanum zirkonyum oksit (LLZO) gibi seramikler, yüksek iletkenlik değerleri ve kimyasal kararlılıklarıyla dikkat çeker. Ancak, seramik elektrolitlerin kırılabilirliği ve işlenmelerinin zorluğu dezavantaj olarak dikkate alınmalıdır (Wu vd. 2019). Son olarak, hibrit elektrolitler, polimer ve seramiklerin avantajlarını birleştirerek daha iyi bir performans sunar. Hibrit elektrolitlerin, yüksek iletkenlik, mekanik dayanıklılık ve kimyasal kararlılık gibi özellikleri vardır. Ancak, hibrit elektrolitlerin üretimi daha karmaşıktır ve maliyetleri yüksektir. Bu nedenle, katı elektrolitlerin seçimi, özelliklerin ve uygulamanın gereksinimlerine göre dikkatlice yapılmalıdır.

Katı elektrolit içeren Li iyon pillere bakıldığında pilin yapısı da farklılık göstermektedir (Şekil 5). Sıvı elektrolitli pillerde anot ve katot arasında gözenekli bir ayraç ve aradaki bu boşlukta sıvı elektrolit mevcuttur. Katı hal pillerde ise bir ayraç yoktur. Katı elektrolit aynı zamanda bir ayraç görevi görmektedir. Bu da dendrit oluşumuna karşı pili korunaklı hale getirmektedir. Bununla birlikte katot yapısı çok daha farklıdır. Sıvı elektrolitli pillerde katot kaplaması, aktif madde, karbon siyahı ve bağlayıcıdan oluşmaktadır. Katı hal pillerde ise bu karışıma katı hal elektrolit parçacıkları eklenmektedir. Bu yapıya katolit denmektedir. Bu katı elektrolitle katot aktif maddesi arasında teması arttırmak için yapılmaktadır. Jel elektrolit içeren piller de katı elektrolit pil yapısına benzemektedir.



Şekil 4. Katı elektrolitli bir lityum iyon pilin kütlece bileşenleri (Li metal | polimer elektrolit | NMC) (Wu vd. 2019)



Şekil 5. Katı ve sıvı elektrolitli pillerin yapısal karşılaştırması.

Katı hal Li iyon pil teknolojisinin geleceğinde, enerji yoğunluğunu ve güvenliği artırmak için lityum metal anotların kullanılması ve hatta sonunda ince film lityum metal kullanılacağı öngörülmektedir. Lityum metal, yüksek teorik kapasiteye sahip olup, geleneksel grafit anotlarına kıyasla pilin enerji yoğunluğunu önemli ölçüde artırabilir. Bununla birlikte, lityum metal anotların kullanımı, kısa devreye sebep olabilecek dendrit oluşumu nedeniyle ticari uygulamalarda henüz yaygınlaşmamıştır. Araştırmacılar, bu zorlukları aşmak için çeşitli yöntemler geliştirmektedir. İnce film lityum metal kullanılması, dendrit oluşum riskini daha da azaltarak lityum metal anotlarının güvenliğini artırabilir. Bu teknoloji hala geliştirme aşamasında olsa da, geleceğin yüksek enerji yoğunluklu ve güvenli Li iyon pil teknolojisinde önemli bir rol oynaması beklenmektedir.

Katı hal Li iyon pilleri üzerine araştırma yapan en büyük şirketlerden biri BMW'dir. BMW, Solid Power şirketi ile ortaklık yaparak katı elektrolit kimyasında lityum iyonlarının iletkenliğini sağlamak için sülfür bazlı elektrolitler kullanmaktadır. Bu teknoloji, daha güvenli ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryaların geliştirilmesini amaçlamaktadır. Diğer bir önemli şirket Samsung SDI'dir. Samsung SDI'de sülfür bazlı elektrolit kimyası kullanılmaktadır. Özellikle, bu kimya yüksek iletkenlik değerleriyle bilinir ve Samsung SDI'nın katı hal bataryalarında kullanılmaktadır. Ayrıca, Panasonic'de katı hal Li iyon pilleri üzerine araştırma yapan önde gelen bir şirkettir. Panasonic'in katı elektrolit kimyasında sülfür bazlı malzemeler kullanıldığı bilinmektedir. Özellikle, oksit ve sülfür bazlı kimyalarda araştırma yapılmaktadır. Bu büyük şirketler, katı elektrolitlerin kullanımıyla daha verimli, güvenli ve uzun ömürlü bataryaların geliştirilmesine odaklanmaktadır. Katı hal Li iyon pilleri, enerji depolama teknolojisinde büyük bir ilerleme sağlayarak elektrikli araçlar ve taşınabilir elektronik cihazlar gibi birçok alanda kullanımını genişletebilir.

Özetlemek gerekirse, gelecekte katı elektrolit teknolojileri, yüksek kapasite ve enerji yoğunluğu gibi özellikleriyle sıvı elektrolitlerin yerine geçebilecek alternatif bir elektrolit yapısıdır. Elektrikli araçların gereksinimlerini karşılamak için geliştirilen özellikle hibrit temelli katı elektrolitlerin teknolojik ilerlemesi, elektrikli araç pazarında önemli bir yere sahip olacaktır.

2. ELEKTROLİTLERİN PERFORMANSI VE GELİŞTİRME HEDEFLERİ

2.1. Sıvı Elektrolitler

Li-iyon pillerindeki elektrolitler, şarj ve deşarj sırasında lityum iyonlarını iletirken, aynı zamanda elektrotların yüzeyine ve ara yüzeye karşı kimyasal ve elektrokimyasal kararlılık sağlamalıdır. Bu nedenle, elektrolit bileşenleri, pil performansı, enerji yoğunluğu, güvenlik ve çevrim ömrü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Li iyon pili, elektrokimyasal reaksiyonların hızını ve elektrot malzemesi ve elektrolit ara yüzeyinde kararlılığı artırarak daha yüksek enerji yoğunluğuna ulaşmak için elektrolit bileşenleri üzerinde sürekli olarak çalışmalar yapılmaktadır.

Günümüzde, hava kirliliğinin önemli bir sorun haline gelmesi nedeniyle, fosil yakıtların yerine daha temiz enerji kaynaklarına yönelmek önem kazanmıştır. Elektrikli araçların kullanımı için güçlü ve güvenilir bir enerji kaynağı gereklidir. Bu nedenle, Li iyon pilleri son yıllarda büyük bir önem kazanmıştır. Li iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, hafiflik, uzun ömür, hızlı şarj edilebilirlik ve düşük kendiliğinden deşarj özellikleri nedeniyle elektrikli araçlar için ideal bir enerji kaynağıdır. Li iyon pillerde elektrolitler kritik bir yere sahiptir. Elektrolitler, lityum iyonlarının katot ve anot arasında hareket etmesine izin verir. Bu hareket, pillerin şarj edilmesi ve deşarj edilmesi sırasında gerçekleşir. Ancak, bazı

elektrolitlerin kullanımı pillerin güvenliği açısından riskli olabilir. Bu nedenle, araştırmacılar daha güvenli elektrolitlerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Li iyon piller, sadece elektrikli araçlar için değil, aynı zamanda güneş ve rüzgar enerjisi sistemlerinde de kullanılabilir. Bu nedenle, Li iyon pilleri, çevresel açıdan sürdürülebilir bir geleceğe ulaşmak için önemlidir.

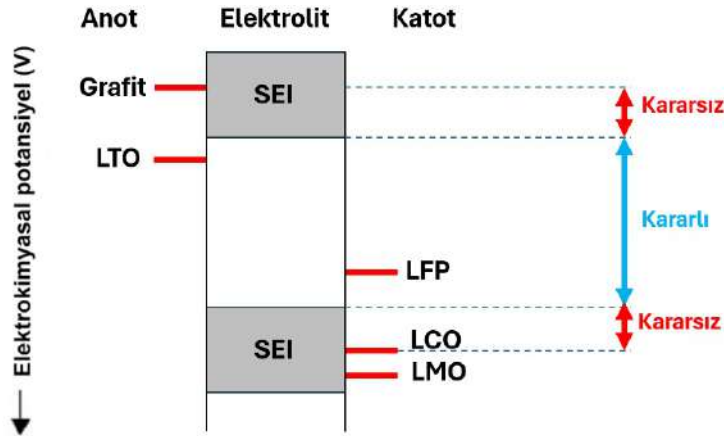
Li iyon pillerinde kullanılan lityum tuzları ve organik çözücülerin bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Bu bileşenlerin farklı kimyasal özellikleri ve etkileşimleri, pilin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Örneğin, lityum perklorat (LiClO_4) yüksek lityum iyon iletkenliği sağlar ve elektrolitin düşük dirençli olmasını sağlar. Lityum hekzaflorofosfat (LiPF_6) ise yaygın olarak kullanılan bir tuzdur ve iyi iletkenlik özellikleri gösterir. Bu tuzlar, lityum iyonlarının elektrotlar arasında hızlı ve verimli bir şekilde hareket etmesini sağlar. Ancak, lityum tuzları çoğunlukla higroskopiktir, yani nemle kolayca reaksiyona girerler. Bu nedenle, nemli ortamlarda depolanırken veya kullanılırken karalılık sorunları ortaya çıkar ve nemli ortamda stoklanmazlar ve Li iyon pil hücreleri Li'nin nem ve oksijene yüksek afinitesi nedeniyle oksitlenmesi sebebiyle nemli ortamlarda üretilmezler, kuru odada üretilmelidirler. Ayrıca, bazı lityum tuzları zehirli ve oksitleyici olabilir, bu da güvenlik riskleri oluşturabilir. Bu nedenle, lityum tuzlarının seçimi, pilin uygulama alanına ve gereksinimlerine göre dikkatlice yapılmalıdır.

Organik çözücülerin avantajlarından biri, iyi çözünme yeteneklerine sahip olmalarıdır. Bu, lityum tuzlarının çözülmesini kolaylaştırır ve lityum iyonlarının elektrolit içinde serbestçe hareket etmesini sağlar. Ayrıca, organik çözücüler ile yüksek iyonik iletkenlik elde edilir, bu da Li iyon pillerinin yüksek performansını destekler. Ancak, organik çözücülerin de bazı dezavantajları vardır. Örneğin, bazı organik çözücüler yanıcı ve patlayıcı olabilir, bu da güvenlik risklerini artırabilir. Ayrıca, organik çözücülerin bazıları da elektrokimyasal istikrarsızlık gösterebilir ve elektrotlarla reaksiyona girebilir. Bu reaksiyonlar, katı elektrolit ara yüzeyi (SEI, solid electrolyte interphase) tabakasının oluşumunu etkileyebilir ve pilin ömrünü kısaltabilir.

Elektrot/elektrolit ara yüzeyinde oluşan SEI tabakası, lityum iyon pillerinde önemli bir rol oynar. Her ne kadar bu tabaka pillerde iç direnci artırsa da bu tabaka, elektrotlarla elektrolit arasında bir geçiş bölgesi oluşturur ve kararlı olduğu durumlarda elektrolitin bozunmasını önleyerek pilin performansını artırır. SEI tabakası, elektrot yüzeyine uygulanan gerilimi sınırlayarak pilin güvenliğini sağlar (Şekil 6). Bu aşamada uygun elektrolit, anot ve katot sisteminin seçilmesi kararlı bir pil için çok kritiktir (Julien vd. 2016).

SEI tabakasının oluşumu ve özellikleri, lityum tuzları ve organik çözücülerin seçimine bağlıdır. Doğru tuz ve çözücü kombinasyonu, kararlı bir SEI tabakasının oluşumunu teşvik edebilir. Bununla birlikte, yanlış tuz veya çözücü seçimi, SEI tabakasının kalitesini ve pilin performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, lityum iyon pilinin tasarımı sırasında tuz ve çözücü seçimi önemli bir adımdır ve dikkatlice yapılmalıdır.

Sonuç olarak, Li iyon pillerinde kullanılan lityum tuzları ve organik çözücülerin performansa doğrudan etkisi vardır. Organik çözücüler lityum tuzlarının çözülmesini ve lityum iyonlarının iletimini sağlayarak pilin performansını artırırken, dezavantajları arasında kararlılık sorunları ve yanma ve reaktivite gibi güvenlik riskleri bulunur. SEI tabakası, tuz ve çözücü kombinasyonuna bağlı olarak oluşur ve pilin performansını etkileyen önemli bir faktördür. Bu nedenle, Li iyon pilinin tasarımı sırasında tuz ve çözücü seçimi, istenen performans, güvenlik ve dayanıklılık hedeflerine ulaşmak için dikkatlice değerlendirilmelidir. Bu açıdan sıvı elektrolitlerde katkı malzemeleri çok büyük bir öneme sahiptir.



Şekil 6. Pillerde elektrolitlerin indirgenme ve yükseltgenme seviyelerine göre kararlılığı (Örnek olarak Grafit|LCO pil yapısı gösterilmiştir)

2.1.1 Sıvı Elektrolit Katkıları

Anot Katkıları

Karbon Anot Katkıları

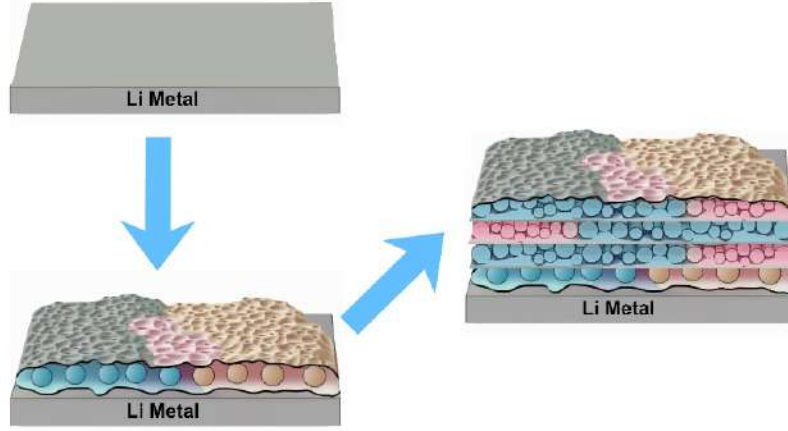
Tarihteki ilk batarya tasarımlarında bilindiği üzere Li anot malzemesi olarak kullanılıyordu; ancak Li anot yüzeyindeki dendrit oluşumu nedeniyle mevcut ticari Li-iyon pillerde genel olarak anot aktif malzeme karbon bazlı grafitir. Kullanımda olan anot malzemelerinde kullanımları esnasında elektrolitlerin karbon elektrotun yüzeyinden ayrışması söz konusu olabilir. Karbon elektrot yüzeyi bir katalizör gibi işlev gördüğü için elektrolitler genellikle elektrot yüzeylerinde 1,5 V'nin altındaki potansiyelde indirgenme sürecine girer. Elektrolitlerin indirgenmesi lityum alkil karbonatlar (ROCO_2Li , $(\text{ROCO}_2\text{Li})_2$) ve lityum karbonat (Li_2CO_3) gibi filmlerin oluşmasına ve gaz oluşumuna neden olur. Filmlerin oluşumu, elektrolitlerin bozunmasına ve lityum iyonlarının tüketilmesine yol açarak kapasite azalmasına neden olur. Öte yandan, gaz oluşumu hücre içinde basınç birikmesine ve çatlamaya neden olur. Elektrolitte H_2O , O_2 ve CO_2 gibi eser miktarda kirliliklerin bulunması, Li_2CO_3 , lityum peroksit (Li_2O_2), lityum oksit (LiO_2) ve lityum hidroksit (LiOH) oluşumuna yol açar. Elektrolitte su bulunması durumunda su, LiPF_6 bazlı elektrolitleri bozabilir ve hidrojen florür (HF) üretebilirken, aynı zamanda elektrolitin konsantrasyonunu azaltır ve karbon anotta SEI'nin ana bileşenlerinden bazılarının bozunmasına neden olarak Li-iyonlarını tüketir ve bu da kapasite azalmasına yol açar. Polikarbonat (PC) gibi elektrolit çözücülerinin elektrolitler arasındaki eş yerdeğiştirme (co-intercalation) nedeniyle grafitin dökülmesine yol açar. Grafit anotlar için PC bazlı elektrolitler kullanıldığında, PC, lityum iyonlarıyla grafen katmanlarına girerek daha sonra indirgenir, böylece grafit elektrot dağılmaya başlar. Ayrıca, PC'nin grafen katmanlarına indirgenmesi, grafen düzlemleri arasında gaz oluşumuna ve parçacıklar içinde basınç birikmesine neden olur, bu da katmanların çatlamasına ve bölünmesine yol açar (An vd. 2016).

Bu sorunlara bir çözüm elektrolit katkı maddelerinin kullanılmasıdır. Elektrolitlerin ayrışması sorunu, elektrolit çözücülerinden daha yüksek potansiyelerde indirgenen ve elektrolit çözücülerinin daha fazla indirgenmesini önlemek için elektrot yüzeyini pasive eden SEI filmi oluşturan katkı maddeleri kullanılarak aşılabilir. Elektrolit katkı maddeleri tarafından oluşturulan SEI filmi, içerdikleri fonksiyonel gruba bağlıdır. Katkı maddesindeki fonksiyonel grup değiştiğinde, fizikokimyasal özellikleri değişir ve farklı SEI bileşenlerinin oluşumuna yol açar. Çeşitli fonksiyonel gruplara sahip elektrolit katkı maddeleri, anorganik bileşikler ve doymamış karbon bağları içeren organik bileşikler, kükürt içeren bileşenleri, halojen içeren bileşenleri ve diğer bileşenleri içerir.

EC, DEC ve PC gibi organik elektrolit çözücülerinin negatif elektrot yüzeyinde indirgenmesi durumunda, indirgenme ürünleri arasında Li_2CO_3 , ROCO_2Li ve $(\text{ROCO}_2\text{Li})_2$ bulunur (Şekil 7) (Ortner 2021). Li_2CO_3 iyi bir pasifleştirici ajandır, bu nedenle elektrolitin indirgenmesini bastırmak için bir yol, Li_2CO_3 ile elektroliti doyurmaktır. Elektrolite düşük bir konsantrasyon Li_2CO_3 eklenirse, Li_2CO_3 elektrot yüzeyine çöker ve böylece yüzey pasifleştirmesi yoluyla elektrolit indirgenmesi bastırılır.

Alkil karbonat çözücülerinin bozunma ürünleriyle (alkoksit anyonları) daha ileri tepkimeye bağlı olarak elektrolitlerin bozunması, vinilen karbonat (VC) eklenerek minimize edilebilir (Sasaki vd. 2005). Elektrolit çözücülerinin bozunması sonucunda alkoksitlerin oluşumu, vinil etilen karbonat (VEC) eklenerek de azaltılabilir (Xu vd. 2013). Suyun olumsuz etkileri, dimetil asetat (DMAc) gibi bir Lewis bazı katkısının eklenmesiyle engellenebilir (Takeuchi vd. 2010).

Grafit anotun PC çözücü ile uyumsuzluğu bilinmektedir. PC, lityum iyon pillerinde yaygın olarak kullanılan çözücüler arasındadır. Bununla birlikte, PC, grafit elektrotun yüzeyinde etkili bir SEI tabakası oluşturamaz ve aynı zamanda lityum iyonlarıyla birlikte grafitin soyulmasına neden olur. Elektrolit katkı maddesi olarak vinil asetat (VA), divinil adipat (DVA) ve alil metil karbonat (AMC) gibi bir dizi olefinik bileşiği PC bazlı sistemlerinde lityum iyon pillerinin performansını iyileştirebildikleri bildirilmiştir. Bunlar gibi sülfür içeren bileşiklerin de, çözücülerden önce indirgendiği ve elektrodun yüzeyinde PC kointerkalasyonunu önleyen pasifleştirici bir film oluşturduğuna inanılmaktadır. Bazı sülfür içeren katkı maddeleri etilen sülfid (ES), propilen sülfid (PyS), 1,3-propan sulton (PS), butil sulton (BS), vinil etilen sülfid (VES) ve prop-1-en-1,3-sulton (PES) içermektedir (Wrodnigg vd. 1999; Lu vd. 2013).



Şekil 7. SEI oluşumu.

Si ve Sn Anot Katkıları

Li-iyon pillerinin yüksek enerji uygulamaları, karbon anotun kapasitesi tarafından sınırlanmaktadır. Si ve Sn tabanlı elektrotlar, yüksek teorik kapasitelere sahip olduklarından (Si için yaklaşık $4.200 \text{ mA}\cdot\text{sa}\cdot\text{g}^{-1}$ ve Sn için yaklaşık $996 \text{ mA}\cdot\text{sa}\cdot\text{g}^{-1}$), yaygın olarak kullanılan karbon tabanlı elektrotların ($372 \text{ mA}\cdot\text{sa}\cdot\text{g}^{-1}$) yerini alabilen umut vadeden negatif elektrotlardır. Ancak, Si ve Sn, şarj ve deşarj sırasında büyük hacim değişiklikleri (%200-400'e kadar) sorununa sahiptir. Bu büyük hacim değişikliği, aktif malzemenin parçalanmasına ve elektriksel iletkenlik yollarının kaybına neden olarak pilin döngü ömrünü azaltır. Ayrıca, tekrarlayan yüzey parçalanması ve ardından taze Si ve Sn yüzeylerinde elektrolitin bozunması nedeniyle sürekli SEI-filmi oluşumu sorunu bulunmaktadır. SEI tabakasının stres nedeniyle kırılmasını ve buna bağlı olarak sürekli SEI büyümesini ve oluşumunu önlemek önemlidir.

Bu sorunu çözmek için bir yaklaşım, elektrolit katkı maddelerinin kullanılmasıdır. Floretoilen karbonat (FEC) ve vinil karbonat (VC), hem Si hem de Sn tabanlı elektrotlar için en yaygın kullanılan katkı maddeleridir (Choi vd. 2006; Lv vd. 2011). Si elektrotlarında FEC, bir çözücü olarak kullanılır. Düşük konsantrasyonda FEC'nin çözücü olarak eklenmesi, güçlü bağ enerjisine sahip olan $-\text{Si}-\text{F}$ ve LiF türlerinin oluşmasıyla sürekli SEI oluşumunu bastırabilir. VC içeren elektrolitlerde, VC indirgenmesi, Si yüzeyini kaplayan polikarbonatların oluşumuna yol açar ve sürekli SEI filmi büyümesini engeller. Bu yapı, elektrodun yüzeyinde oluşmuş esnek bir ağ benzeri ağa sahip stabil bir SEI tabakasını gösterir.

Titanat Anot Katkıları

Mevcut durumda, grafit anotların kullanımından kaynaklanan güvenlik sorunları, spinel lityum titanat ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) (LTO) anot malzemelerinin kullanımıyla ele alınabilir. LTO'nun çalışma potansiyeli yaklaşık olarak 1,55 V ve kapasitesi $\sim 175 \text{ mA}\cdot\text{sa}\cdot\text{g}^{-1}$ 'dir. Çalışma potansiyeli, lityum biriktirme potansiyelinin ve elektrolitlerin indirgeme potansiyelinin üzerinde olduğundan, lityum elektrokaplama ve SEI'nin oluşumu önlenmiş olur. Bu, LTO'nun büyük ölçekli ve uzun ömürlü pil uygulamalarında grafitik anotlara kıyasla mükemmel güvenlik avantajını gösterir.

LTO, yüksek çalışma potansiyeli nedeniyle SEI içermeyen bir anot malzemesi olarak kabul edilmesine rağmen, elektrolitlerin dolaylı olarak bozunması nedeniyle SEI oluşumu olasılığı bulunmaktadır. LTO üzerindeki SEI oluşumunun bir nedeni, döngü sırasında LTO ve elektrolitler arasındaki reaksiyondur ve gaz oluşumuna neden olur. Oluşan gazlar elektrolitlerle daha fazla reaksiyona girerek elektrolitin bozunmasına yol açar.

Elektrolitlerin bozunmasını bastırmak için p-toluenesülfonil isosiyanat (PTSI) kullanabilir (Wang vd. 2015). PTSI'nin indirgenmesi, LTO yüzeyinde daha az dirençli bir SEI oluşturur ve elektrodun HF tarafından korozyonunu engeller. Ayrıca, PTSI zayıf bir baz olarak hareket eder ve fosfor pentaflorür (PF_5) ile elektrolit çözücüler arasındaki reaksiyonu bastırır.

Katot Katkıları

Li iyon pillerinin performansını sınırlayan önemli bir faktör, geçiş metalinin çözünmesi, ara yüzey reaksiyonu, iletken parçacıklarla temasın kaybı vb. nedenlerle katot malzemesinin bozunmasıdır. Katotta bulunan tüm geçiş metalleri (örneğin Mn, Ni, Co, Fe ve Zn gibi) çözünmeye yatkın olsa da, manganez çözünmede en yüksek miktara sahiptir. Bu, spinel elektrotlarda ve Mn içeren diğer katotlarda kapasite kaybının ana nedenlerinden biridir. Metal çözünmesi, katotun yapısının düzensizleşmesine ve ayrıca anot üzerindeki SEI tabakasının büyümesine ve bozulmasına neden olur. Bu sorunların çözümü için bir yol, katotta etkili bir yüzey filmi oluşturabilen katot katkı maddelerinin kullanılmasıdır. Film

oluşturan katot katkı maddelerinin, çözücülerden önce oksitlenmesi ve elektrolitin oksidatif bozunmasını önlemek için elektrot yüzeyini kaplaması beklenmektedir. EC ve DEC gibi en yaygın organik çözücüler 6 V'ye kadar stabil olsa da, katot yüzeyindeki aktif bölgelerin varlığı, onların daha düşük bir potansiyelde oksitlenebilmesine olanak sağlar. Dolayısıyla, katkı maddelerinin çözücülerden daha düşük bir potansiyelde bozunması ve aktif bölgeleri kaplaması, elektrolitlerin dolaylı olarak oksidasyonunu önlemek için önemlidir.

LiCoO₂ katot katkıları

LiCoO₂'nin performansı ile ilgili başlıca sorun, özellikle aşırı şarj durumunda elektrot ve elektrolit arasındaki istenmeyen yan reaksiyonlardan kaynaklanan kapasite kaybıdır, bu da lityum iyonlarının tüketilmesine yol açar. Diğer bir sorun, LiCoO₂'nin 4,2 V'den yüksek bir potansiyele maruz kaldığında Co'nun çözünmesidir. Co çözünmesi, lityum ve oksijenin salınmasıyla birlikte yapısal bozunmaya neden olur.

Organik elektrolitlerden daha düşük oksidasyon potansiyeline sahip organik katkı maddelerinin, iletken bir yüzey filmi oluşturarak ve elektrolit ayrışmasını bastırarak yüksek gerilimde LiCoO₂'nin döngü performansını iyileştirdiği bildirilmektedir. Bu katkı maddeleri biphenyl (BP, 4,44 V), o-terphenyl (OT, 4,45 V) ve m-terphenyl (MT, 4,25 V)'dir (Abe vd. 2004). Tüm bu katkı maddeleri hücre performansını iyileştirmektedir; ancak, daha dirençli ve daha ince bir SEI filmi oluşturmak için, bu katkı maddelerinin miktarı minimum düzeyde tutulmalıdır.

Nikelce zengin katot katkıları

Katmanlı LiNi_xMn_yCo_{1-x-y}O₂ (NMC) ve LiNi_xCo_yAl_{1-x-y}O₂ (NCA) sistemler, Li-iyon pillerinde LiCoO₂'nin yerine geçmek için 4 V elektrot malzemesi olarak büyük ilgi görmektedir. NMC elektrotları, döngü sırasında daha iyi kararlılık, daha iyi termal kararlılık, daha yüksek geri dönüşümlü kapasite (~160 mA·sa/g) ve LiCoO₂'ye kıyasla 4,6 V'ye kadar daha kararlıdır. Bununla birlikte, elektrolit bu potansiyel aralığında kararsız olduğu için katot yüzeyinde oksitlenmeye meyillidir. NMC ile ilgili diğer sorun, yapısal kararsızlığa neden olan geçiş metalinin çözünmesiyle birlikte oksijen gazının oluşmasıdır. Katkı maddeleri genellikle katot/elektrolit arayüzünü stabilize etmek ve geçiş metalinin elektrolite çözünmesini önlemek için kullanılır.

Yüksek gerilimli Li-iyon pillerinin performansını artırmak için elektrolit katkı maddeleri olarak polifluoroalkil (PFA) ile değiştirilmiş etilen karbonat bileşiklerinin türevleri rapor edilmiştir (Zhu vd. 2014). Bu bileşikler, oksitlenebilen veya indirgenebilen reaktif fonksiyonel gruplarını içerir ve iç katman olarak elektrot yüzeylerine bağlanan polifluoroalkil zincirine sahip bir solvobofik tabaka (dış katman) olarak kendiliğinden bir araya gelen bir yapı oluşturur ve elektrolit ayrışmasını önler. Bu katkılar, 4-(triflorometil) (TFM), 4-(perflorobutil) (PFB), 4-(perfloroheksil) (PFH) ve 4-(perflorooktil) (PFO) bileşikleridir. Bunlar arasında, 4-(perflorooktil) ile değiştirilmiş etilen karbonat (PFO-EC) en iyi hücre performansını gösterir ve hücre empedansını azaltır. Bu katkı maddesi, elektrolitten daha düşük bir oksidasyon potansiyeline sahiptir ve elektrolit ayrışmasını önlemek için pozitif elektrot üzerinde oksitlenir. Ayrıca, uzun PFA zincirinin varlığı daha solvobofik bir bariyer oluşturur ve elektrot yüzeylerini korur.

LiFePO₄ katot katkıları

Ekonomik olması, toksik olmaması ve iyi çevrim performansına sahip olması nedeniyle lityum demir fosfat (LiFePO₄), bir sonraki nesil lityum iyon pillerinin geniş ölçekli uygulamaları için en umut verici katot malzemesi olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, LiFePO₄'ün pratik uygulanabilirliğini sınırlayan bazı sorunlar bulunmaktadır. (i) Olivin, yüksek sıcaklıklarda döngü yapıldığında demir çözünmesi ve kapasite kaybı sorunu yaşar. LiFePO₄, hava ortamında yaşlandığında LiFePO₄(OH) oluşumu nedeniyle yüzeydeki OH ve LiPF₆ bazlı elektrolit arasında bir reaksiyona yol açan demir çözünmesi de meydana gelir. Ayrıca, HF ve H₂O'nun varlığı, yüksek sıcaklıklarda demir çözünmesini teşvik edebilir. (ii) Diğer bir sorun, özellikle yüksek sıcaklıklarda elektrolitlerin elektrot yüzeyinde ayrışmasıdır. Bu sorunları aşmanın bir yolu, elektrolit katkı maddelerinin kullanılmasıdır. HF ve H₂O kirliliklerinin varlığından kaynaklanan aktif malzemenin çözünmesini önlemek için, HF ve H₂O ile reaksiyona girebilen katkı maddeleri en iyi adaylardır. N,N-Dietylaminotrimetilsilan (DEATMS), LiFePO₄ katodunun nem veya elektrolit tuzlarıyla H₂O'nun reaksiyonu sonucu oluşan LiFePO₄(OH) içindeki -OH grubuyla reaksiyona girerek HF ve H₂O ile ilişkili sorunlardan kaçınabilir (Cuisinier vd. 2014). Katkı maddesinin HF ve H₂O ile reaksiyonu, 'N-Si' bağının kırılmasıyla gerçekleşir. Elde edilen SEI daha az dirençli ve stabil olduğundan, katot havada yaşlandıktan sonra bile döngü performansını iyileştirmeye yardımcı olur.

2.2. Jel Polimer Elektrolitler (JPE)

JPE'ler mevcut Li-iyon pil teknolojisinde yaygın kullanılan Organik Sıvı Elektrolit (OSE)'lerin ve hedeflenen Li-iyon pil teknolojisinde yer alması beklenen Katı Hal Elektrolit (KHE)'lerin avantajlarını bir araya getiren polimer tabanlı bir elektrolit sistemidir (Tablo 1). OSE'lerde iyonik iletkenliğin yüksek olması ve ara yüzey kararlılıkları birincil avantajlardır.

Katı Polimer Elektrolit'lerin (KPE) elektrokimyasal kararlılıkları, termal kararlılıkları ve güvenli olmaları öne çıkmakla birlikte, başta iyonik iletkenlikleri olmak üzere, ara yüzey özellikleri bir dezavantajdır (Baskoro vd. 2019).

Tablo 2. Organik sıvı elektrolit, jel polimer elektrolit ve katı polimer elektrolitlerin performans kriterlerinin karşılaştırılması (✓ = iyi, □ = yetersiz, ☒ = Orta)

Kriter	OSE	JPE	KPE
İyonik iletkenlik	✓	✓	□
Ara yüzey kararlılığı	✓	✓	□
Elektrokimyasal kararlılık	□	☒	✓
Termal kararlılık	□	□	✓
Kullanım güvenliği	□	☒	✓
Mekanik özellikler	□	□	□

JPE'lerde arayüzey kararlılığı ve elektrokimyasal kararlılık kullanılan bileşenlere ve koşullara bağlıdır. Yanıcı organik sıvı kullanımı nedeniyle termal kararlılıkta OSE'lere kıyasla bir iyileşme söz konusu değildir. Ancak organik sıvının polimer jel tarafından tutulması nedeniyle organik sıvının buharlaşması ve akması risklerini azaltmakta, kullanım güvenliğini iyileştirmektedir.

JPE'lerin en büyük avantajı organik sıvı içinde gözlenen yüksek iyonik iletkenlikleri ve elektrot-elektrolit arayüzey kararlılıklarını korurken, polimer matrisin organik sıvı tutma kapasitesi ile sıvı akma ve güvenlik risklerini azaltması, polimer matrisin sağlamlık ve esneklik gibi mekanik özelliklerinin katkısı ile genel olarak mekanik özellikleri iyileştirmesidir. Buna rağmen JPE'lerin henüz yeterince ticarileşmemesinin en büyük nedeni mekanik özelliklerin yeterli olmaması, jel hazırlama süreçlerinin karmaşıklığı ve göreceli pahalı olmasıdır.

Jeller, 3-boyutta birbirlerine çapraz (birkaç noktadan) bağlanmış ve çözücü tutabilen malzemelerdir. Bu bağlantılar kimyasal bağlar veya fiziksel etkileşimler olabilir. Yüksek molekül ağırlıklı polimerlerde uzun zincirlerin birbirlerine dğümlemesi (entanglement) de çözücü tutmalarını sağlar. JPE'ler morfolojik açıdan iki sınıfta düşünülebilir: i) Kimyasal veya fiziksel çapraz bağlı, ilave gözenek oluşumu olmayan homojen jeller; ii) Gözenekli jeller. Homojen JPE'lerin hazırlanmasında polimer zincirleri çapraz bağlayıcı moleküllerle bağlanarak 3-boyutlu jel yapısı oluşturulur veya yüksek molekül ağırlıklı polimerler çözücü uçurma yöntemiyle film haline getirilir. Kuru filmler içine lityum tuzu/organik çözücü çözeltisi emdirilerek jel elde edilir. Li iyon pil uygulamaları için hazırlanan fiziksel jellerin çözücü tutma kapasiteleri ağırlıkça %70-100 aralığındadır. Bu çözücü tutma kapasitesi jel ortamında Li⁺ iyonlarının organik çözücü içinde difüzyonu ve oda sıcaklığında 0,2-1,0 mS·cm⁻¹ aralığında iyonik iletkenlik elde edilmesi için yeterlidir. Kimyasal çapraz bağlı polimer jellerin çözücü tutma kapasiteleri daha yüksek olabilir. Yüksek çözücü tutma kapasitesi iyonik iletkenliğe katkı sağlar, ancak jelin mekanik özelliklerini zayıflatır.

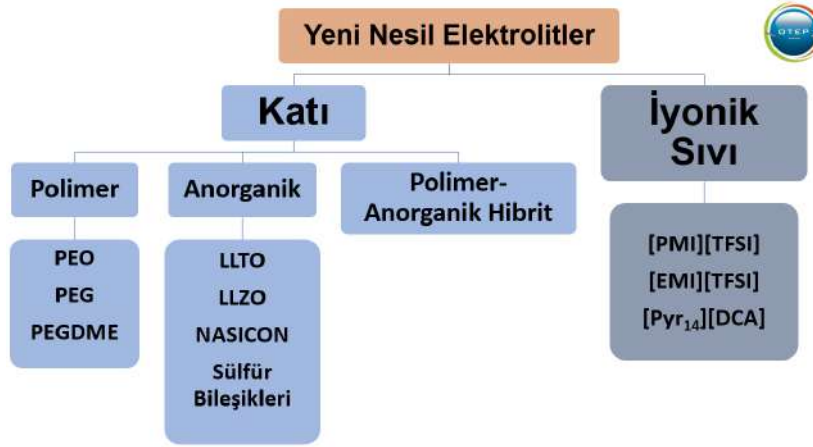
Mekanik özelliklerinin güçlendirilmesi, hazırlama süreçlerinin basitleştirilmesi ve yaygın kullanılan polimer ve kimyasalların kullanımı ile üretim maliyetlerinin düşürülmesinin JPE'lerin ticarileşmesine katkı sağlayacaktır.

2.3. Katı Elektrolitler

Geleneksel Li iyon şarj edilebilir piller, katı elektrotlara ve sıvı elektrolitlere sahip olduklarından buharlaşma, yanma ve patlama gibi potansiyel risklerle karşı karşıya kalırlar. Sonuç olarak, güvenli Li-iyon pillere yönelik güçlü bir talep vardır. Katı hal elektrolitleri, malzeme özellikleri nedeniyle sıvı elektrolitlerle karşılaşılan çoğu güvenlik endişesini ortadan kaldırılabılır. Katı hal elektrolitlerinin başlıca avantajları, sıvı benzerlerinin aksine korozyona uğramamaları, yanmamaları, sızdırmamaları veya iç kısa devre yapmamalarıdır. Ayrıca, katı elektrolitler metalik Li'ye karşı inerttir ve dendrit büyümesine karşı direnç göstermelerine yardımcı olarak bir ayırıcı görevi görürler. Tamamen katı hal pillerde aranan önemli fonksiyonel özellikler, bir anot veya yüksek gerilimli katot malzemesi varlığında kimyasal kararlılık, şarj ve deşarj sırasında termal kararlılık, tersinir olmayan reaksiyona karşı geniş elektrokimyasal kararlılık penceresi ve yüksek toplam Li-iyon iletkenliğidir. Katı hal elektrolitlerinin göreceli olarak yüksek bir iyonik iletkenliğe (iletkenlik > 10⁻³ S·cm⁻¹) sahip olması gerekmektedir. Bununla birlikte, mevcut katı elektrolitler çoğu zaman bu hedefe ulaşmaktan uzaktır.

Avantajlarına rağmen, katı elektrolitler genel olarak düşük oda sıcaklığında iyonik iletkenliği, kısa döngü ömrü, katotla uyumsuzluk ve büyük arayüz veya tanecik sınırı direnci gibi birkaç zorluk nedeniyle Li iyon pillerde geniş çapta kullanılmamıştır. Tüm bu kısıtlamalar, yığın, yüzey, arayüz ve tanecik sınırları olmak üzere dört farklı yönle ilgili çeşitli

sorunlardan kaynaklanır. Dolayısıyla, katı elektrolitlerin kısıtlamalarıyla başa çıkmak için kullanılan yöntemler de bu dört yönü temel alır. Şekil 8'de katı elektrolitlerin genel sınıflandırılması yapılmıştır. Bu malzemelerle, bahsi geçen sorunlara cevap aranmaktadır ancak her bir yapının kendine has avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Daha esnek, daha güvenli ve daha yüksek enerjili bataryalara olan taleple birlikte, bu sorunların üstesinden gelmek için yeni yöntemler ve çözümler araştırılmaktadır.



Şekil 8. Katı elektrolit çeşitleri.

2.3.1 Polimer Katı Elektrolitler

Polimerler, elektrot üretiminde bağlayıcı olarak, separatörlerde ve membranlarda kullanımı ile batarya içerisinde birçok önemli görevi yerine getirmektedir. Sıvı elektrolitlere ve anorganik katı elektrolitlere göre polimer elektrolitler, şarj/deşarj sırasında elektrotların hacmindeki değişimlere karşı gelişmiş direnç, gelişmiş güvenlik özellikleri, mükemmel esneklik ve işlenebilirlik gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır (Long vd. 2016). Bununla birlikte, belirli koşullar altında çözücü içermeyen polimer elektrolitlerde pil içerisinde dendrit büyümesi en aza indirilebilir ve hatta bastırılabilir. Katı polimer elektrolitler için, polimer matrisi önce Li iyonlarını çözme/kompleksleştirme yeteneğine sahip olmalıdır. Li iyon pillerde kullanılacak polimer katı elektrolitlerin şu özelliklere sahip olması beklenmektedir:

- **Yüksek iyonik iletkenlik:** Polimer elektrolit iyi bir iyonik iletken ve elektronik yalıtkan olmalıdır. Böylece iyon taşınması kolaylaştırılabilir ve kendi kendinedeşarj en aza indirilebilir.
- **Yüksek Li⁺ transfer numarası:** Mümkünse, bir elektrolit sisteminde Li⁺ aktarım sayısı bire yakındır.
- **İyi mekanik kuvvet:** Özellikle büyük ölçekli Li-iyon batarya üretiminde mekanik kuvvet önemli bir parametredir.
- **Geniş elektrokimyasal kararlılık penceresi:** Elektrokimyasal pencere yükseltgenme reaksiyonu ve indirgenme reaksiyonu potansiyelleri arasındaki fark olarak tanımlanır. Polimer elektrolitler her bir elektrot malzemesine uyumlu olarak Li/Li⁺ya karşı 4-5 V elektrokimyasal çerçeveye sahip olmalıdır.
- **Mükemmel kimyasal ve termal kararlılık:** Polimer elektrolitler anot, katot, hücre ayırıcı, akım toplayıcılar, katkı maddeleri ve hücre paketleme malzemeleri gibi pil bileşenlerine karşı inert olmalıdır. Elektrik (kısa devre, aşırı şarj) veya termal (alev) kötüye kullanımı durumunda mükemmel termal kararlılık göstermelidir.

Li iyon piller için en yaygın olarak kullanılan polimer matrisler şunlardır: poli(etilen oksit) (PEO), poli(viniliden florür) (PVDF) ve kopolimerleri, poli(etilen glikol) (PEG), poli(akrilonitril) (PAN), ve poli(etilen karbonat) (PEC) (Barbosa vd. 2022).

Poli(etilen oksit) (PEO) Li iyon pillerde en eski ve üzerinde en çok çalışılan polimerdir (Saal vd. 2021). PEO özellikle kuru polimer elektrolitlerin iletkenliğini artırdığı ve bu tür elektrolitleri içeren cihazların üretim maliyetini düşürdüğü için üzerinde çok sayıda çalışma yapılmıştır. PEO esas olarak amorf bölgelerinde Li⁺ gibi katyonları kompleksleştirme ve iletme kabiliyetine sahiptir.

2.3.2 Anorganik Katı Elektrolitler

Lityum katı anorganik elektrolitler, aynı zamanda lityum hızlı iyon iletkenleri olarak da adlandırılırlar ve iki ayrı kategoriye ayrılabilirler: kristal elektrolitler (veya seramik elektrolitler) ve amorf elektrolitler (veya cam elektrolitler). Bu elektrolitler oda sıcaklığında son derece yüksek iyonik iletkenlik gösterirler ($>10^{-3} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$), yüksek lityum iyon transfer oranına (~ 1) ve düşük iletken aktivasyon enerjisine ($E_a < 0,5 \text{ eV}$) sahiptirler. Ancak, mekanik özelliklerinin biraz zayıf olması, elektrotlarla temas halinde büyük bir arayüzey direncine ve dar elektrokimyasal pencereye sahip olmaları, yaygın kullanımlarını engeller.

Kristal elektrolitler

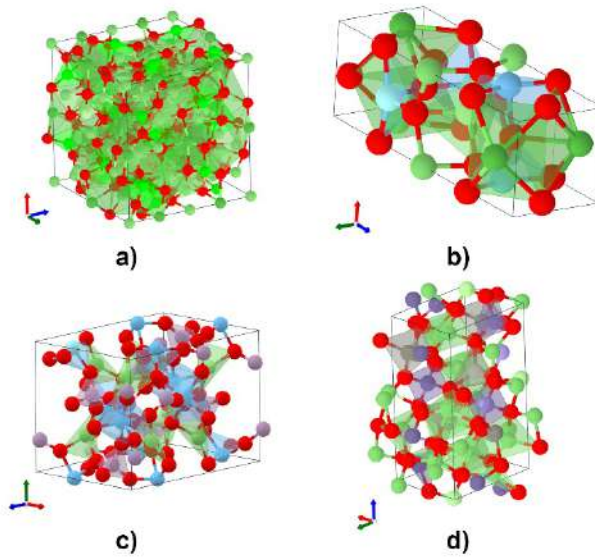
Perovskit, NASICON, garnet ve LISICON tipleri gibi yapıları olan kristal elektrolitler öncelikli olarak araştırılmış olanlardır (Şekil 9). Bu seramik elektrolitlerin birçok değişik hazırlanma yöntemi bulunmaktadır.

Perovskit elektrolitler

ABO_3 yapısına sahip perovskit tipi elektrolitler oda sıcaklığında yaklaşık olarak $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ gibi yüksek bir iletkenliğe sahiptir. $\text{Li}_x\text{La}_y\text{TiO}_3$ (LLTO), bu grubun en tipik örneğidir. LLTO, 8 V'ye kadar yüksek elektrokimyasal kararlılık, lityum iyon iletkenliği ve açık havada kararlılık gibi birçok avantaja sahiptir. LLTO elektrolitlerinin iki dezavantajı ise düşük tane sınırı iletkenliği ve Li metal anotuna karşı kararsızlıktır (Bohnke 2008).

NASICON elektrolitler

Sodyum süper iyonik iletkenler (NASICON), iyi bir yapısal kararlılık ve hızlı iyonik iletkenlik gösterir, bu da onların metal bazlı pil sistemlerinde kullanılmasını sağlar. $\text{MA}_2(\text{BO}_4)_3$ şeklinde genel bir formüle sahiptirler. Burada M, A, B farklı değerlik durumlarına sahip metal katyonlarını temsil eder. M konumu genellikle Li, Na, K veya Ag ile doldurulur. A konumu genellikle Ti, Zr, Ge veya V ile doldurulur. B konumu genellikle P, Si veya Mo tarafından alınır. A ve B konumlarındaki elementler başka metal katyonlarıyla değiştirilebilir, böylece çok çeşitli NASICON'lar oluşturulabilir. Ti içeren $\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$ NASICON'lar, diğer dört değerlikli metal iyonlarına kıyasla daha yüksek iyonik iletkenliğe sahiptir (Arbi vd. 2007). Bu elektrolitin türevleri oda sıcaklığında en yüksek $7 \times 10^{-4} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ iyonik iletkenlik değerini sergilemiştir. Ayrıca, NASICON tipi elektrolitlerin nispeten geniş bir elektrokimyasal kararlılık penceresi vardır. Yaklaşık olarak bu elektrolitler 6 V'ye (Li/Li^+ karşısında) ulaşabilir. Bununla birlikte, Ti^{4+} lityum metale karşı yeterince kararlı değildir. Yüzeyin farklı polimer elektrolitlerle kaplanması bu kararsızlığa karşı bir direnç oluşturmaktadır. Bu ara tabakalar, Li metal anodu ile temas ettiğinde Ti^{4+} indirgenmesini önlemek için kullanılmaktadır.



Şekil 9. (a) LLZO, (b) LLTO, (c) NASICON ve (d) LISICON kristal yapıları

Garnet elektrolitler

Garnet tipi lityum katı elektrolitlerin genel formülü $\text{Li}_5\text{La}_3\text{M}_2\text{O}_{12}$ ($\text{M} = \text{Nb}$ veya Ta) şeklindedir. Son zamanlarda katı hal Li pilleri için elektrolit olarak kullanılmaktadır. $25\text{ }^\circ\text{C}$ 'de $1,69 \times 10^{-5} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ iyonik iletkenlik ve $0,40 \text{ eV}$ aktivasyon enerjisi ile yüksek bir iletkenlik sergilemektedir. Garnet tipi lityum lantan zirkonyum oksit ($\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (LLZO)), büyük ilgi çekmektedir. Kübik faz, oda sıcaklığında $1 \times 10^{-4} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ gibi daha yüksek bir iyonik iletkenliğe sahiptir, bu tetragonal fazın iletkenliğinin yaklaşık 100 katıdır (Cao vd. 2014). Sonuç olarak, garnet elektrolitler geniş elektrokimyasal pencere ve Li metale karşı en kararlı arayüzlere sahip olmaları nedeniyle ilgi çekicidir. Bununla birlikte, garnet elektrolit ile elektrot arasındaki büyük arayüz direnci bu sistemdeki önemli sorunlardan biridir. Son yıllarda, elektrot-elektrolit arayüzündeki kimyasal ve elektrokimyasal kararsızlıklar tarafından tetiklenen engel büyümesi ve kapasite kaybını aşmak için kaplama, aşım oluşturma ve yapay SEI oluşturma gibi yaklaşımlar yaygın olarak kullanılmaktadır.

LISICON elektrolitler

LISICON tipi elektrolitlerin tipik bir temsilcisi olan lityum çinko germanyum oksit ($\text{Li}_{14}\text{ZnGe}_4\text{O}_{16}$), $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'de $1,25 \times 10^{-1} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ yüksek bir iyonik iletkenliğe sahiptir, ancak oda sıcaklığında bu değer sadece $10^{-7} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 'dir (Kanno vd. 2000). Lityum çinko germanyum oksit ($\text{Li}_{14}\text{ZnGe}_4\text{O}_{16}$) yüksek sıcaklıklarda kararsızdır ve atmosferik CO_2 ve Li metaline karşı yüksek reaktivite gösterir. LISICON tipi elektrolitlerin iyonik iletkenliğini iyileştirmek için yapıdaki oksit yerine kükürt kullanmıştır. Kükürt bazlı anorganik elektrolitler, bugüne kadar anorganik elektrolitler arasında en iyi iletkenliği göstermiştir.

Amorf (Camsı) Elektrolitler

Amorf elektrolitler, izotropik iyonik iletimleri, tane sınırı direnci olmaması, ince film halinde kolay üretimleri ve düşük maliyetleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Amorf elektrolitler, oksit ve sülfür tipleri olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. İlki, iyi elektrokimyasal ve termal stabilite sergiler, ancak düşük iletkenlik gösterir (oda sıcaklığında 10^{-8} - $10^{-6} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$), ikinci grup camsı elektrolitler oda sıcaklığında daha yüksek bir iletkenlik gösterir (10^{-4} - $10^{-3} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$), ancak nem ve O_2 ile kararsızdır ve hazırlanması zordur.

Oksit cam elektrolitler, ağ oluşturan oksitlerden (SiO_2 , B_2O_3 veya P_2O_5) ve ağ değiştirici oksitlerden (Li_2O) oluşur. Yapı düşük sıcaklıkta stabil bir sistemdir. Ağ oluşturan oksitler güçlü bir şekilde birbirine bağlı dev moleküler zincirler oluşturur. Ağ değiştirici ve oluşturan oksitler arasındaki kimyasal reaksiyonlar, makromoleküler zincirlerdeki oksijen bağını kırabilir ve makromoleküler zincirlerin ortalama uzunluğunu azaltabilir. Bu süreç, sadece Li iyonlarının malzeme içinde seyahat etmesine izin veren açık bir yapı oluşturur. Bu nedenle, amorf elektrolitlerin iyonik iletkenliği, aynı elementlerden yapılmış kristal elektrolitlere göre daha yüksektir.

İki bileşenli Li_2O - B_2O_3 cam elektrolit, oda sıcaklığında yaklaşık olarak $1,2 \times 10^{-8} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ civarında düşük bir iyonik iletkenliğe sahiptir. Bu sisteme farklı oranlarda selenyum oksit SeO_2 eklenerek oda sıcaklığında $8 \times 10^{-7} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ iletkenlik değerine ulaşabilmektedir (Lee vd. 2002). Ayrıca, cam benzeri elektrolitlerin iyonik iletkenliğini artırmak için lityum konsantrasyonunu artırmak başka bir yaklaşımdır. Li_2O - B_2O_3 - SiO_2 cam elektrolitinin iyonik iletkenliğinin, Li_2O konsantrasyonu ile artabileceği bulunmuştur. Bu durum, cam ağının değişmesi ve boroksol halkaları ve diborat birimlerinin oluşumuyla ilgilidir.

Oksit cam elektrolit Li_2O - P_2O_5 'e N eklenmesi, yeni bir cam elektrolit lityum fosfor oksit nitrür (LiPON) oluşturmuştur. Oda sıcaklığında $3,0 \times 10^{-7} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ olan iyonik iletkenliği sergilemektedir (Li vd. 2015). LiPON'lar lityum metal ve katot malzemeleri ile kararludur, ancak büyük ölçekli üretim için maliyetlidir.

Sülfür amorf elektrolitlerin yapısı, oksit cam elektrolitlerin yapısıyla aynıdır, ancak oksijen atomlarının sülfür atomlarıyla değiştirilmesiyle gerçekleşir. S^{2-} iyonunun O^{2-} iyonundan daha düşük elektronegativitesi, Li^+ ile bağlanma yeteneğinin azalmasına neden olurken, S^{2-} iyonunun O^{2-} iyonuna kıyasla daha büyük bir yarıçapı, daha geniş Li^+ taşıma kanalları oluşturmaktadır.

Sülfür cam elektrolitler, oksit cam elektrolitlere kıyasla daha yüksek bir iyonik iletkenlik (oda sıcaklığında yaklaşık 10^{-4} - $10^{-3} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$) elde edebilir. Bu nedenle, lityum sülfür- fosfor pentasülfür (Li_2S - P_2S_5), lityum sülfür- silisyum sülfür (Li_2S - SiS_2) ve lityum sülfür-bor sülfür (Li_2S - B_2S_3) katı hal piller için mükemmel elektrolitlerdir (Seino vd. 2006). P_2S_5 içeren cam benzeri elektrolitler, Li metal anotuna karşı uygun elektrokimyasal stabilite gösterir. Oksit cam benzeri elektrolitler gibi, karışık ağ yapısı sülfür cam benzeri elektrolitlerin iyonik iletkenliğini etkili bir şekilde artırabilmektedir. SiS_2 içeren cam elektrolitler, yüksek iyonik iletkenlik ve atmosferik basınç altında kolay bir şekilde üretim imkanı sunar. Lityum iyodür (LiI) eklenmesi, iyonik iletkenliği $1,32 \times 10^{-3} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 'e kadar artırabilir, ancak bu bozunma gerilimini azaltmaktadır. En çok çalışılan katı elektrolitlerin iletkenlik karşılaştırması Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. Seramik elektrolit iletkenlikleri.

Katı Elektrolit	Kompozisyon	İyonik İletkenlik (S/cm)
NASICON-tipi	$\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$	7×10^{-4}
LISICON-tipi	$\text{Li}_{14}\text{ZnGe}_4\text{O}_{16}$	10^{-7}
thio-LISICON	$\text{Li}_{3,25}\text{Ge}_{0,25}\text{P}_{0,75}\text{S}_4$	$10^{-2} - 10^{-3}$
	$\text{Li}_{9,54}\text{Si}_{1,74}\text{P}_{1,44}\text{S}_{11,7}\text{Cl}_{0,3}$	$2,5 \times 10^{-2}$
Perovskitler	Y-katkılı $\text{La}_{0,46}\text{Li}_{0,33}\text{TiO}_3$	$1,95 \times 10^{-3}$
	$\text{Li}_{6,55}\text{La}_{2,5}\text{BaZrTaO}_{12}$	6×10^{-3}
Garnetler	$\text{Li}_{6,5}\text{La}_3\text{Zr}_{1,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{12}$	$0,75 \times 10^{-3}$
	$\text{Li}_{6,25}\text{La}_3\text{Zr}_2\text{Al}_{0,25}\text{O}_{12}$	$0,68 \times 10^{-3}$
	$\text{Li}_{6,25}\text{La}_3\text{Zr}_2\text{Ta}_{0,25}\text{Ga}_{0,2}\text{O}_{12}$	$1,04 \times 10^{-3}$
$\text{Li}_2\text{S-SiS}_2$ bazlı	$95[0,6\text{Li}_2\text{S}_{0,4}\text{SiS}_2] \cdot 5\text{Li}_4\text{SiO}_4$	10^{-3}
$\text{Li}_2\text{S-P}_2\text{S}_5$ bazlı	70 Li_2S -30 P_2S_5 cam seramik	$3,2 \times 10^{-3}$

2.3.3 Hibrit Katı Elektrolitler

Polimer ve anorganik katı elektrolitlerin karşılaştırması, yüksek iyonik iletim ve transfer oranı, elektrodalara karşı yüksek kararlılık, olgun üretim süreçleriyle uyumluluk ve maliyet etkinliği gereksinimlerinin hiçbirini karşılamadığını göstermektedir. Bunun yerine, polimer ve anorganik katı elektrolitlerin birbirini tamamlayan avantajlarının birleştirilmesiyle elde edilmiş hibrit elektrolitlerin tüm bu gereksinimleri karşılamak için daha iyi bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır. Bu yönde birçok çaba harcanmıştır ve hibrit elektrolitlerin polimer bileşenin esnekliğini ve ölçeklendirme işlenebilirliğini devralır ve bu nedenle geleneksel Li iyon piller için kullanılan büyük ölçekli ve rulo-üzeri üretim süreçleriyle uyumlu olabilir. Ayrıca, hibrit elektrolitler, polimer ve anorganik bileşen arasındaki sinerjik etkileşimlerden kaynaklanan gelişmiş iyonik iletim ve kararlılığa sahip olabilir.

Büyük ölçekli üretim için kolay işlenme yeteneğine ek olarak, yüksek enerji yoğunluğuna sahip katı hal piller için uygun olan hibrit elektrolitler, yüksek Li iyon iletim yeteneği ve transfer oranı ile birlikte çeşitli kararlılık gereksinimlerini karşılamalıdır. Yüksek enerji yoğunluğuna ve güvenli katı hal pilleri üretilmesine yönelik hibrit elektrolitlerin geliştirilmesi için en iyi polimer ve anorganik bileşen kombinasyonunu seçmek ve temel özelliklerinin anlaşılmasına dayanarak hibrit elektrolitin mikroyapısını tasarlamak gerekmektedir.

Son yıllarda, polimer elektrolitlerin iyonik iletkenliği üzerinde pasif dolgu maddelerinin etkisiyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Pasif dolgu maddeleri tek başlarına Li iyon iletimi sağlamazlar ve başlıca oksitler (örneğin Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 ve ZrO_2 , metal-organik çerçeveler ve kil mineralleri) içerir (Klongkan vd. 2015). Pasif dolgu maddeleri tarafından sağlanan iyonik iletkenlik artışı temel olarak iki mekanizmaya bağlanmaktadır. İlk olarak, dolgu maddeleri, düşük cam geçiş sıcaklığına (T_g) sahip polimerlerin (örneğin PEO) kristalleşmesini fiziksel olarak bastırır ve dolgu yüzeyi ile polimer zincirleri arasındaki Lewis asit-baz tipi etkileşimler, polimer zincirlerinin kristalleşmesini kinetik olarak engeller ve zincir segmentel hareketini artırarak iyon hareketliliğini artırır. İkinci olarak, dolgu maddeleri ile Li tuzu arasındaki Lewis asit-baz etkileşimleri, tuzun çözünmesinin artmasına ve böylece hareketli Li iyonlarının konsantrasyonunun artmasına yol açar. Örneğin, Al_2O_3 ve TiO_2 nanoparçacıklarının PEO- LiClO_4 elektrolitlere eklenmesi, iyonik iletkenliği 100 kattan daha fazla arttırmıştır.

Pasif dolgu maddeleriyle karşılaştırıldığında, LLZO ve sülfür elektrolitler gibi anorganik elektrolit dolgu maddeleri, yüksek iyonik iletkenlikleri nedeniyle iyonik iletkenliği artırmak için daha verimlidir. Mikrometre boyutundaki LLZO parçacıkları bile iyonik iletkenliği büyük ölçüde arttırabilir (Liu vd. 2017). Anorganik elektrolit dolgu maddeleri ve polimer elektrolitlerden oluşan hibrit elektrolitlerde, anorganik parçacıklar inert dolgu maddeleri gibi işlev görür ve yukarıda bahsedilen Lewis asit-baz etkileşimleriyle oluşan polimer ve dolgu arasındaki arayüz tabakalarında iyon taşıma yolları oluşturur. Ayrıca, anorganik elektrolit dolgu maddeleri kendileri hızlı iyon taşınımını kolaylaştırabilir. Bütün elektrolitlerin durum özeti Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Farklı elektrolitler ve özellikleri

Elektrolit	Avantajı	Dezavantajı	THS	Kararlı çalışma aralığı (V)	İletkenliği (S/cm)	Örnek Kimya
Organik sıvı	Yüksek iletkenlik, uygulama kolay	Yanıcı	9	0,5-4,5	$5-10 \times 10^{-3}$	LiPF ₆ -3:7 EC/EMC
Jel elektrolit	Sıvıya göre daha güvenli	Düşük iletkenlik	9	0,0-5,0	$10^{-4}-10^{-3}$	PVDF/HFP-LiPF ₆ -EC/DMC
Katı polimer	Esnek, kolay uygulama	Düşük iletkenlik	8-9	0,0-5,0	$1,1 \times 10^{-4}$	PEO- LiClO ₄
Katı oksit	Kimyasal kararlılık	Kırılğan, uygulama zorluğu	6-7	0,0-3,7	$1,04 \times 10^{-3}$	Li _{6,25} La ₃ Zr ₂ Ta _{0,25} Ga _{0,2} O ₁₂
Katı sülfür	Yüksek iletkenlik	Hava ile düşük kararlılık	8-9	1,7-2,3	$3,2 \times 10^{-3}$	Li ₂ S-P ₂ S ₅

3. ANAHTAR KONULAR VE ZORLUKLAR

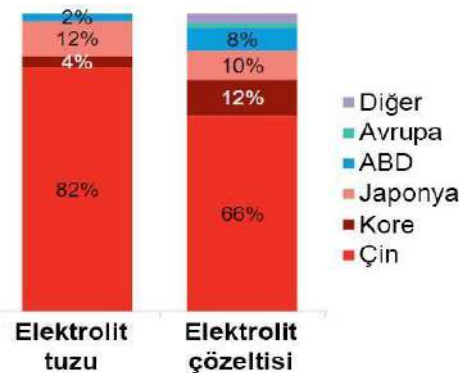
3.1. Dünya’da Ticari Olarak Elektrolit Üretimi ve Pazarı

Li iyon pil elektrolit üretimi, dünya çapında önemli bir endüstridir ve birçok ülke için stratejik bir öneme sahiptir. Bu ülkeler, Li iyon pil üretimi için gerekli olan hammaddelerin sağlanması ve tedarik zinciri yönetimi açısından büyük bir bağımlılık taşımaktadır.

Li iyon pil elektrolit üretimi için gerekli hammaddelerin tedarik zinciri, üreticilerin dünya çapında çeşitli kaynaklara ve tedarikçilere bağlı olmalarını gerektirir. Bu, ülkelerin lityum ve diğer hammaddelerin çıkarılması, rafine edilmesi, ihracatı ve ithalatı için güçlü bir lojistik ve ticaret ağı oluşturmalarını gerektirir.

Bu nedenle, Li iyon pil elektrolit üretimi için hammaddelerin tedarik zinciri yönetimi, ülkeler arasındaki stratejik önemi ve rekabeti artırmaktadır. Lityum ve diğer hammaddelerin sağlanması, üretim kapasitesi ve teknolojik yetenekler, ülkelerin bu endüstrideki başarılarını etkileyen faktörlerdir. Li iyon pil endüstrisinde güçlü bir tedarik zinciri oluşturan ülkeler, rekabet avantajı elde ederken, hammaddelerin temini konusunda zorluklar yaşayan ülkeler ise dışa bağımlılık ve risklerle karşı karşıya kalabilir. Dünyada başlıca elektrolit üreticileri Tablo 5’te verilmiştir. 2019 verilerine göre senede 339.000 ton Li iyon elektroliti üretilmiştir. Tuz ve solvent üretimi konusunda Çin birinci durumdayken, Japonya ve Güney Kore, Çin’i takip etmektedir (Şekil 10).

Piller, endüstride, ulaşımda, enerji depolamada, tüketici elektroniğinde, elektrikli araç pillerinde ve hatta ev ortamlarında çeşitli uygulamalar için kullanılır. Genişleyen tüketici elektroniği pazarı, yenilenebilir enerji depolamanın faydalarına ilişkin artan halkın anlayışı ve yenilenebilir enerji sektöründe Li iyon pillere olan talebin artması, pazarın genişlemesini sağlamaktadır. Altyapısal büyüme önümüzdeki dönem boyunca elektrikli pil araçlarının artan üretimini, tüketici elektronik ürünlerinin artan kullanımını ve Li iyon piller için bağlayıcı içermeyen elektrotların bulunabilirliğini sınırlayıcı faktörler olarak beklenmektedir.



Kaynak: BloombergNEF

Şekil 10. Dünyada Li iyon elektrolit tuz ve çözelti üretim dağılımı (National Blueprint for Lithium Batteries 2021-2030, DOE)



Tablo 5. Önemli elektrolit üreticileri.

Sıvı elektrolit üreticileri	Katı elektrolit üreticileri
<ul style="list-style-type: none"> • UBE Industries Ltd. (Japonya) • Mitsubishi Chemical Corporation (Japonya) • BASF SE (Almanya) • Shenzhen Capchem Technology Co., Ltd. (Çin) • Targray Group (Kanada) • Guangzhou Tinci Materials Technology Co., Ltd. (Çin) • Oriental Union Chemical Corp. (OUCC) (Tayvan) • Dongwha Electrolyte Co., Ltd. (Güney Kore) 	<p>Oksit elektrolit</p> <ul style="list-style-type: none"> • ProLogium Technology (Tayvan) • Qing Tao (Kunshan) Energy Development (Çin) <p>Sülfür elektrolit</p> <ul style="list-style-type: none"> • Samsung SDI (Güney Kore) • Panasonic Corp. (Japonya) • Ampcera Inc. (ABD) • Solid Power Inc. (ABD) <p>Polimer elektrolit</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bolloré SE (Fransa) • Factorial Energy (ABD) • Beijing WeLion New Energy Technology (Çin) • SES AI Corp. (ABD)

Hali hazırda elektrolit pazarında sıvı elektrolitin baskın olduğunu söylemek mümkündür. ABD'nin, küresel lityum ve Li iyon batarya elektrolitleri pazarında önemli bir paya sahip olması öngörülmektedir. Elektronik ürünlerin artan tüketimi sayesinde istikrarlı bir büyüme göstermesi beklenmektedir. Ülkenin, Kuzey Amerika bölgesinde büyük bir pazar payına sahip olacağı düşünülmektedir. Büyüyen nüfus ve hızlı kentleşme, elektronik ve otomotiv endüstrilerinin büyümesini etkileyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Tüketici elektroniği sektörü hızlı bir şekilde büyüyecek ve bu da elektrolit üreticileri için pazarı canlandıracaktır.

Lityum pil tabanlı cihazların daha da geliştirilmesiyle, Li iyon elektrolitlerinin talep ve gelişmeler nedeniyle sürekli bir büyüme yaşaması muhtemeldir. Ayrıca, elektrikli araçlara olan talebin artması da pazarın büyümesinde önemli bir rol oynayacaktır. Her iki sektörden gelen yüksek talep nedeniyle ABD'nin 2029 yılına kadar yaklaşık 0,29 milyar \$ bir seviyeye ulaşması öngörülmektedir.

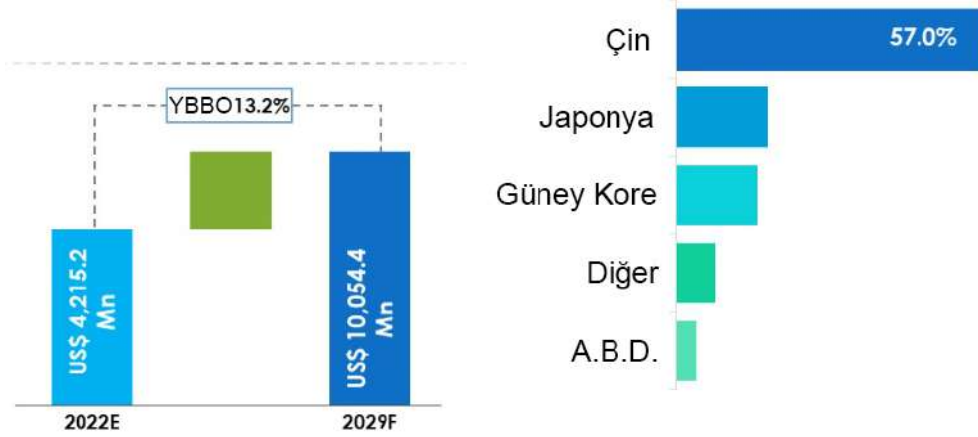
Japonya ve diğer Asya-Pasifik ülkelerinde elektrikli motosikletlere olan talebin artması nedeniyle Li iyon pillerine olan talep yüksektir. Ayrıca, Li iyon pillerle çalışan dört tekerlekli elektrikli araçların sayısı son yıllarda hızla artmıştır. Buna ek olarak, elektrikli araç pilleri Çin, Güney Kore ve Japonya'nın hızla yükselen otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmakta ve elektrikli araç talebini artırmaktadır.

Hükümetlerin elektrikli araçları teşvik etmek için yaptığı çabalar meyvelerini vermektedir. Japonya'da, hükümet elektrikli araç satın alımlarında daha düşük vergi oranları ve teşvikler gibi politikalar uygulamıştır. Hükümet, 2050 yılına kadar Japonya'da satılan tüm otomobillerin en az kısmen elektrikle çalışmasını hedeflemiştir. Bu faktörler nedeniyle Japonya ve Güney Kore'nin 2029 yılına kadar toplamda yaklaşık 2,88 milyar \$ bir seviyeye ulaşması beklenmektedir.

Çin'in 2029 yılı sonunda tahmini olarak 6,37 milyar \$ bir değere ulaşması beklenmektedir. Li iyon batarya elektrolitleri genel pazarında, Çin, ülkedeki önemli üretici ve tüketici birimlerin varlığı ve çeşitli büyüyen son kullanıcı endüstrileri nedeniyle Li iyon pil elektrolitlerinin önde gelen üretici ve tüketicisidir (Tablo 3).

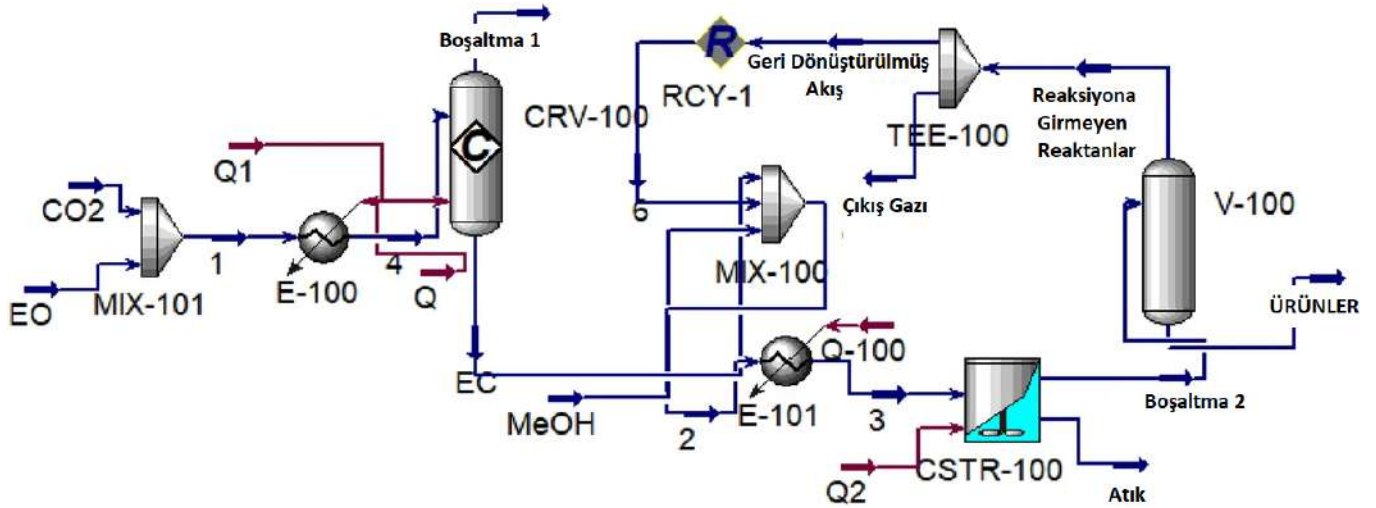
Çin, pazar payı açısından önümüzdeki dönemde dünya çapındaki Li iyon elektrolit pazarındaki üstünlüğünü sürdüreceği öngörülmektedir (Şekil 11). Tüketici elektroniğine olan artan bağımlılık, Li iyon pillerle çalışan cihazların üretiminde bir artışa neden olmuş ve bu da son yıllarda elektrolit endüstrisinde önemli bir büyümeye yol açmıştır.

Sıvı elektrolitler pazarının, 2022'den 2029'a kadar 5,83 milyar \$ (%13,2) mutlak bir fırsat yaratması beklenmektedir. Li iyon pillerde elektrolit tüketim trendleri dünya genelinde bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir. Çin, bu elektrolitlerinin çoğunu tüketmektedir. Form açısından, sıvı form en çok tüketilen ürün formudur. Üstün performansı ve pil eşdeğerlerine göre geniş uygulama alanı nedeniyle, sıvı elektrolitin önemli bir büyüme görmesi beklenmektedir. Öncelikle, sıvı elektrolit tüm Li iyon pillerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Üreticiler, hammadde temininin kolaylığı ve üretim açısından sıvı elektrolitleri tercih etmektedir.

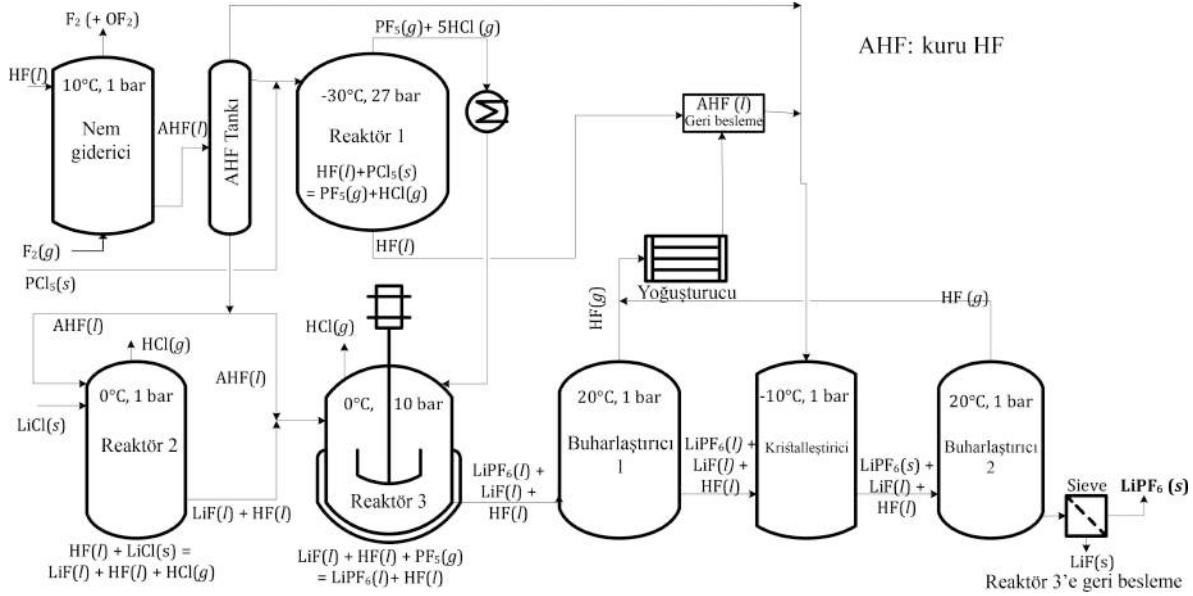


Şekil 11. Elektrolit pazarında önde gelen ülkeler (Future Market Insights 2022)

Bu veriler içerisinde ne yazık ki, Türkiye bulunmamaktadır. Ülkemizde solvent veya tuz üretim konusunda bir üretim bulunmamaktadır. Ancak ülkemiz petrokimya ürünleri üretiminde önemli bir altyapıya sahiptir. Örnek vermek gerekirse etilen karbonat üretmek için etilen okside ihtiyaç vardır. Ülkemizde ciddi miktarda etilen oksit üretimi yapılmaktadır ancak bu doğrudan süreç içerisinde mono etilen glikol (MEG) üretimi için kullanılmaktadır. 2021 verilerine göre Petkim Aliğa Kompleksi bünyesinde kapasite senede 89.000 tondur. Buna ek olarak, etilen ve propilen üretim kapasiteleri de sırasıyla 588.000 ve 144.000 ton/yıl'dır (Petkim 2021 Faaliyet Raporu). Bu açıdan bakıldığında, yeterli bir talep olması durumunda, Li iyon elektrolit solventlerinin üretimini mümkün olduğu görülmektedir. EC ve LiF₆P üretim akış şemaları Şekil 12 ve 13'te verilmiştir. Süreçlerin kendince zorlukları olsa da çok karmaşık adımları yoktur.



Şekil 12. Etilen karbonat üretim akış şeması (Maleki ve Bahadori, 2023)



Şekil 13. LiPF₆ üretim akış şeması (Susarla vd. 2019)

3.2. Engelleri/Zorlukları Aşma Stratejisi

Bu bölümde, Li iyon pillerin elektrolitlerine yönelik teknik ve ekonomik sorunlar ele alınmaktadır. Li iyon pillerin elektrolitlerinin üretimi, yüksek saflık gereksinimleri ve karmaşık kimyasal süreçler nedeniyle teknik zorluklarla karşı karşıyadır. Özellikle katı elektrolitler gibi yeni teknolojilerin geliştirilmesi, üretim sürecini daha karmaşık hale getirmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, şirketler sürekli olarak üretim süreçlerini iyileştirmekte ve otomasyon teknolojilerini benimsemektedir. Örneğin, robotik sistemler, elektrolit üretiminde daha hassas ve tutarlı sonuçlar elde etmeye yardımcı olabilir.

Ayrıca, hammaddenin teminindeki güvenilirlik, elektrolit üretimini etkileyen bir başka önemli faktördür. Lityum ve diğer hammaddelerin fiyat dalgalanmaları, üretim maliyetlerini arttırmaktadır. Bu sorunu aşmak için, şirketler hammadde tedarikçisini çeşitlendirmeye ve daha sürdürülebilir kaynaklardan temin etmeye çalışmaktadır.

Enerji yoğun bir endüstri olan elektrolit üretimi, çevresel etkileri göz önünde bulundurmaya gerektirir. Sürdürülebilir üretim süreçleri ve yeşil kimya prensiplerine dayalı yaklaşımlar, çevresel etkileri azaltmaya yardımcı olabilir. Bu, hem endüstri hem de akademik dünya için önemli bir araştırma alanıdır.

Elektrolitlerin zamanında teslim edilmesi, elektrikli araç üreticileri için kritik bir öneme sahiptir. Dağıtım sorunları, üretim hattının durmasına ve ek maliyetlere neden olabilir. Özellikle talep dalgalanmaları ve lojistik sorunlar, dağıtım sürecini karmaşıktırabilir. Bu nedenle, endüstri, tedarik zinciri yönetimini iyileştirmeye yönelik çözümler aramaktadır. Bunun bir örneği, daha akıllı envanter yönetimi sistemlerinin kullanılmasıdır. Bu sistemler, talebi daha iyi tahmin ederek stok seviyelerini optimize edebilir ve böylece dağıtım süreçlerini düzene koyabilir. Ayrıca, lojistik ağlarının geliştirilmesi ve daha etkili taşıma yöntemlerinin benimsenmesi de dağıtım sorunlarını azaltabilir.

Elektrolitlerin kullanımı, bataryaların performansını etkileyen kritik bir faktördür. Özellikle yüksek ve düşük sıcaklık koşullarında elektrolitlerin performansı azalabilir. Bu, elektrikli araçların soğuk kış günlerinde menzil kaybına uğramasına veya aşırı sıcak hava koşullarında aşırı ısınmasına neden olabilir. Bu sorunu çözmek için, elektrolitlerin daha geniş bir sıcaklık aralığında stabil olmasını sağlamak amacıyla kimya temel bilimi, kimya ve malzeme mühendisliği çalışmaları yürütülmektedir. Örneğin, elektrolit formülasyonlarında katkı maddeleri eklemek, sıcaklık performansını artırabilir.

Li iyon bataryaların elektrolitlerinin ömrü sona erdiğinde, geri dönüşüm süreci hem çevresel hem de ekonomik açıdan büyük bir öneme sahiptir. Elektrolitlerde bulunan değerli malzemelerin geri kazanılması, hammaddenin tasarruf edilmesine ve çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlar. Ancak, elektrolitlerin geri dönüşümü karmaşık bir süreçtir ve bazı zorluklarla karşı karşıyadır. Öncelikle, elektrolitlerin geri dönüşümü için uygun teknolojilerin geliştirilmesi gereklidir. Elektrolitlerde bulunan lityum tuzları, çözünmez katılar halinde olabilir, bu da geri dönüşüm sürecini zorlaştırır. Bu

sorunu çözmek için kimyasal ayrıştırma ve elektrokimyasal yöntemler gibi yenilikçi teknolojiler geliştirilmektedir. Ayrıca, geri dönüşüm sürecinin ekonomik açıdan sürdürülebilir olması önemlidir. Elektrolitlerdeki değerli malzemelerin geri kazanılması maliyetli olabilir, bu nedenle geri dönüşüm sürecini ekonomik olarak cazip hale getirmek için teşvikler ve destekler gerekebilir. Özellikle lityum gibi stratejik öneme sahip hammaddelerin geri dönüşümü, enerji bağımsızlığını ve kaynakların daha etkili kullanımını teşvik edebilir.

Elektrolitlerin güvenli bir şekilde geri dönüşümü, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşır. Atık elektrolitlerin güvenli bir şekilde bertaraf edilmemesi, çevreye zarar verebilir. Bu nedenle, elektrolit geri dönüşümünün düzenlenmesi ve denetlenmesi gereklidir. Şirketler, yerel düzenlemelere ve çevresel standartlara uygun olarak geri dönüşüm süreçlerini uygulamalıdır.

Geri dönüşüm, Li iyon bataryaların sürdürülebilir bir enerji depolama çözümü olarak kabul edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, endüstri ve akademik dünya, elektrolitlerin etkili bir şekilde geri dönüşümü için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmaları yapmalıdır.

Üretim, dağıtım, kullanım ve geri dönüşüm aşamalarındaki sorunlar, elektrikli araç endüstrisinin karşılaştığı zorluklar arasında yer alıyor. Elektrolitler, bu endüstrinin sürdürülebilirlik ve performans hedeflerini belirleyen temel bir unsur olarak öne çıkıyor. Hem akademisyenler hem de şirketler, daha verimli üretim süreçleri, güvenilir dağıtım, geniş sıcaklık aralığına dayanıklı elektrolitler ve ekonomik geri dönüşüm teknolojileri gibi çözümler arayarak bu sorunların üstesinden gelmeye yönelik çalışmalarını sürdürmelidir. Bu çabalar, Li iyon bataryaların gelecekte elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemleri için daha etkili ve çevre dostu bir çözüm haline gelmesine katkı sağlayacaktır.

3.3. Elektrolitlerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)

Li iyon pillerin yaşam döngüsü değerlendirilirken elektrolitlerle ilgili olarak yapılan yaşam döngüsü değerlendirme (YDD), bu enerji depolama sistemlerinin çevresel etkisini değerlendirirken dikkate alınması gereken önemli bir hususlardan birisidir. YDD, hammaddeden imalata, kullanıma ve kullanım ömrü sonunda atıkların bertarafına kadar ürün veya teknolojiyle ilişkili çevresel yükleri kapsamlı bir şekilde analiz etmeyi amaçlar.

Li iyon pilleri değerlendirirken, elektrolit seçimi de çevresel performanslarını belirlemede kritik bir rol oynar. Elektrolitler genellikle çeşitli çözücüler, tuzlar ve katkı maddelerinden oluşur ve her biri farklı çevresel sonuçlara sahip olabilir. Örneğin, çözücülerin seçimi, elektrolitin toksisite ve yanıcı özelliklerini etkileyebilir. Ayrıca, tuz ve katkı maddesi seçimi, imalat ve atıklama aşamalarında kaynak tükenmesi, enerji tüketimi ve potansiyel çevresel emisyonlar üzerinde etkili olabilir.

Elektrolitin tüm yaşam döngüsünün, hammadde temini, üretim süreçleri ve atık yönetimi uygulamalarının dikkate alınması önemlidir. Elektrolitler için gerekli olan lityum ve diğer metallerin çıkarılması ve işlenmesi, habitat tahribatı, su kirliliği ve sera gazı emisyonları gibi çevresel sonuçlara yol açabilir. Çözücü arıtma ve elektrolit formülasyonu gibi imalat süreçleri, enerji tüketimine, emisyonlara ve atık oluşumuna katkıda bulunabilir.

Ayrıca, Li iyon pillerin ve elektrolitlerinin kullanım ömrü yönetimi, çevresel etkileri en aza indirmek için kritiktir. Pillerin, elektrolit bileşenleri dahil olmak üzere uygun şekilde geri dönüşümü ve bertarafı, toksik veya yanıcı maddelerle ilişkili olası tehlikelerin azaltılmasına ve zararlı maddelerin çevreye salınmasının önlenmesine yardımcı olabilir.

Li iyon pillerin çevresel sürdürülebilirliğini değerlendirmek için YDD'ler, farklı elektrolit bileşimleri, imalat süreçleri ve kullanım ömrü senaryolarıyla ilişkili çevresel etkileri nicelendirmek ve karşılaştırmak için yapılabilir. Bu değerlendirmeler, araştırmacılar, politika yapıcılar ve endüstri paydaşları için, daha çevre dostu elektrolitlere sahip Li iyon pillerin geliştirilmesi, üretimi ve kullanımı konusunda bilinçli kararlar vermek için değerli bilgiler sağlar.

Li iyon silindirik piller için çeşitli YDD'ler yapılmıştır. Elektrolitin çevresel etkileri olmakla beraber bütün pil bileşenleri arasında etkisi düşük kalmaktadır. Temelde elektrolitlerde lityum tuzu ve solventler bulunmaktadır. Lityum kritik bir bileşen olmakla beraber kütleye daha çok katot içerisinde kullanılmaktadır ve diğer metallerle göre etkisi daha azdır.

Lityum cevheri elde edilmesi ile ilgili YDD çalışmalarında, uygun koşullar altında yapılan bir tuz göleti çıkarımı dikkate alınmıştır (Falcone vd. 2022). Buna göre küresel ısınma potansiyeli (KIP) lityum için $4,5 \text{ kg}_{\text{CO}_2} / \text{kg}_{\text{Li}}$ olarak hesaplanmıştır. Sürecin enerji ihtiyacı (Eİ) $31,15 \text{ MJ} / \text{kg}_{\text{Li}}$ bulunmuştur. Lityum cevherinin enerji ihtiyacı diğer pil cevherlerinin enerji ihtiyacının %1'ine denk düşmektedir (kobalt %74 ile en yüksek değere sahiptir). Benzer bir şekilde lityum cevherinin KIP değeri diğer cevherlere göre %2 gibi düşük bir paya sahiptir (en yüksek etki %60 ile kobalt).

Cevherler elde edildikten sonra işlenerek pil malzemesi haline çevrilmektedir. Bu işlemde de lityum tuzunun KIP değeri 12,15 kg_{CO2} / kg_{LiPF6}'dır (bütün pilde %4'lük bir pay). Eİ değeri ise 170 MJ / kg_{LiPF6}'dır (bütün pilde %4'lük bir pay). Elektrolit solventi için KIP değerleri, 1,72 kg_{CO2} / kg_{DMC} ve 0,47 kg_{CO2} / kg_{EC}'dir (bütün pilde %1,5'lik bir pay). Eİ değerleri ise 37,44 MJ/kg_{DMC} ve 10,19 MJ/kg_{EC}'dir (bütün pilde %2'lik bir pay). Bu aşamada da katot en büyük paya sahiptir.

Her ne kadar elektrolitin etkisi diğer bileşenlere göre düşük olsa da tuz ve solventlerin üretimi ve işlenmesi enerji yoğun süreçlerdir. Elektrolit çözücüsü için daha verimli bir süreç tasarlanabilir. %100 EC'den oluşan bir elektrolit çözücüsünün kullanımı, hem enerji talebinde büyük bir azalmaya (Eİ = % -72,78) hem de CO₂ emisyonlarında büyük bir azalmaya (KIP = % -72,67) neden olur. Elektrolit tuzunun üretimi gibi süreçler, çeşitli termal, kimyasal ve elektrokimyasal aşamaları içerdiğinden çok enerji yoğunudur. Bu işlemler, son bileşenlerin kalitesi için temel olduğundan, enerji talebini azaltmanın tek mümkün seçeneği, en verimli mevcut endüstriyel tesislerin kullanılmasıdır.

4. ELEKTROLİTLER İÇİN TEKNOLOJİ YOL HARİTASI

Teknoloji açısından, katı hal bataryaları temel bir değişimi temsil etmektedir. Günümüz Li iyon pillerinde, iyonlar bir elektrotten diğerine (ayrıca iyonik iletkenlik olarak da bilinen) sıvı elektrolit üzerinden hareket eder. Tüm katı hal bataryalarda ise sıvı elektrolit yerine lityum iyonlarının hala içinde hareket etmesine izin veren katı bir madde kullanılır. İlk önemli fayda, katı elektrolitlerin sıvı muadillerine kıyasla ısındığında yanıcı olmamasıdır. Ayrıca, ileri teknoloji, yüksek voltajlı, yüksek kapasiteli malzemelerin kullanımını mümkün kılarak, daha yoğun, daha hafif ve azalan özdeşerj nedeniyle daha uzun raf ömrüne sahip piller elde edilmesini sağlar. Ayrıca, daha düzenli mekanik ve termal güvenlik yönetimi gibi sistem düzeyinde ek faydalar sunar, bu da incelenen pazar için birçok fırsatın kapısını aralamaktadır.

Li iyon bataryalar, elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemleri gibi birçok uygulama için ana enerji kaynağı olarak kullanılırken, katı elektrolitler bu teknolojinin evriminde önemli bir rol oynuyor. Katı elektrolitler, geleneksel sıvı elektrolitlere kıyasla bir dizi avantaj sunmaktadır. Öncelikle, katı elektrolitlerin daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaları, daha fazla enerji depolama kapasitesi sağlamaktadır. Ayrıca, katı elektrolitlerin daha yüksek termal kararlılığı, bataryaların daha güvenli ve dayanıklı olmasına olanak tanır.

Katı elektrolitler arasında özellikle polimer, seramik oksit, sülfür ve hibrit elektrolitler dikkat çekmektedir. Polimer elektrolitler, esneklikleri ve işlenebilirlikleri nedeniyle önemlidir ve daha hızlı üretim süreçlerine imkan verir. Seramik oksit elektrolitler, yüksek iletkenlikleri sayesinde bataryaların hızlı şarj edilmesine olanak tanır. Hibrit elektrolitler ise seramik ve polimerin birleşimiyle hem iyi mekanik dayanıklılık hem de yüksek iletkenlik sağlarlar. Bu nedenle, gelecekteki batarya teknolojileri için büyük bir potansiyele sahiptirler.

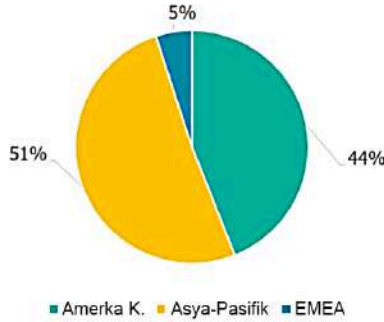
Günümüzde, katı elektrolitlerin araştırma ve geliştirme çalışmaları büyük ölçüde Asya-Pasifik bölgesinde yoğunlaşmış durumdadır (LUX Research 2023, Şekil 14). Bu bölgedeki ülkeler, katı elektrolit teknolojilerine büyük yatırımlar yapmakta ve önemli yenilikler sağlamaktadır. Özellikle Japonya ve Güney Kore, katı elektrolitlerin geliştirilmesi konusunda lider konumdadır. Bu ülkeler, yüksek kaliteli seramik elektrolitlerin üretiminde önemli ilerlemeler kaydetmişlerdir.

Amerika kıtası da katı elektrolit teknolojilerine önem vermektedir. Özellikle ABD, batarya teknolojilerine büyük yatırımlar yaparak katı elektrolit araştırma projelerine destek vermektedir. Avrupa da katı elektrolitlerin geliştirilmesi konusunda aktif bir şekilde çalışmaktadır ve bu alandaki araştırma projelerine önemli fonlar tahsis etmektedir (Şekil 15) (Int. Kyn. 1). Bu bölgelerdeki araştırma ve geliştirme faaliyetleri, katı elektrolit teknolojilerinin geliştirilmesine ve ticarileştirilmesine önemli katkılarda bulunmaktadır.

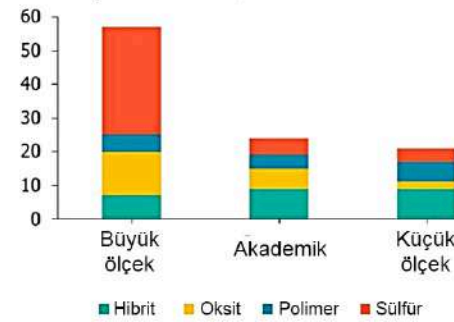
Şu anki durumda, endüstri büyük ölçüde sülfür bazlı katı elektrolitlere odaklanmış durumdadır. Sülfür bazlı elektrolitler, yüksek iletkenlikleri nedeniyle cazip bir seçenek olarak görülmektedir. Bu elektrolitler, lityum metal anotların kullanılmasına olanak tanıyarak daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryaların geliştirilmesine olanak sağlar. Bu da elektrikli araçların menzilinı artırabilir ve daha hızlı şarj edilebilir bataryaların kullanılmasına olanak tanır.



Katı Elektrolit Çalışmaları Bölge

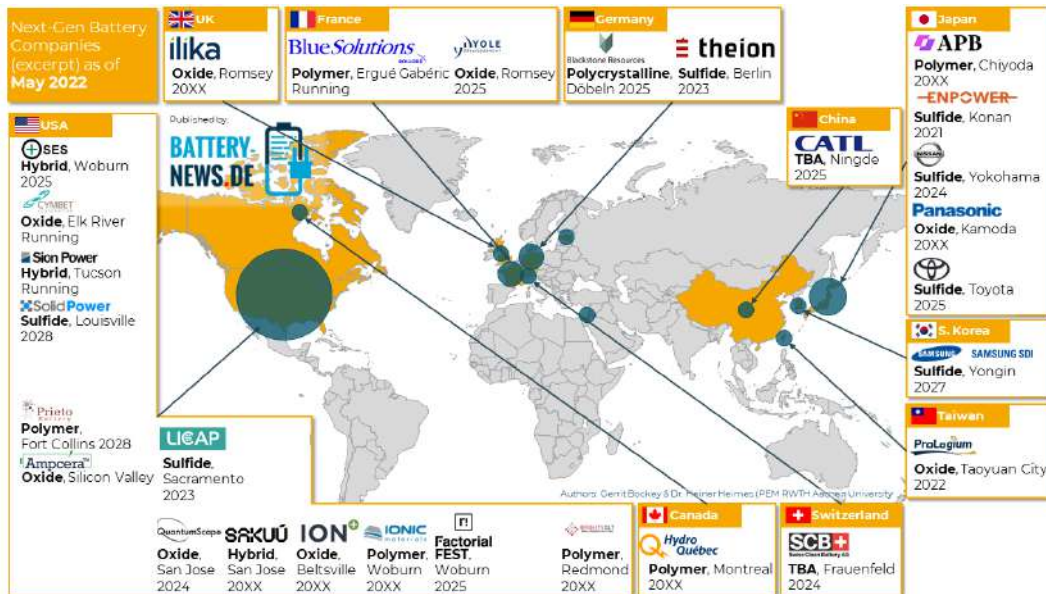


Katı Elektrolit Çalışmaları Kurum tipi

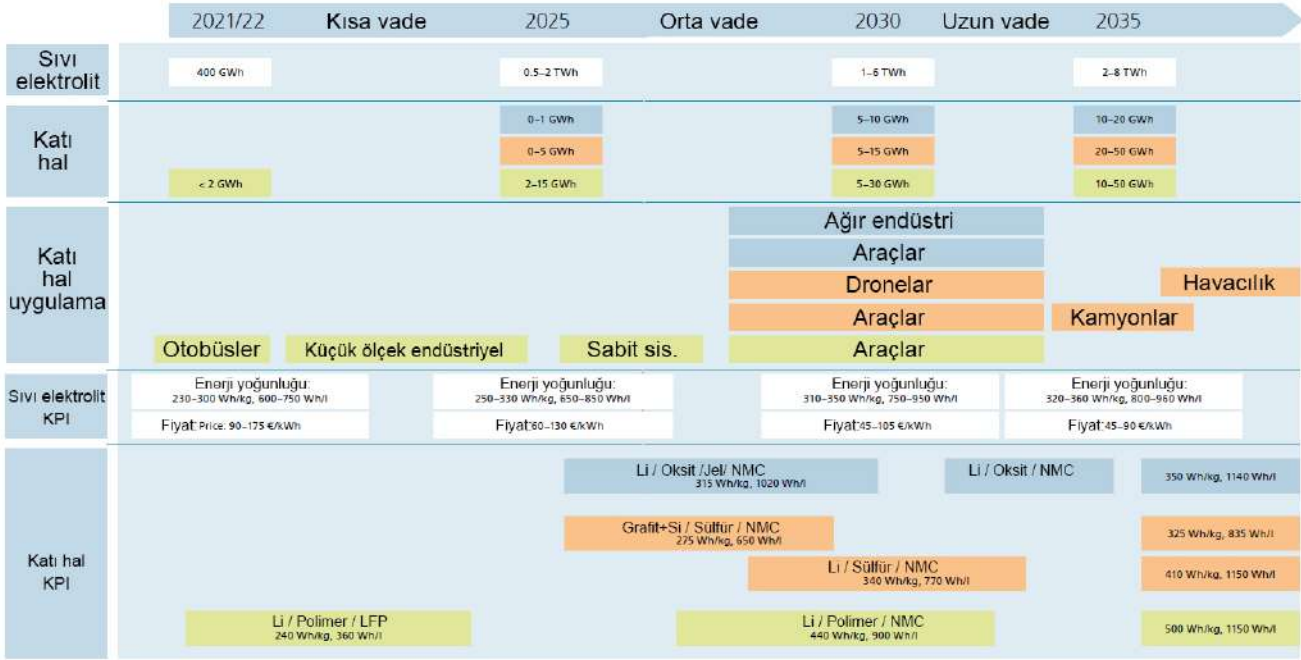


Şekil 14. Katı elektrolit pazarı ve alanları (LUX Research 2023).

Ancak, akademik dünya ve küçük ölçekli şirketler hibrit elektrolitlere daha fazla ilgi göstermektedir. Hibrit elektrolitler, üretim süreçlerinin daha kolay olması ve iletkenlikte yüksek potansiyel sunması nedeniyle gelecekteki batarya teknolojileri için büyük bir umut taşımaktadır. Özellikle seramik elektrolitlerin yüksek iletkenlik özellikleri, enerji yoğun ve hızlı şarj edilebilir bataryaların geliştirilmesine olanak tanır. Bu, elektrikli araçların daha uzun menzile sahip olmasına ve daha hızlı şarj edilmesine imkan verir. Teknolojik hazırlık seviyesi açısından sıvı ve jel elektrolitli piller olgunluğa ulaşmış ve senelerdir ticari olarak pazarda yerini almıştır. Katı elektrolitli piller ise geniş bir alanda ilgi görmektedir. Bu konuda birçok prototip ortaya çıkmıştır. Bu açıdan THS seviyesi 5+ denebilir. Bu konuda çok iddialı hedefler vardır ve 10 sene içerisinde büyük ölçekte üretimin olacağı öngörülmektedir (Şekil 16).



Şekil 15. Dünyada yeni nesil elektrolit şirketler ve çalışma konuları (Int. Kyn. 2).



Şekil 16. Sıvı ve katı elektrolitli pillerin yol haritası ve katı hal pillerin teknoloji hazırlık seviyesi (Fraunhofer ISI, 2023) (beyaz: sıvı, yeşil: polimer, kırmızı: sülfür, mavi: oksit)

5. ÖNERİLER

Katı elektrolitlerin Li-iyon bataryalarının geleceği üzerindeki etkisi oldukça umut vericidir. Bu teknolojinin gelişimine yönelik hızla ilerleyen bir dizi gelişme ve beklenti bulunmaktadır. Öncelikle, hibrit elektrolitlerin daha fazla araştırılması ve ticarileştirilmesi beklenmektedir. Bu, katı elektrolit teknolojisinin daha geniş çapta benimsenmesine ve özellikle elektrikli araçlar için daha verimli ve güvenli bataryaların üretimine olanak sağlayacaktır.

Ayrıca, katı elektrolitlerin kullanılması, enerji depolama alanında çığır açacak yeniliklerin yolunu açacaktır. Bu yenilikler, enerji yoğunluğu daha yüksek bataryaların geliştirilmesini ve elektrikli araçların menzilin artırılmasını sağlayabilir. Ayrıca, hızlı şarj teknolojilerinin geliştirilmesi, elektrikli araçların daha yaygın ve kullanıcı dostu hale gelmesine olanak tanır.

Katı elektrolitlerin geleceği sadece enerji depolama alanında değil, aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkili bir şekilde kullanılmasına da katkı sağlayabilir. Bu teknoloji, güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi gibi dalgalı enerji kaynaklarının depolanmasını ve istikrarlı bir şekilde kullanılmasını destekleyebilir.

Sonuç olarak, katı elektrolit teknolojisi, Li iyon bataryalarının geleceğini parlak bir şekilde şekillendiriyor. Araştırma ve geliştirme çalışmalarının artmasıyla birlikte, katı elektrolitlerin daha fazla uygulama alanı bulması ve endüstri standartlarına ulaşması muhtemel görünüyor. Bu da gelecekte daha güvenli, daha verimli ve daha sürdürülebilir enerji depolama çözümlerinin kapılarını aralayacak ve elektrikli araçlar gibi önemli sektörlerde büyük bir dönüşümü tetikleyecektir.

Ancak bu geçiş sürecinin zaman alacağını unutmamak önemlidir. Katı elektrolitlerin ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılabilir hale gelmesi için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışması gerekmektedir. Bu süreçte, geleneksel sıvı elektrolitlere olan ihtiyaç devam edecektir. Bu nedenle, lityum iyon bataryaların geleceğine yönelik bu önemli adımlar atılırken, şu anki teknolojinin güncellenmesi ve iyileştirilmesi için çaba sarf edilmeye devam edecektir. Bu, enerji depolama çözümlerinin kesintisiz bir geçişle daha yüksek verimlilik ve güvenlik sağlamasına yardımcı olacaktır.



KAYNAKLAR

- Abe, K., Takaya, T., Yoshitake, H., Ushigoe, Y., Yoshio, M., ve Wang, H., 2004. Functional Electrolyte: Additives for Improving the Cyclability of Cathode Materials. *Electrochem. Solid-State Lett.*, 7, A462.
- An, S.J., Li, J., Daniel, C., Mohanty, D., Nagpure, S., Wood, D.L., 2016. The state of understanding of the lithium-ion-battery graphite solid electrolyte interphase (SEI) and its relationship to formation cycling. *Carbon*, 105, 52-76.
- Arbi, K., Rojo, J. M., & Sanz, J., 2007. Lithium mobility in titanium based Nasicon $\text{Li}_{1+x}\text{Ti}_{2-x}\text{Al}_x(\text{PO}_4)_3$ and $\text{LiTi}_{2-x}\text{Zr}_x(\text{PO}_4)_3$ materials followed by NMR and impedance spectroscopy. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(13–15), 4215-4218.
- Barbosa, J.C., Gonçalves, R., Costa, C.M., ve Lanceros-Méndez, S., 2022. Toward Sustainable Solid Polymer Electrolytes for Lithium-Ion Batteries. *ACS Omega*, 7(17), 14457-14464.
- Baskoro, F., Wong, H.Q., ve Yen, H-J., 2019. Strategic Structural Design of a Gel Polymer Electrolyte toward a High Efficiency Lithium-Ion Battery. *ACS Appl. Energy Mater.*, 2(6), 3937-3971.
- Bohnke, O., 2008. The fast lithium-ion conducting oxides $\text{Li}_3\text{xLa}_{2/3-x}\text{TiO}_3$ from fundamentals to application. *Solid State Ionics*, 179(1–6), 9-15.
- Cao, C., Li, Z.-B., Wang, X.-L., Zhao, X.-B., & Han, W.-Q., 2014. Recent advances in inorganic solid electrolytes for lithium batteries. *Frontiers in Energy Research*, 27 June 2014.
- Choi, N-S., Yew, K.H., Lee, K.Y., Sung, M., Kim, H., ve Kim, S-S., 2006. Effect of fluoroethylene carbonate additive on interfacial properties of silicon thin-film electrode. *Journal of Power Sources*, 161(2), 1254-1259.
- Cuisinier, M., Dupré, N., ve Guyomard, D., 2014. Control of LiFePO_4 air-aging through the use of electrolyte additive. *Electrochemistry Communications*, 38, 138-141.
- Falcone, M., Quattromini, N. F., Rossi, C., & Pulvirenti, B., 2022. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Pack Unit Made of Cylindrical Cells. *Batteries*, 8(8), 76.
- Fraunhofer ISI, Solid-State Battery Roadmap 2035+, 2022.
- Future Market Insights, 2022. Global Lithium and Lithium Ion Battery Electrolyte Market Analysis 2022-2029.
- Golubkov, A.W., Fuchs, D., Wagner, J., Wiltsche, H., Stangl, C., Fauler, G., Voitic, G., Thaler, A., Hacker, A., 2014. Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. *RSC Adv.*, 4, 3633.
- Jephcott, B., 2023. Lithium hexafluorophosphate market research report. Golden Dragon Capital.
- Kanno, R., T. Hata, Y. Kawamoto, ve M. Irie, 2000. Synthesis of a new lithium ionic conductor, thio-LISICON–lithium germanium sulfide system. *Solid State Ionics*, 130(1–2), 97-104.
- Klongkan, S., & Pumchusak, J. (2015). Effects of Nano Alumina and Plasticizers on Morphology, Ionic Conductivity, Thermal and Mechanical Properties of PEO-LiCF₃SO₃ Solid Polymer Electrolyte. *Electrochimica Acta*, 161, 171-176.
- Kuganathan, N., Rushton, M. J. D., Grimes, R. W., Kilner, J. A., Gkanas, E. I., & Chroneos, A. , 2021. Self-diffusion in garnet-type $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ solid electrolytes. *Scientific Reports*, 11, 451.
- Lee, C.-H., Joo, K. H., Kim, J. H., Woo, S. G., Sohn, H.-J., Kang, T., Park, Y., & Oh, J. Y., 2002. Characterizations of a new lithium ion conducting $\text{Li}_2\text{O}-\text{SeO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$ glass electrolyte. *Solid State Ionics*, 149(1–2), 59-65.
- Li, J., Ma, C., Chi, M., Liang, C., & Dudney, N. J., 2015. Solid Electrolyte: the Key for High-Voltage Lithium Batteries. *Advanced Energy Materials*, 5(4), 1401408.
- Liu, W., Lee, S. W., Lin, D., Shi, F., Wang, S., Sendek, A. D., & Cui, Y. (2017). Enhancing ionic conductivity in composite polymer electrolytes with well-aligned ceramic nanowires. *Nature Energy*, 2, 17035.
- Liu, J., Wang, T., Yu, J., Li, S., Ma, H., & Liu, X., 2023. Review of the Developments and Difficulties in Inorganic Solid-State Electrolytes, *Materials*, 16(6), 2510.
- Long, L., Wang, S., Xiao, M., ve Meng, Y., 2016. Polymer electrolytes for lithium polymer batteries. *J. Mater. Chem. A*, 4, 10038-10069.
- Lu, R., Rao, D., Meng, Z., Zhang, X., Xu, G., Liu, Y., Kan, E., Xiao, C., ve Deng, K., 2013. Boron-substituted graphyne as a versatile material with high storage capacities of Li and H₂: a multiscale theoretical study. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 15, 16120-16126.
- LUX research, 2023. Solid state battery technology landscape.
- Lv, R., Yang, J., Wang, J., ve NuLi, Y., 2011. Electrodeposited porous-microspheres Li-Si films as negative electrodes in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 196(8), 3868-3873.



- Maleki, A., Bahadori, F. Simulation and multi-objective optimization of the dimethyl carbonate production process. *Sci Rep* 13, 16900 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44100-y>
- Ortner, T.S., 2021. A granular look at solid electrolyte interfaces in lithium-ion batteries. *Communications Chemistry*, 4, 79.
- Petkim 2021 Faaliyet Raporu, 2021, https://www.petkim.com.tr/assets/uploads/faaliyet/petkim_faaliyet_raporu_2021.pdf.
- Saal, A., Hagemann, T., ve Schubert, U.S., 2021. *Polymers for Battery Applications—Active Materials, Membranes, and Binders*. Volume 11, Issue 43, 2001984.
- Sasaki, T., Abe, T., Iriyama, Y., Inaba, M., ve Ogumi, Z., 2005. Suppression of an Alkyl Dicarboxate Formation in Li-Ion Cells. *J. Electrochem. Soc.*, 152, A2046.
- Seino, Y., Takada, K., Kim, B.-C., Zhang, L., Ohta, N., Wada, H., Osada, M., & Sasaki, T., 2006. Synthesis and electrochemical properties of $\text{Li}_2\text{S}-\text{B}_2\text{S}_3-\text{Li}_4\text{SiO}_4$. *Solid State Ionics*, 177(26–32), 2601-2603.
- Susarla, N., ve Ahmed S., 2019. Estimating Cost and Energy Demand in Producing Lithium Hexafluorophosphate for Li-Ion Battery Electrolyte. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 58, 9, 3754–3766.
- Takeuchi, T., Noguchi, S., Morimoto, H., ve Tobishima, S., 2010. Carbonate-modified siloxanes as solvents of electrolyte solutions for rechargeable lithium cells. *Journal of Power Sources*, 195(2), 580-587.
- Thangadurai, V., Narayanan, S., & Pinzaru, D. 2014. Garnet-type solid-state fast Li ion conductors for Li batteries: critical review. *Chemical Society Reviews*, 43, 4714-4727.
- Wang, R-H., Li, X-H., Wang, Z-X., Guo, H-J., ve He, Z-J., 2015. Electrochemical Analysis for Enhancing Interface Layer of Spinel $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$: p-Toluenesulfonyl Isocyanate as Electrolyte Additive. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 7(42), 23605-23614.
- Wang, J., Zheng, Q., Fang, M., Ko, S., Yamada, Y., Yamada A., 2021. Concentrated Electrolytes Widen the Operating Temperature Range of Lithium-Ion Batteries. *Advanced Science*, 8-18, 2101646.
- Wrodnigg, G.H., Besenhard, J.O., ve Winter, M., 1999. Ethylene Sulfite as Electrolyte Additive for Lithium-Ion Cells with Graphitic Anodes. *J. Electrochem. Soc.*, 146, 470.
- Wu, X., Pan, K., Jia, M., Ren, Y., He, H., Zhang, L., ve Zhang, S., 2019. Electrolyte for lithium protection: From liquid to solid. *Green Energy & Environment*, 4(4), 360-374.
- Xu, S-D., Zhuang, Q-C., Wang, J., Xu, Y-Q., ve Zhu, Y-B., 2013. New Insight into Vinylethylene Carbonate as a Film Forming Additive to Ethylene Carbonate-Based Electrolytes for Lithium-Ion Batteries. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 8, 8058-8076.
- Zhu, Y., Casselman, M.D., Li, Y., Wei, A., ve Abraham, D.P., 2014. Perfluoroalkyl-substituted ethylene carbonates: Novel electrolyte additives for high-voltage lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 246, 184-191.

İnternet Kaynakları

- [1] <https://www.battery-atlas.eu>, 12.12, 2023.



POLİMERİK BAĞLAYICILAR

Ö. S. Taşkın¹[+], M. E. Çetintaşoğlu¹, E. Güzel², H. A. Karahan Toprakçı³, O. Toprakçı³

ÖZET

Polimerik bağlayıcılar, elektrotların üretimi sırasında toz halindeki anot aktif malzemelerin bakır folyo veya yine toz halindeki katot aktif malzemelerin alüminyum folyo üzerine yayılıp kaplanmasını sağlamak için kullanılırlar. Bağlayıcıların ilk ve öncelikli fonksiyonu toz halindeki aktif malzemeleri bir arada tutmaktır. Bu yönüyle bağlayıcılar toz partiküller arasında bağlayıcı yani tutkal görevi görürler. Aktif malzemeler ile bağlayıcılar bir araya geldiğinde viskoz bir çamur oluşur. Bu çamur içerisine elektrik iletkenliğini artırmak için iletkenlik sağlayıcı aktif karbon gibi tozlar katılır. Bağlayıcıların diğer bir özelliği de bu çamurun içerisine katılan anot/katot aktif malzeme ve iletkenlik yapıcı malzemelerin çamur içerisinde homojen dağılmasına yardımcı olmak ve çamurun viskozitesini koruyarak folyo üzerine homojen kalınlıkta kaplanıp folyo ile olan ara yüzeydeki yapışmayı sağlamaktır.

Anot veya katot elektrotun hazırlanması aşamasında çamurun homojen olarak folyolar üzerine kaplanmasından sonraki işlem kurutma işlemi olup bağlayıcının ısı etkiler altında bozulmaması gereklidir. Kurutma sonrasında ise elektrotlar sıkıştırma işlemine tabi tutulurlar ki bu aşamalarda kaplamanın ısı ve mekanik etkilere dayanımının yüksek olması gereklidir.

Elektrotun Li-iyon bataryanın kullanımı sırasında yapısal bütünlüğünü koruması gerek performans gerek güvenlik açısından kritik öneme sahiptir. Elektrot yapısında güvenilir ve iyi bir çevrim performansı elde etmek için bağlayıcıların ve katkı malzemelerinin doğru seçimi ve doğru miktarlarda kullanılması önemlidir. Bu bağlayıcıların elektrokimyasal kararlılığı ile şarj/deşarj işlemleri sırasında meydana gelen mekanik sıkışmayı esnek bir şekilde karşılaması önemlidir. Ticari bataryalarda yoğunlukla poli(vinilidenflorür) (PVDF) gibi geleneksel polimer bağlayıcılar kullanılsa da zayıf mekanik özellikleri ve termal stabiliteleri nedeni ile yeni nesil anot malzemeleri için uygun değildir. Bu dezavantajlarından dolayı farklı kimyasal bileşenlere sahip bağlayıcı türleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Ülkemizde vinilidenflorür (VDF) üretiminin ve polimerizasyonunun zorlukları sebebiyle PVDF üreticisi bir firma bulunmamaktadır, ancak firmaların anotlarda belirli oranlarda silisyum kullanmaya başlaması PVDF'e alternatif olarak görülen karboksi-metil selüloz (CMC) ve stiren bütadien kauçuğu (SBR) karışımı polimerlere talebi arttırmıştır. Bu polimerlerin farklı sanayilere hizmet eden üreticileri ise ülkemizde bulunmaktadır. Kimya sektörünün sanayimize önemli ölçüde yön verdiği göz önüne alındığında gelişen batarya sektörünün ihtiyaçlarını gidermek için olası paydaşların bilgilendirilmesi ve yönlendirilmesi gerekmektedir. PVDF gibi sentezi zorlu polimerlerin üretiminde firmaların devlet tarafından desteklenmesi önem arz etmekteyken CMC ve SBR üretimi yapan firmaların ise bataryalarda kullanılacak kalitede üretim yapmaları için bilgilendirilmeleri önem arz eder.

Bu bölümde ise yukarıda da belirtildiği gibi bataryanın önemli bir bileşeni olan ve çevrim performansını büyük ölçüde etkileyen polimerik bağlayıcıların öneminden ve bunların üretim yöntemlerinden bahsedilmiştir. Ticari olarak kullanılan polimerik bağlayıcıların özellikleri ve pazar büyüklüğü rapor kapsamında belirtilmiş olup günümüzde ticari bataryalarda en çok kullanılan PVDF bağlayıcıların farklı üretim teknikleri sunulmuştur. Ayrıca, daha yüksek özgül kapasiteye sahip yeni nesil anot aktif malzemelerin en önemli sorunu olan yüksek hacimsel genişleme için polimerik bağlayıcıların ne tür avantajlar sunduğu ve araştırmaların hangi yöne evrildiği detaylı bir şekilde sunulmuştur.

[+] omert@istanbul.edu.tr

1 İstanbul Üniversitesi, Kimyasal Oşinografi Bölümü, Vefa, 34134 İstanbul, Türkiye.

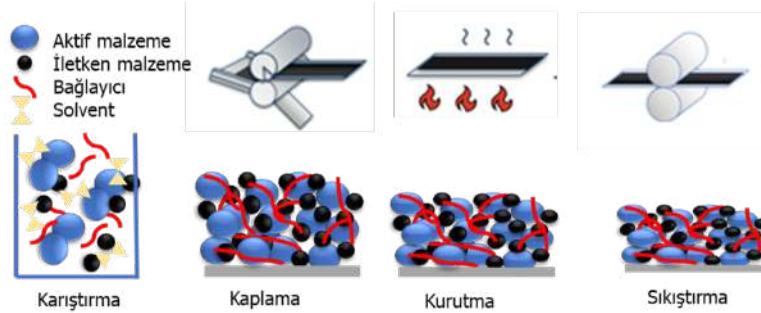
2 Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Serdivan, 54050 Sakarya, Türkiye.

3 Yalova Üniversitesi, Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, 77200 Yalova, Türkiye.

1. LİTYUM İYON BATARYALARDA POLİMERİK BAĞLAYICILARIN KULLANIM AMAÇLARI VE ÖZELLİKLERİ

Enerji depolama sistemlerinde şarj/deşarj sırasında indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları pozitif (katot) ve negatif (anot) elektrotlar içerisinde yer alan elektrot aktif malzemeler içerisinde gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonları gerçekleştirebilmesi için ise bataryanın şarj vedeşarjı sırasında elektronların bu aktif malzemelere taşınması gerekmektedir. Bu amaçla aktif malzemeler akım toplayıcısı olarak kullanılan bakır (anot aktif malzemesi için) veya alüminyum (katot aktif malzemesi için) folyolar üzerine kaplanmaktadır. Bu kaplama işleminde aktif malzemelerin akım toplayıcı folyoların yüzeyine tutunabilmesi ve elektrotun bir bütün halinde kalabilmesi için ise polimerik bağlayıcılar kullanılmaktadır.

Şekil 1’de elektrot üretim sürecinde bağlayıcının diğer komponentler ile olan ilişkisi görülmektedir. Var olan teknoloji seviyesinde ticari elektrotların üretiminde laminasyon yöntemi kullanılmaktadır. Bu teknolojiye toz haldeki anot veya katot aktif malzemeler, elektrik iletkenliği sağlayan karbon esaslı katkı malzemeler, polimerik bağlayıcılar ve çözücü karıştırılıp anot elektrot üretilecekse bakır, katot elektrot üretilecekse alüminyum folyo üzerine çamur halde dökülüp sıvanırlar. Akım toplayıcı üzerine yayılarak kaplanan çamurun kuruması gereklidir. Bu nedende kaplama sonrasında kurutma işlemi gerçekleştirilir. Elektrot üretimindeki son aşama üretilen elektrotun sıkıştırılması aşamasıdır. Bu sayede, kurumuş kaplamanın kaplama kalınlığına ait homojenlik sağlanır ve kaplama fiziksel olarak yoğunlaştırılır.



Şekil 1. Elektrot üretim süreci ve bağlayıcının rolü.

Polimerik bağlayıcının bu noktada ilk görevi elektrot yüzeyine kaplanacak malzemelerin çamur içerisinde homojen olarak dağılmasına yardımcı olarak elektrot aktif malzemeyle iletkenlik artırıcı katkı malzemelerinin bir arada ve akım toplayıcıyla beraber sorunsuz durmasını sağlamaktır. İkinci görevi ise hazırlanan çamurun viskozitesinin ayarlanmasına imkân tanıyarak homojen dağılmış yapının istenilen döküm kalınlığında akım toplayıcı folyo üzerine kaplanmasını sağlamaktır. Üçüncü görevi ise, kurutma işlemi sırasında oluşan ısıl etkilere dayanımdır. Son görevi ise sıkıştırma işleminde uygulanan kuvvetlere dayanım sağlamasıdır.

Bağlayıcılar, kimyasal ve fiziksel etkileşimler ile birbirinden ayrı komponentler arasında bir köprü oluşturarak, iyonik ve elektriksel iletkenlikte önemli bir düşüş oluşturmadan elektrodun mekanik bütünlüğünü sağlarlar. Buna ek olarak, bağlayıcılar belirli bir oranda elektrot ve elektrolit arasında bir arayüzey olarak davranırlar. Böylece elektrodu yan reaksiyonlardan ve korozyondan belirli bir ölçüde korurlar (Loeffler vd. 2015).

Polimerik bağlayıcıların sahip olması gereken özellikleri 4 başlıkta incelenebilir:

Mekanik özellikler: Elastisite, tokluk ve sertlik gibi mekanik özellikler ve bunların yanında diğer komponentler ile sergilediği adezyon/yapışma özelliği, elektrodun şarj vedeşarj çevrimleri sırasında meydana gelen genişleme ve büzülmeyle ilgili olarak oluşan kuvvetlere karşı dayanması açısından büyük önem arz etmektedir.

Termal özellikler: Polimerin termal özellikleri, bilhassa termal kararlılığı (elektrotların üretiminde kurutma ya da kürlleme işlemleri sırasında uygulanan yüksek sıcaklıktaki davranışı) ve bataryaların çalışması sırasında oluşabilecek farklı sıcaklık koşullarına dayanabilmesi kritik öneme sahiptir.

Elektrokimyasal özellikler: Bataryaların çok sayıdaki çevrimlerde fonksiyonunu koruyarak çalışabilmesi için kimyasal ve elektrokimyasal kararlılık da bağlayıcı polimerlerde aranan bir başka önemli özelliktir. Ayrıca, bağlayıcılar anot ve katotta oluşan yüksek ve düşük potansiyel değerlerinde de kararlı bir şekilde çalışabilmelidir.

Kimyasallar özellikler: Bağlayıcılar batarya içerisindeki diğer hiçbir komponent veya bataryanın çalışması sırasında oluşan ara ürünler ile tepkime vermemelidir. Yüksek disperse olabilme özelliği ise döküm çamurlarının hazırlanması

sırasında diğer komponentlerin bu çamur içerisinde homojen olarak kolay dağılması açısından önem taşımaktadır (Hong vd. 2016, Hanke vd. 1999).

Elektrotlar içerisinde bağlayıcı polimerler genellikle ağırlıkça %2 ile %5 arasında düşük bir oranda kullanılırsalar da bataryaların çevrim performanslarında elektrotlardaki malzemelerin bir arada durmasını sağladıkları için önemlidirler (Jeon vd. 2019).

2. LİTYUM İYON BATARYALARDA TİCARİ OLARAK KULLANILAN POLİMERİK BAĞLAYICILAR

Günümüzde Li iyon bataryalarda kullanılan ticari polimerik bağlayıcılar her ne kadar yüksek elektriksel veya iyonik iletkenliğe sahip olmasalar da bataryaların performansını arttırmak adına bu özelliklerin bulunması istenen bir durumdur. Polimerlerde elektrik iletkenliği konjuge yapılar (conjugated structure) ve boş yük taşıyıcıları (free charge carriers) ile sağlanmakta olup bu özelliklerin bağlayıcı polimerlere düşük maliyetler ile kazandırılabilmesi, bataryaların performansını arttırmak adına ihtiyaç duyulan özellikleri elektrotlara sağlama açısından önemlidir.

Elektrik iletkenliğinin yanı sıra iyonik iletkenlikte elektrot performansı açısından önemlidir. Polimerlerin viskozitesi ve kristalinitesi gibi fiziksel ve yapısal özellikler de elektrot performansını etkilemektedir. Bu nedenle bağlayıcıların özelliklerini kontrol edebilmek için çoğunlukla polimer yapısına fonksiyonel gruplar ilave edilmektedir (Qiu vd. 2019).

2.1. Flor içeren polimerik bağlayıcılar

Günümüzde ticari bataryalarda en çok kullanılan polimer türleri flor içeren polimerler olup özellikle poli(vinildenflorür) (PVDF) dünya genelinde en çok kullanılan polimer bağlayıcıdır. Bunun en önemli sebepleri sahip olduğu kimyasal ve elektrokimyasal kararlılık ve makul seviyedeki kolay üretilebilirliğidir. Ancak, PVDF belli başlı dezavantajlara da sahiptir. Bunların başında düşük bağlayıcı özelliğinden ötürü elektrot komponentlerini bir arada istenen düzeyde tutamamasıdır. Birincil bağlanma mekanizmasının mekanik kilitleme ve Van der Waals kuvvetleri gibi zayıf etkileşimler ile olması bunun en önemli sebebidir. Özellikle bu sorunun daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan aktif malzemelerde (silisyum, germanyum, kalay anotlar vb.) çok daha ciddi boyutlara ulaştığı görülmektedir (Chen vd. 2018). Yüksek enerji yoğunluğu demek yapı içerisinde daha fazla lityum iyonunun girmesi demektir ve bu da aktif malzemenin hacimsel olarak çok fazla genişlemesi anlamına gelmektedir. Bu hacimsel genişlemeye bağlı oluşan iç gerilmeler ise PVDF gibi bağlayıcı özelliği zayıf olan polimerler ile kompanse edilememekte ve aktif malzemelerin elektrot yüzeyinden pulverize olmasına sebep olmaktadır. Ancak günümüzde ticari olarak kullanılan farklı katot yapılarında ve grafit anotlarda meydana gelen hacimsel genişlemeler şu an için PVDF ile çalışmaya olanak tanımaktadır. PVDF bağlayıcıların elektrik iletkenliği çok düşük olduğu için muhakkak iletkenlik artırıcı katkıları ile kullanılmaktadırlar. Bu katkıları kullanabilmek ve çamurun hazırlanması esnasında homojen bir karışım elde edebilmek amacıyla bağlayıcı polimerlerin kolay çözünebileceği çözücülerin kullanılması gereklidir (Wu vd. 2013). PVDF bağlayıcıların en büyük dezavantajlarından bir diğeri ise suda çözünememeleridir. Bu nedenle toksik organik çözücülerden *N*-metil-2-pirolidon (NMP) çözücü olarak PVDF bağlayıcılarda kullanılmaktadır. NMP'nin sağlığa zararlarının yanı sıra maliyetli olması ($2-4 \$ \cdot \text{kg}^{-1}$) ve kaynama noktasının (203°C) yüksek olmasından dolayı elektrot üretimi sırasında uygulanan çözücü uçurma aşamasında fazla enerji harcanmasına sebebiyet vermesi diğer problemlerindendir (Jeschull vd. 2015). Bu nedenle üretim prosesinde yer alan kaplama ve kurutma aşamasında bu uçucu organik çözücünün geri kazanımı sağlanmaya çalışılmaktadır.

2.2. Flor içermeyen polimerik bağlayıcılar

Ticari olarak rekabet edebileceği düşünülen ve PVDF'nin yerine geçebilecek bağlayıcılar politetrafloroetilen (PTFE), karboksi metil selüloz (CMC) ve stiren-bütadien kauçuğu (SBR) olarak belirtilebilir. Bu polimerler NMP gibi toksik çözücüler yerine su içerisinde çözünabilirler ve su bazlı oldukları için maliyet açısından PVDF bağlayıcılara kıyasla çok daha avantajlıdır. PTFE bağlayıcıların en önemli sorunu ise sahip oldukları 100-200 nm aralığındaki zincir uzunlukları sebebi ile kaplama işlemi sonrasında partiküller arasında oluşan mezo ve mikroporlara penetre olamamasıdır. Bu nedenle, genellikle yüksek yüzey alanına sahip süperkapasitörlerde kullanılmaktadır (Salini vd. 2020, Lee vd. 2019).

CMC bağlayıcılar ise hücre içindeki elektrolitlerde çözünürlüğü PVDF'e kıyasla çok daha düşüktür. Bu da elektrotun ilerleyen çevrimler ile beraber mekanik dayanımını arttırmaktadır. Biyobozunur olması ise diğer bir avantaj olup yüksek bağlayıcılığa da sahiptir. Bu yüksek bağlayıcılık sahip olduğu hidroksil ve karboksil grupları üzerinden sağlanmaktadır. Bu gruplar, elektrot aktif malzemelerinin yüzeyi ile malzemenin yapısına bağlı olarak hidrojen bağları veya kovalent bağlar oluşturabilmektedir (Mazouzi vd. 2015).

CMC bağlayıcıların belli konularda PVDF özelinde avantajları bulunmakla birlikte özellikle SBR bağlayıcıları ile birlikte kullanılmaları durumunda sağladıkları katkılar daha da artmaktadır. SBR bağlayıcılar, bağlayıcı sistemine daha çok esneklik ve yüksek sıcaklık direnci sağlamakta ve PVDF'ye kıyasla daha yüksek bağlayıcılık göstermektedirler. Ancak SBR bağlayıcıların hidrofobik grafit partikülleri ile çok fazla etkileşime girmemesi, anot çamuru hazırlanması sırasında kararlı olmayan süspansiyon oluşumuna neden olmaktadır (Wang vd. 2017).

CMC'nin içerdiği karboksil gruplarının sağladığı kuvvetli etkileşimlerden ötürü bu gruplara sahip başka polimerik bağlayıcılar da yoğun olarak araştırılmaktadır. Bunlardan en önemlileri poliakrilik asit (PAA) ve sodyum aljinattır. PAA elektrotlarda ilk olarak sulu süspansiyonları stabilize etmek amacıyla kullanılsa da sonrasında grafit anotlarda da denenmiştir. PAA yapısının PVDF bağlayıcılara nazaran lityum iyonlarının saf propilen karbonat elektrolitinde tersinir şarj/deşarj interkalasyonlarına olanak sağladığı tespit edilmiştir. CMC ile kıyaslandığında PAA'nın sahip olduğu daha yoğun miktardaki yüksek polariteli karboksilik grupları silisyum gibi malzemeler ile daha kuvvetli hidrojen bağı veya kovalent bağ yapmasına olanak tanımaktadır (Magasinski vd. 2010).

2.3. Biyo kökenli polimerik bağlayıcılar

Bir diğer alternatif olan sodyum aljinatlar ise doğal polisakkaritler olup kahve rengi alglerin ana içeriğini oluşturmaktadır. Yapısı tam olarak D-manuronik (M) ve L-guluonik asitin kopolimeri olup bu blokların dağılım oranlarına göre farklı mekanik özellikler kazanmaktadır. CMC'ye nazaran aljinatlar tüm monomerlerinde (hem M hem de G) karboksilik gruplar içermektedir. Bunun yanı sıra sahip olduğu düzenli karboksilik grup diziliminden dolayı iyon taşınımında da katkı sağlamaktadır. Tablo 1'de yukarıda bahsedilen tüm su tabanlı polimerik bağlayıcıların özellikleri belirtilmiştir (Rehm 2009).

Tablo 1. Yaygın olarak incelenen su tabanlı bağlayıcıların molekül yapıları ve avantajları.

Bağlayıcı	Moleküler Yapı	Avantajları	Kaynaklar
Politetrafloroetilen (PTFE)		Yüksek kimyasal ve mekanik stabilite	Lee vd. 2019
Karboksimetil selülöz (CMC)		Düşük maliyet İyi adezyon Yüksek elastik modül	Mazouzi vd. 2015
Sitren bütadien kauçuğu (SBR)		İyi esneklik Yüksek termal stabilite	Jeschull vd. 2017
Poli Akriklik Asit (PAA)		İyi adezyon	Zhu vd. 2018
Sodyum Alginat		Çapraz bağlar ile mekanik özellikler İyi adezyon	Liu vd. 2014

PVDF bağlayıcılara alternatif en önemli adaylardan olan CMC ve SBR bağlayıcıların batarya özelinde sağladıkları farklılıklar detaylı incelendiğinde SBR/CMC bağlayıcıların PVDF'e kıyasla akım toplayıcılar üzerinde daha düşük çekme dayanımı, yüksek Young modülü, çok daha iyi maksimum uzama ve daha kuvvetli adezyon sağladığı bilinmektedir. SBR/CMC bağlayıcıların bir diğer sağladığı avantaj ise PVDF'e göre daha az elektrolit emerek şişmeleridir. Bu sayede ilerleyen çevrimler ile bağlayıcıların adezyonu azalmamakta ve elektrot bileşenlerini (aktif malzeme, katkı malzemeleri, akım toplayıcı) kompakt bir halde daha kararlı bir şekilde tutabilmektedir (Shin vd. 2017, Toigo vd. 2020, Wang vd. 2018).

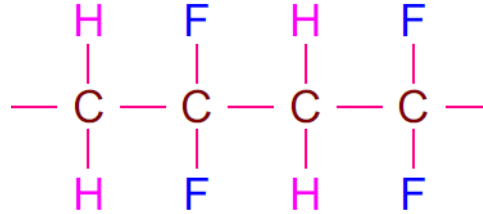
CMC/SBR bağlayıcıları ayrıca aktif malzeme içerisinde daha homojen bir şekilde dağılmaktadırlar. Bu her ne kadar iyi bir sonuç gibi görünse de aslında elektrotun performansı için sorun teşkil etmektedir. Bağlayıcıların elektrik iletkenliklerinin çok düşük olması bilinen bir durumdur. Eğer bağlayıcılar partiküllerin her tarafını düzenli bir şekilde sararsa, partiküller arasındaki elektrik iletkenlik oldukça düşük olacaktır. Nitekim CMC/SBR bağlayıcıları, PVDF bağlayıcılar ile hazırlanan

elektrotlara kıyasla daha düşük elektriksel iletkenliğe sahiptirler. Elektriksel iletkenliğin düşmesi ise, aktif malzemelerin içerisine lityum iyon difüzyonunu yavaşlatmaktadır.

3. ÜRETİM YÖNTEMLERİ

3.1. Polivinildenflorür (PVDF) Bağlayıcıların özellikleri ve Vinilden florürün (VDF) üretimi

PVDF üretim yöntemine bağlı olarak α , β , γ , δ ve ϵ fazları olmak üzere toplam 5 farklı kristalin polimorfa sahiptir. Bunlardan α ve ϵ fazları apolar, diğer üç fazı ise polar olup ferroelektrik ve piezoelektrik özelliklere sahiptirler. Li iyon bataryalarda ise diğer fazlara kıyasla sahip olduğu üstün mekanik ve yapısal avantajlarından dolayı β fazındaki PVDF malzemesini bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Şekil 2'de PVDF'nin kimyasal yapısı gösterilmiştir. PVDF tozunun üretiminde en bilinen ve kullanılan yöntem vinilden florürün (VDF – $\text{CH}_2=\text{CF}_2$) monomeri kullanılarak serbest radikal polimerizasyonu ile üretimdir. VDF monomerinin ise birkaç farklı üretim yöntemi olup bu yöntemler aşağıda daha detaylı belirtilmiştir (Zhang vd. 2002).

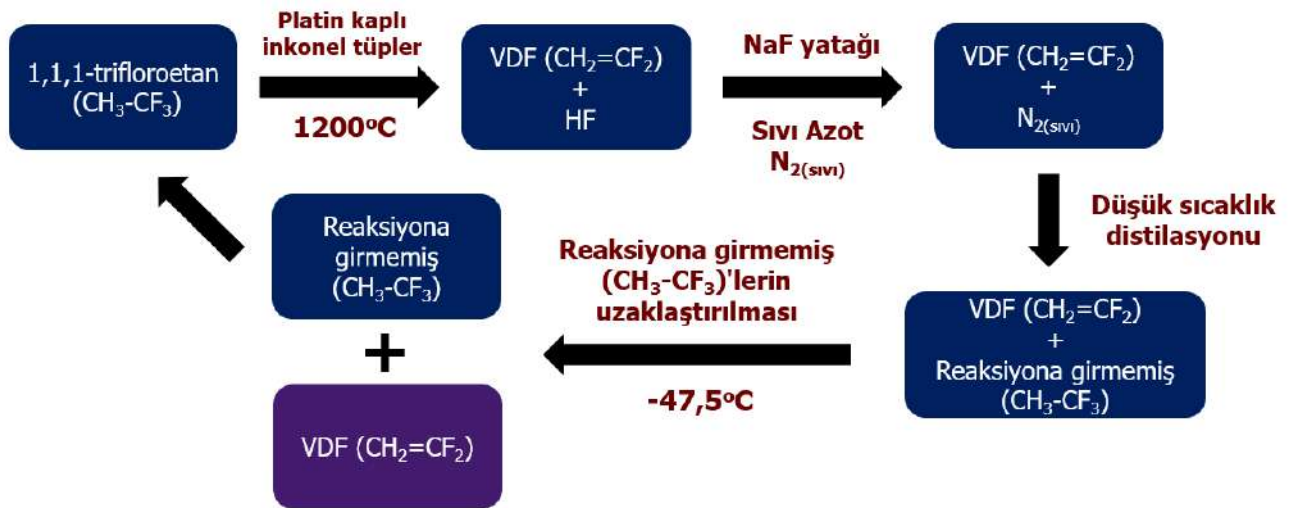


Şekil 2. Polivinilden florürün (PVDF) yapısı.

1,1,1-trifloroetandan (CH_3-CF_3) dönüşümü ile VDF eldesi 1,1,1-trifloroetanın 1200°C sıcaklıktan geçirilerek aşağıdaki reaksiyonun meydana gelmesi ile başlamaktadır. Burada platin kaplı inkonel tüplerden geçirilen 1,1,1-trifloroetanın temas süresi yaklaşık 0,01 sn mertebelerindedir. Çıkan gaz sodyum florür (NaF) yatağından geçirilerek hidroflorik asit (HF) uzaklaştırılır ve sıvı azot (N_2) yardımı ile toplanır. Ardından VDF (kaynama noktası -84°C) düşük sıcaklık distilasyonu ile ayrıştırılır. Reaksiyona girmemiş trifloroetanlar ise $-47,5^\circ\text{C}$ 'de uzaklaştırılarak tekrar üretim sisteminin ilk aşamasına sokulup geri kazandırılır (Hauptschein vd. 1965).

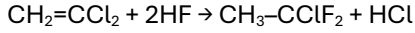


Denklem 1

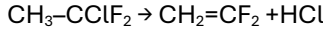


Şekil 3. VDF'in 1,1,1-trifloroetandan dönüşümü ile üretim akış şeması.

VDF'in üretiminde kullanılan başka bir ticari yöntemde ise asetilenin hidroflorürleme işleminin ardından klorürleme işlemi gerçekleştirilmesiyle eldesidir (Schultz vd. 1976). İşlem sonunda elde edilen 1-kloro-1,1-difloroetandan hidroflorik asit kullanılarak VDF elde edilir. Vinilden klorürün başlangıç bileşeni olarak kullanıldığı devam eden iki reaksiyondan oluşan tek aşamalı sentez aşağıdaki gibidir:

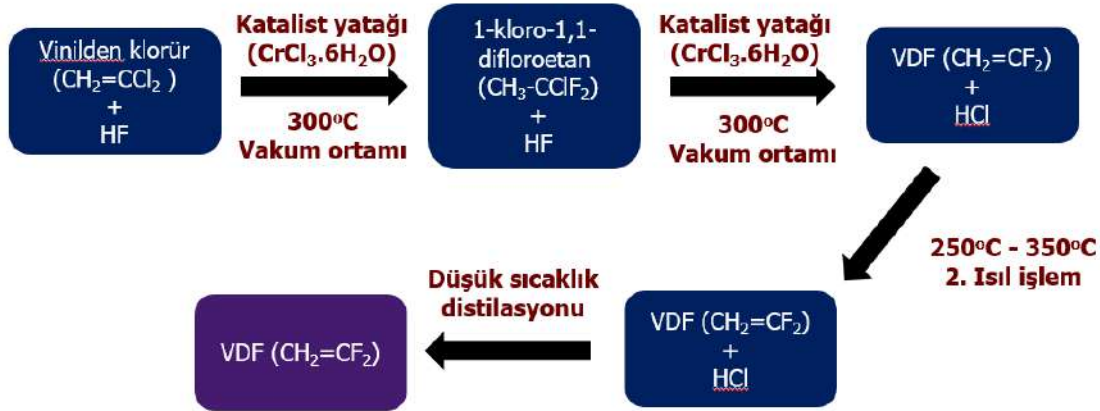


Denklem 2



Denklem 3

Burada vinilden klorür ve hidroflorik asit karışımı ısıtılmış bir katalizör yatağından geçirilir. Bu katalizör $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'yu 300°C 'de vakum ortamında ısıtarak hazırlanır ve ısı işlem katalizörünün rengi koyu yeşilden koyu mor rengine dönüşene kadar sürmektedir. Bu işlem sırasında kristalize su yapıdan çıkar ve yaklaşık %35'lik bir kütle kaybı yaşanır. Ardından soğutulan malzeme 2-5 mm çapında partiküller olarak silindirik bir reaktörün içerisine yüklenir ve $250\text{-}350^\circ\text{C}$ 'de ısı işleme maruz bırakılırlar. Sonrasında ise VDF düşük sıcaklık distilasyonu ile ayrıştırılır.



Şekil 4. Vinilden klorür kullanılarak VDF'in üretim akış şeması.

3.2. Vinilden florürün (VDF) polimerizasyonu

VDF'in başarılı ilk polimerizasyonu 1948 yılında peroksit başlatıcısının suda 30 MPa basınç altında 50°C - 150°C 'de gerçekleştirilmiştir (Ford ve Henford 1948). Bu üretim tekniğinde herhangi bir yüzey aktif ajan kullanılmamıştır. PVDF emülsiyon, süspansiyon, solüsyon ve çözücüsüz ortam (bulk) polimerizasyonu yöntemleri gibi farklı metotlar ile üretilebilmektedir. PVDF seri üretime uygun bir yöntem ile (sulu emülsiyon ya da süspansiyon) üretilerek ticari olarak piyasaya ilk defa 1960 yılında sürülmüştür (Ford 1949).

Organik peroksit başlatıcılar kullanılarak üretilen polimerlerin daha yüksek termal kararlılığa sahip oldukları araştırmacılar tarafından da belirtilmiştir. Ancak bu yöntemde polimerizasyonun başlayabilmesi için nispeten yüksek basınç değerlerine (>69 MPa) çıkılması gerekmektedir. Ancak di-tertiary-bütül-peroksit (DTBP) $[(\text{CH}_3)_3\text{C-O-O-C}(\text{CH}_3)_3]$ kullanıldığında çok daha düşük basınç değerlerinde (2,1-6,9 MPa) polimerizasyondan yüksek verim alınabildiği belirtilmiştir. 0,8 gram DTBP kullanılarak 123°C 'de 4,5 MPa'da 18,5 saat sonunda 35 gram VDF ile polimerizasyonu sonucunda %83'lük polimer dönüşümü elde edilmiştir (Hauptschein 1965).

VDF'nin polimerizasyonunda aktifleştirciler gerekli değildir. Bunlar sadece reaksiyon hızını etkileyerek reaksiyon süresini kısaltmaya yardımcı olurlar. VDF'nin polimerizasyonu için indirgeyici ajan içeren aktifleştircilere örnek olarak okside olabilen (kükürt-oksijen bağı içeren) sülfoksi-oksijen bileşikler (sodyum bisülfid, sodyum sülfid, sodyum hidrosülfid, sodyum tiyosülfid ve amonyum bisülfid) verilebilir. Aktifleştirici katkısı kullanılan monomer miktarına bağlı olarak ağırlıkça %0,001 ile %5 arasında değişebilmektedir. Diğer türlerdeki farklı aktifleştircilere örnek olarak ise asetilenik alkoller, propargil alkoller, nikel karboniller ve demir karboniller verilebilir.

VDF aynı zamanda etilen gibi monomerler ile de polimerize edilebilir. Genellikle polimer içerisinde ağırlıkça %5-%95 arasında VDF içeren polimerlerde bu yöntem uygulanmaktadır. Düşük molekül ağırlığında polimer sentezlenmek istendiğinde ise katalizör kullanmaya gerek duyulmamaktadır (Ford 1949).

Emülsiyon polimerizasyonu ile VDF'nin polimerizasyonu ise yüzey aktifleştirci ajan varlığında heterojenik reaksiyonlar ile gerçekleştirilir. Bu yöntem için en uygun yüzey aktifleştirci ajanlardan biri ise florin bazlı floroalkanoik asit tuzudur. Yüzey aktifleştirci ajanlar, radikal üzerinden yürüyen reaksiyonları engellediği için polimerizasyonu durdururlar. Zincir transfer ajanları üretilecek polimerin molekül ağırlığını ayarlamakta ve tamponlar ise polimerizasyonun yapıldığı ortamın pH'ını ayarlamakta kullanılmaktadır. Reaksiyonun başlatılması için serbest radikallerin kaynağı olarak suda çözünebilir (water-soluble)(persülfat tuzlar) veya monomerde çözünebilir (monomer-soluble) (organik peroksitler örneğin di-tertiary-bütül peroksit) tuzlar kullanılmaktadır. Emülsiyon polimerizasyonu ile üretilen PVDF genellikle karıştırmalı reaktörlerde üretilmekte olup elde edilen partiküller küresel morfolojide ve yaklaşık $0,25 \mu\text{m}$ çapında olmaktadır. Son ürünü daha

kararlı bir hale getirebilmek için ise ortama vaks ilave edilir. Reaksiyon sonunda vaks uzaklaştırılır ve koagülasyon başlar. Filtrasyon, yıkama ve kurutma işlemlerinin ardından aglomere olan partiküllerden oluşan (yaklaşık 2-5 µm aralığında partikül boyutunda) toz formu elde edilir (Dohany vd. 1994).

Bir diğer VDF polimerizasyon yöntemi olan süspansiyon polimerizasyonundaki ana amaç vinilden florürün reaktörün duvarlarında polimer formasyonunu sınırlamaktır. Selüloz türevi veya polivinil alkol gibi suda çözünebilir polimerler süspansiyon ajanı olarak ilave edilerek polimerizasyon sırasında polimer partiküllerinin koagülasyonu azaltılmaya çalışılır. Polimerizasyon reaksiyonunda organik peroksitler başlatıcılar olarak ve zincir transfer ajanları PVDF'nin molekül ağırlığını belirlemede kullanılırlar. Askıda katı partiküller içeren çamur formundaki küreler 30-100 µm aralığında değişmektedir. Bu çamur formundan PVDF tozu yıkama, filtrasyon ve kurutma işlemlerinin ardından elde edilir.

Viniliden florür, doymuş florlu veya floroklorlu çözücüler içinde polimerize edilebilir. Bu çözücüler, viniliden florür ve organik peroksit katalizörleri gibi floaloalkenleri çözer. Böylece polimerizasyon homojen bir fazda gerçekleşir ve elde edilen PVDF, çözücüde çözünmez, bu da ürünü solüsyondan kolayca ayrılabilir hale getirir. Organik peroksitlere ek olarak, reaksiyon radyasyonla başlatılabilir veya indüklenebilir. Bu, ürünün başlatıcı, yüzey aktif madde ve diğer malzeme bileşenleriyle kontaminasyonunu önlemeye yardımcı olur. Oksijen ile aktive edilen alkil boronun, su ve diğer çözücülerde viniliden florür ve vinil florür polimerizasyonunu katalize ettiği de tespit edilmiştir (Solvay vd. 1965).

4. YENİ NESİL ELEKTROT AKTİF MALZEMELERİ İÇİN POLİMER TÜRLERİ

Günümüzde ticari olarak kullanılan pillerin dışında ticarileşme potansiyeli yüksek olan elektrot malzemeleri için farklı polimerik bağlayıcılar kullanılmaktadır. Polipirol (PPy) iletken polimer malzemesi katyon ve anyonlar ile beraber kolay katılanabildiği ve iyi elektriksel iletkenlik sağladığı için pozitif elektrotlarda kullanılmaktadır. PPy katkısı Si anotlarında 2005 yılında denenmiştir (Guo vd. 2005, Chew vd. 2007). Bu çalışmada polimer ve Si tozları bilyalı öğütücüde karıştırılarak Si/PPy polimer kompoziti üretilmiş ve bu polimer yapısının bağlayıcı özellik göstererek Si partiküllerini birbirine bağladığı ve polimer matrisin tamponlayıcı bir etki yaptığı tespit edilmiştir. PPy polimerini karıştırmak yerine Si yüzeyine kaplandığı başka bir çalışmada ise yüzeyde oluşturulan ince PPy filmin kapasiteyi arttırdığı fakat çevrimlerin ilerlemesiyle polimer film yapısının bozularak sağladığı etkiyi kaybettiği belirtilmiştir (La vd. 2006).

Bir başka çalışmada PPy polimerinin yeteri kadar iletkenlik sağlayamadığı için PPy polimerine ek olarak Ag katkısı denenmiştir (Yao vd. 2013). Yapılan bu çalışmada yapıya eklenen Ag'nin sadece iletkenliği arttırmayıp aynı zamanda yapının mekanik özelliklerini arttırdığı da görülmüştür. Ancak Ag'nin de yapıya eklenmesi ile özgül kapasite değeri büyük ölçüde düşüş göstermiştir.

Farklı yapılarda PPy polimerlerinin denendiği diğer bir çalışmada polimer yapısının değişmesi saf Si anot ile kıyaslandığında elektrokimyasal performansta büyük artış göstermesine rağmen farklı mikroyapılarda PPy polimerinin denenmesinin herhangi bir değişiklik sağlamadığı görülmüştür (Zhou vd. 2012).

Farklı bir iletken polimer olan polianilin (PAni) ile yapılan çalışmalarda yüksek spesifik kapasite değerleri ve düşük kapasite kayıpları elde edilmiştir. Fakat yüksek şarj deşarj hızlarında PAni polimerinin iletkenliğinin yeterince iyi olmamasından ötürü düşük kapasite gösterdiği belirtilmiştir (Cai vd. 2010, Liu vd. 2010).

2011 yılında bir başka araştırmada ise, iletkenlik özelliği çok yüksek, yüksek kimyasal ve termal kararlılığa sahip olan Poli(3,4-etilendioksitiyofen) (PEDOT) polimeri incelenmiştir (Ito vd. 1997, Yang vd. 2011). Ancak PEDOT'un birçok yaygın çözücü içerisinde çözünebilirliğinin düşük olması bu polimerin günümüzde uygulanan yüksek ölçekli üretimlerde kullanımını engellemektedir.

2012 yılına gelindiğinde doğal polisakkaritler de katkı polimerleri olarak incelenmeye başlamıştır. Murase vd. (2012) amiloz amilopektin glikojen polisakkaritlerini detaylı olarak incelemiştir. Kovalenko vd. (2011) ise kahve rengi algden üretilen doğal polisakkarit olan aljinat katkı polimeri olarak incelemiştir. Elde edilen sonuçlarda, aljinat katkısının elektrokimyasal performansı büyük ölçüde geliştirerek yüksek akım yoğunluklarında yüksek kapasite değerlerinin ve düşük kapasite kayıplarının elde edildiği görülmüştür. Böylece, doğal polisakkaritlerin de polimer katkısı olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

Yapılan başka bir çalışmada, poli(9,9-dioktifloren-ko-metilbenzoik asit) (PFFOMB) polimer malzemesi katkı olarak denenmiş ve bağlayıcının elektrokimyasal performansa etkileri incelenmiştir (Wu vd. 2013). Elde edilen sonuçlarda üretilen polimerin sahip olduğu yüksek elektriksel iletkenlik, mekaniksel adezyon ve esneklik anot malzemesinin yüksek şarj deşarj hızlarında dahi yüksek kapasite değerlerine ulaşmasına ve uzun çevrimlerde düşük kapasite kayıpları

göstermesine neden olduğu belirtilmiştir. Si/polimer kompozit anot malzemelerinin gösterdikleri elektrokimyasal performanslar Tablo 2’de belirtilmiştir.

Verilen örneklerde elektrot aktif malzemesi olarak silisyumun seçilmesinin sebebi yapısına lityum girdiğinde elektrotta en yüksek hacimsel genişlemenin oluşmasıdır. Bu çalışmalarda elektrot içerisinde oluşabilecek en yüksek mekanik gerilime karşı polimerlerin davranışları test edilmektedir.

Ancak, henüz silisyumun hacimsel genişleme sonucu oluşan kapasite kayıplarına yeterli bir çözüm getirilememiştir. Son yıllarda anotta kullanılan polimerik bağlayıcılara kendi kendini iyileştirebilme özelliği kazandırılmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Kendi kendini iyileştirme, malzemenin hasarı onarma yeteneğinin bir ölçüsüdür. Çeşitli uygulamalar için kendi kendini iyileştiren polimerler elde etmek için fiziksel ve kimyasal işlemler kullanılmıştır. Bu sistemler için şekil hafıza etkileri, kovalent bağ reformu, heterojen sistemler, difüzyon-akış ve supramoleküler kimyanın dinamikleri gibi farklı yaklaşımlar söz konusudur (Beletskaya vd. 2009, Su vd. 2010, Cao 2022). Kendi kendini iyileştiren polimerleri elde etmek için farklı yaklaşımlar kullanılmakta, özellikle iyileştirme sisteminin kimyadaki rolü vurgulanmakta, bu da termal geçişler, hasar onarımı ve yeniden bağlanmayı mümkün kılmaktadır. Kendi kendini iyileştiren polimerler, genellikle tersine çevrilebilir ikincil bağlar esaslı (hidrojen bağı, Van der Waals etkileşimi vb.) etkileşimler veya dinamik kovalent etkileşimler (vitrimler) yoluyla çapraz bağlanmakta ve elde edilen makro ölçekli özellikler (kendi kendini iyileştirme sıcaklığı ve elastik modülü gibi) bu tür çapraz bağlama etkileşimlerinin toplam gücü ve yoğunluğu ile belirlenmektedir (Zheng vd. 2021, Guerre vd. 2020). Bu etkileşimler, polimerlerin zincirler arası etkileşimine doğrudan bağlıdır. Önceki çalışmaların çoğu, polimer omurgaların ve yan zincirlerin modifikasyonu, polimerlerin ve inorganik malzemelerin hibridizasyonu dahil olmak üzere moleküler yapının yeniden mühendisliği yoluyla makro ölçekli özelliklerin değiştirilmesi yaklaşımını benimsemiştir. Her yeni uygulama ihtiyaçlarına göre yeni bir polimer tasarımı gerektirmektedir.

Tablo 2. Li iyon bataryalar için Si/polimer kompozit anotların elektrokimyasal performansları.

Anot	Spesifik Kapasite (mA·sa·g ⁻¹)	Çevrim performansı (Spesifik kapasite değişimi)	Kaynaklar
Si/PPy	3.076	100 çevrim sonrası kapasite %9 azalmakta	Du vd. 2012
Si/PPy/Ag	1.816	100 çevrim sonrası kapasite 823 mA·sa·g ⁻¹ 'e düşmekte	Yao vd. 2013
Si/PANI	1.940	25 çevrim sonrası kapasite 1.807 mA·sa·g ⁻¹ 'e düşmekte	Cai vd. 2010
Si/PEDOT:PSS	1.947	100 çevrim sonrası kapasite 539 mA·sa·g ⁻¹ 'e düşmekte	Yue vd. 2013
Si/Aljinat	3.040	1.300 çevrim sonrası kapasite 1.200 mA·sa·g ⁻¹ 'e düşmekte	Kovalenko vd. 2011
Si/PFFOMB	2.050	650 çevrim sonrası kapasite 1.400 mA·sa·g ⁻¹ 'e düşmekte	Liu vd. 2011
Si/PEFM	3.650	50 çevrim sonrası kapasite 3.200 mA·sa·g ⁻¹	Wu vd. 2013

H-bağı temelli iyileşme tasarımlarında, H-bağlanması tipik olarak ikincil bağların en kuvvetlileri arasındadır ve hacim başına yüksek konsantrasyona sahip olduğu kabul edilebilir ki bu da mekanik mukavemet sağlar.

Buna karşın birincil etkileşimlerin hâkim olduğu termal olarak tetiklenen iyileştirmede, malzemelerin kendi kendini iyileştirebilir hale gelmeleri için dahil edilmiş farklı türlerde dinamik bağlar vardır. Sadece birkaç istisna dışında, ikincil bağlara dayanan malzemeler, mekanik hasar ardından herhangi bir enerji gereksinimi olmadan iyileşme eğilimi gösterirken, kopmuş kovalent dinamik bağlarda iyileşmenin gerçekleşmesi için bir tür enerji girdisi gerekmektedir (Chen vd. 2021). Kovalent bağlara dayanan kendi kendini iyileştirme sistemleri dışardan etki olmaksızın iyileşme yeteneğine sahip olmasa da, bu malzemeler belirli uygulamalar için gerekli olabilecek geliştirilmiş mekanik özellikleri sağlayabilmektedir. Bu nedenle Diels-Alder (DA) siklo-katılma, Friedel craft reaksiyonu, alkoksiamin bağları ve imin bağlarından oluşan bağlar gibi termal olarak kontrol edilebilen kovalent dinamik bağlardan kendi kendini iyileştiren malzemeler tasarlamak üzerine birçok araştırma yapılmıştır (Li vd. 2018, Wang 2020).

İdeal olarak, iyileştirici ajan uygulama stratejisine göre tasarlanmış bir kendi kendini iyileştirme sistemi, kolaylıkla bulunabilen ve düşük maliyetli bir malzemeden tasarlanmalıdır. Uygun bir iyileştirici ajan, etkili ve hasarın meydana geldiği alanlara taşınacak kadar hızlı olmalı aynı zamanda kaplandığı yüzeye (korozyon, çözünme, vb.) zarar vermemelidir. Ayrıca, iyileştirilmiş alanlar ideal olarak kaplama matrisine eşit veya daha iyi mekanik özelliklere sahip olmalıdır. Malzemenin uzun vadeli kendi kendini iyileştirme yeteneğinin kararlı olabilmesi için matris ve iyileştirme ajanının uyumlu olması gerekir. Son yıllarda, farklı mekanizmalarla kendi kendini iyileştiren malzemeler Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Hidrojen bağı/iyonik etkileşim temelli kendi kendini iyileştiren malzemeler.

Malzeme	İyileşme şartları	İyileşme Mekanizması	Kullanım	Performans	Kaynaklar
PVA-g-PAA/boraks	25 °C, 20 dk	Borat ester bağları	Elektrolit	84,8 F·g ⁻¹ (ilk iyileşme sonrası) ≈100% (10. iyileşme sonrası)	Wang vd. 2016
Selüloz-PDA-PAM	25 °C, 10 dk	π-π etkileşimi/ hidrojen bağı	Elektrolit	27,92 mF·A·cm ⁻² - 200 mV·s ⁻¹ 95% (100 çevrim sonrası)	Li vd. 2018
Aljinat/Ca ²⁺	25 °C	İyonik etkileşimler	Anot	1.500 mA·sa·g ⁻¹ - 1 A·g ⁻¹ , 83% (300 çevrim sonrası)	Yoon vd. 2014
Poli (lityum 2-Metil-2-(4-vinilbenzil) malonat)	25 °C	İyon-dipol etkileşimleri	Anot	- 1 °C 51% (500 çevrim sonrası)	Kwon vd. 2014
PAA/Fe ³⁺	25 °C, 24 sa	İyonik etkileşimler/ Hidrojen bağı	Elektrolit	87,4 F·g ⁻¹ - 0.5 °C 89% (5.000 çevrim sonrası)	Guo vd. 2016

*Selüloz-PDA-PAM: Selüloz-polidopamin-poliakrilamid, PVA: Polivinil alkol, PAA: Poliakrilik asit

5. LİTYUM İYON BATARYALARDA KULLANILAN POLİMERLERİN PAZAR BÜYÜKLÜĞÜ ve TÜRKİYE'DE DURUM

2021 yılının sonunda Li iyon batarya pazarının ulaştığı büyüklük yaklaşık olarak 58,6 milyar \$ mertebeleridir ve enerji depolama sistemlerine olan ihtiyacın hızla artması sebebiyle bu pazarın 2030 yılının sonunda 278 milyar \$ düzeylerine çıkması beklenmektedir. Li iyon batarya üretimindeki bu artışa bağlı olarak da batarya içerisinde kullanılan bağlayıcı polimerlere de ihtiyaç artmaktadır. 2020 yılında kullanılan polimerlerin pazar büyüklüğü 1,26 milyar \$ mertebelerine ulaşmıştır. 2021 ile 2031 yılları arasında ise Li iyon bataryalardaki bu üretim artışına bağlı olarak ortalama yıllık büyümesinin %15,6 olacağı ve 2031 yılının sonunda pazar büyüklüğünün 10,15 milyar \$'a ulaşacağı öngörülmektedir (Int. Kyn. 1).

Li-iyon bataryalar için polimerik bağlayıcı üretimi yapan önemli firmalar Tablo 4'te listelenmiştir.

Tablo 4. Polimerik bağlayıcı üretimi yapan firmalar

Firmalar	Ülke
Solvay S.A	Belçika
Zeon Specialty Materials Inc.	ABD
Arkema S.A	Fransa
Ashland Global Holdings Inc.	ABD
FUJIFILM Wako Chemical Corporation	Japonya
DuPont de Nemours, Inc.	ABD
JSR Corporation	Japonya
Kureha Corporation	Japonya
APV Engineered Coatings Inc.	ABD
Fujian Blue Ocean & Black Stone Technology Co., Ltd.	Çin

Türkiye'de yatırımı bulunan batarya üreticilerinin üretim sistemleri, üretim desteği alınan firmanın tüm komponentlerde olduğu gibi polimer özelinde de tavsiye edilen veya kurulan sistemle en yüksek uyumlulukla çalışan malzeme önerisi doğrultusunda yapılmaktadır. Bu anlamda, üretim sistemlerinin tam anlamıyla düzene girmesiyle veya tamamen yerli yatırımlarla üretim alt yapıları oluşturulduğunda ülkemiz de de polimer bağlayıcılarla ilgili yatırımların oluşacağı öngörülmektedir.

6. POLİMERİK BAĞLAYICILARIN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ (YDD)

Enerji sistemlerinin karbonsuzlaştırılması için şarj edilebilir bataryalar büyük önem arz etmekte olup bu bataryaların üretimi sırasındaki çevresel etkilerin belirlenmesi gerekmektedir. Yaşam döngüsü çevresel etki değerlendirmeleri (YDD), çevresel yükü azaltarak daha iyi performans gösteren pillerin geliştirilmesi için bilgi sağlayan güçlü bir araçtır. Bataryalarda kullanılan polimerik bağlayıcılar çözücülerini ile birlikte ele alınmalıdır.

Batarya üretiminde kullanılan polimerik bağlayıcılara göre çamurun hazırlanmasında kullanılan çözücü değişiklik göstermektedir. Katotlarda PVDF yoğun olarak kullanılmasından ötürü NMP çözücü olarak kullanılırken, anotlarda CMC ve SBR'nin de kullanımından dolayı üreticiye göre NMP veya su çözücü olarak kullanılmaktadır. NMP'nin kullanımında ise çözücü birtakım işlemler ile tekrar geri kazanılmaktadır. Bu geri kazanım yılda 1 GW-sa'lik pil üreten bir fabrika ele alındığında yaklaşık 1470 kW elektriksel ve 4381 kW termal güç (toplam 5851 kW) ihtiyacı demektir. 300 günlük üretim esas alındığında her 1 kW-sa'lik pil üretimi için 112 MJ'lük kurutma ve geri kazanım enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır (Porzio vd. 2021).

Bağlayıcı olarak en sık kullanılan PVDF polimerinin YDD analizleri ise yoğun olarak çalışılmaktadır. PVDF için envanter veri seti (EVS) üzerindeki etki değerlendirmesine bakıldığında kabul edilebilir bir küresel ısınma potansiyeli (KIP) değeri (55,8 kg CO₂ eşdeğeri/kg PVDF) elde edildiği görülmektedir, ancak VDF üretimi sırasındaki büyük klor talebi nedeniyle yüksek bir kümülatif enerji talebi (KET, 756 MJ eşdeğeri/kg PVDF) ortaya çıkmaktadır. Belirsizlik analizi açısından, PVDF için yeni geliştirilen yaşam döngüsü envanter veri setinin üst ve alt sınırları, kümülatif enerji talebi (KET) değerleri için sırasıyla 801 ve 714 MJ ve KID değerleri için sırasıyla 59,1 ve 52,8 kg CO₂ olarak belirlenmiştir (Hu vd. 2022).

7. ÖNERİLER

Ülkemizde polimer bağlayıcılarının üretimi noktasında batarya pazarı ile ilgili seri üretim ekosistemi oluşmadığı için üreticiler bu anlamda yatırımlarını gerçekleştirilmemiş durumdadır. Batarya ekosistemi oluşmasıyla birlikte üreticilerin ve yatırımcıların bu alana yönelmesi oldukça muhtemeldir. Bunun yanında PVDF gibi ticari bağlayıcıların alternatifi olarak suda çözünür CMC, PVP, PAA gibi polimerlerin batarya için gerekli saflıkta üretimleri için de yatırımların yakın zamanda gerçekleşeceği öngörülmektedir.

Ülkemizde faaliyet gösteren polimer üreticileri polimer bağlayıcı özelinde batarya üretimi için uygun saflıkta polimer üretimi için yatırım yaptıklarında uygun altyapı imkanına sahip olduklarından dolayı bu ekosisteme çok hızlı bir şekilde uyum sağlayabileceklerdir. Bu sistemin kurulması için firmalar yeterli bilgi ve tecrübeye sahip olup ilgili alana yatırımlarını yapmaları yeterli olacaktır. Benzer alanda faaliyet gösteren firmalar bir araya gelerek Li iyon bataryalar için polimer bağlayıcı üretimine yatırımla birlikte üretimlerini bu alana kaydırabilirler.

Akademisyenler polimer bağlayıcıların üretimine destek verebilecek bilgi ve tecrübeye sahiptir. Doğru yatırımlar yapıldığı sürece ülkemizde artan batarya üretim fabrikalarında ihtiyaç duyulacak olan polimerlerin üretimi akademik danışmanlıklarla birlikte hızla gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Beletskaya, I., Tyurin, V. S., Tsivadze, A. Y., Guillard, R. and Stern, C., 2009. Supramolecular chemistry of metalloporphyrins. *Chemical reviews*, 109, 1659-1713.
- Cai, J. J., Zuo, P. J., Cheng, X. Q., Xu, Y. H. and Yin, G. P., 2010. Nano-silicon/polyaniline composite for lithium storage. *Electrochemistry communications*, 12, 1572-1575.
- Cao, L., Wang, L., 2022. New covalent bonding ability for proteins. *Protein Science*, 31, 312-322.
- Chen, H., Ling, M., Hencz, L., Ling, H. Y., Li, G., Lin, Z. and Zhang, S., 2018. Exploring chemical, mechanical, and electrical functionalities of binders for advanced energy-storage devices. *Chemical reviews*, 118, 8936-8982.
- Chen, H., Wu, Z., Su, Z., Chen, S., Yan, C., Al-Mamun, M. and Zhang, S., 2021. A mechanically robust self-healing binder for silicon anode in lithium ion batteries. *Nano Energy*, 81, 105654.



- Chew, S. Y., Guo, Z. P., Wang, J. Z., Chen, J., Munroe, P., Ng, S. H., Zhao, L. and Liu, H. K., 2007. Novel nano-silicon/polypyrrole composites for lithium storage. *Electrochemistry communications*, 9, 941-946.
- Cholewinski, A., Si, P., Uceda, M., Pope, M. and Zhao, B., 2021. Polymer binders: Characterization and development toward aqueous electrode fabrication for sustainability. *Polymers*, 13, 631.
- Dohany, J.E., 1994. Poly(vinylidene fluoride) under Fluorine Compounds *Organic Polymers*. *Encyclopedia of Chem Technology*, 11, 694-712.
- Du, Z., Zhang, S., Liu, Y., Zhao, J., Lin, R. and Jiang, T., 2012. Facile fabrication of reticular polypyrrole-silicon core-shell nanofibers for high performance lithium storage. *Journal of Materials Chemistry*, 22, 11636-11641.
- Ford, T.A., Hanford, W.E., U.S. Patent 2,435,537, assigned to DuPont Co., February 3, 1948.
- Ford, T.A., U.S. Patent 2,468,054, assigned to DuPont Co., April 26, 1949.
- Guo, Z. P., Wang, J. Z., Liu, H. K. and Dou, S. X., 2005. Study of silicon/polypyrrole composite as anode materials for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 146, 448-451.
- Guerre, M., Taplan, C., Winne, J. M., Du Prez, F. E., 2020. Vitrimers: directing chemical reactivity to control material properties. *Chemical science*, 11, 4855-4870.
- Hanke, A., Eisenriegler, E. and Dietrich, S., 1999. Polymer depletion effects near mesoscopic particles. *Physical Review E*, 59, 6853.
- Hauptschein, A., Feinberg, A. H., U.S. Patent 3,188,356, assigned to Pennsalt Chemicals Corp., June 8, 1965.
- Hauptschein, M., U.S. Patent 3,193,539, assigned to Pennwalt Corp., July 6, 1965.
- Hong, X., Jin, J., Wen, Z., Zhang, S., Wang, Q., Shen, C. and Rui, K., 2016. On the dispersion of lithium-sulfur battery cathode materials effected by electrostatic and stereo-chemical factors of binders. *Journal of Power Sources*, 324, 455-461.
- Hu, X., An, A. K., Chopra, S. S., 2022. Life cycle assessment of the polyvinylidene fluoride polymer with applications in various emerging technologies. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10, 5708-5718.
- Ito, S., Murata, T., Hasegawa, M., Bito, Y. and Toyoguchi, Y., 1997. Study on C_xN and C_xS with disordered carbon structure as the anode materials for secondary lithium batteries. *Journal of power sources*, 68, 245-248.
- Jeon, J., Yoo, J. K., Yim, S., Jeon, K., Lee, G. H., Yun, J. H. and Jung, Y. S., 2019. Natural-wood-derived lignosulfonate ionomer as multifunctional binder for high-performance lithium-sulfur battery. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7, 17580-17586.
- Jeschull, F., Lacey, M. J. and Brandell, D., 2015. Functional binders as graphite exfoliation suppressants in aggressive electrolytes for lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 175, 141-150.
- Kovalenko, I., Zdyrko, B., Magasinski, A., Hertzberg, B., Milicev, Z., Burtovyy, R., Luzinov I., Yushin, G., 2011. A major constituent of brown algae for use in high-capacity Li-ion batteries. *Science*, 334, 75-79.
- Kwon, T. W., Jeong, Y. K., Lee, I., Kim, T. S., Choi, J. W. and Coskun, A., 2014. Systematic molecular-level design of binders incorporating Meldrum's acid for silicon anodes in lithium rechargeable batteries. *Advanced materials*, 26, 7979-7985.
- La, H. S., Park, K. S., Nahm, K. S., Jeong, K. K. and Lee, Y. S., 2006. Preparation of polypyrrole-coated silicon nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 272, 22-26.
- Lee, S., Gendensuren, B., Kim, B., Jeon, S., Cho, Y. H., Kim, T. and Oh, E. S., 2019. Effect of emulsified polymer binders on the performance of activated carbon electrochemical double-layer capacitors. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 36, 1940-1947.
- Li, L., Lu, F., Wang, C., Zhang, F., Liang, W., Kuga, S., Dong, Z., Zhao, Y., Huang, Y. and Wu, M., 2018. Flexible double-cross-linked cellulose-based hydrogel and aerogel membrane for supercapacitor separator. *Journal of Materials Chemistry A*, 6, 24468-24478.
- Liu, G., Xun, S., Vukmirovic, N., Song, X., Olalde-Velasco, P., Zheng, H., Battaglia, V.S., Wang, L., Yang, W., 2011. *Adv. Mater.* 23, 4679.
- Liu, J., Zhang, Q., Wu, Z. Y., Wu, J. H., Li, J. T., Huang, L. and Sun, S. G., 2014. A high-performance alginate hydrogel binder for the Si/C anode of a Li-ion battery. *Chemical communications*, 50, 6386-6389.
- Loeffler, N., Kopel, T., Kim, G. T. and Passerini, S., 2015. Polyurethane binder for aqueous processing of Li-ion battery electrodes. *Journal of the Electrochemical Society*, 162, A2692.
- Magasinski, A., Zdyrko, B., Kovalenko, I., Hertzberg, B., Burtovyy, R., Huebner, C. F. and Yushin, G., 2010. Toward efficient binders for Li-ion battery Si-based anodes: polyacrylic acid. *ACS applied materials and interfaces*, 2, 3004-3010.
- Mazouzi, D., Karkar, Z., Hernandez, C. R., Manero, P. J., Guyomard, D., Roué, L., and Lestriez, B., 2015. Critical roles of binders and formulation at multiscales of silicon-based composite electrodes. *Journal of Power Sources*, 280, 533-549.



- Murase, M., Yabuuchi, N., Han, Z. J., Son, J. Y., Cui, Y. T., Oji, H. and Komaba, S., 2012. Crop-derived polysaccharides as binders for high-capacity silicon/graphite-based electrodes in lithium-ion batteries. *ChemSusChem*, 5, 2307-2311.
- Qiu, D., Guan, J., Li, M., Kang, C., Wei, J., Li, Y. and Yang, R., 2019. Kinetics enhanced nitrogen-doped hierarchical porous hollow carbon spheres boosting advanced potassium-ion hybrid capacitors. *Advanced Functional Materials*, 29, 1903496.
- Porzio, Jason, and Corinne D. Scown., 2021. Life-cycle assessment considerations for batteries and battery materials. *Advanced Energy Materials* 11, 2100771.
- Rehm, B. H. (Ed.). 2009. *Alginates: biology and applications*, Springer Science and Business Media, vol 13.
- Salini, P. S., Gopinadh, S. V., Kalpakasseri, A., John, B. and Thelakkattu Devassy, M., 2020. Toward greener and sustainable Li-ion cells: an overview of aqueous-based binder systems. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8, 4003-4025.
- Schultz N, Martens P, Vahlensieck HJ. German Patent 2,659,712, assigned to Dynamit Nobel AG, July 6, 1976.
- Shin, D., Park, H. and Paik, U., 2017. Cross-linked poly (acrylic acid)-carboxymethyl cellulose and styrene-butadiene rubber as an efficient binder system and its physicochemical effects on a high energy density graphite anode for Li-ion batteries. *Electrochemistry Communications*, 77, 103-106.
- Solvay-Werke Gmbh British Patent 1,004,172, assigned to Deutsche Solvay-Werke GmbH, September 8, 1965.
- Su, D. S., Zhang, J., Frank, B., Thomas, A., Wang, X., Paraknowitsch, J., Schlögl, R., 2010. Metal-free heterogeneous catalysis for sustainable chemistry. *ChemSusChem: Chemistry & Sustainability Energy & Materials*, 3, 169-180.
- Toigo, C., Singh, M., Gmeiner, B., Biso, M. and Pettinger, K. H., 2020. A method to measure the swelling of water-soluble PVDF binder system and its electrochemical performance for lithium ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 167, 020514.
- Wang, R., Feng, L., Yang, W., Zhang, Y., Zhang, Y., Bai, W. and Guan, H., 2017. Effect of different binders on the electrochemical performance of metal oxide anode for lithium-ion batteries. *Nanoscale research letters*, 12, 1-11.
- Wang, S., Urban, M. W., 2020. Self-healing polymers. *Nature Reviews Materials*, 5, 562-583.
- Wang, W., Yue, X., Meng, J., Wang, X., Zhou, Y., Wang, Q. and Fu, Z., 2018. Comparative study of water-based LA133 and CMC/SBR binders for sulfur cathode in advanced lithium-sulfur batteries. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123, 250-257.
- Wang, Z., Tao, F. and Pan, Q., 2016. A self-healable polyvinyl alcohol-based hydrogel electrolyte for smart electrochemical capacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, 4, 17732-17739.
- Wu, M., Xiao, X., Vukmirovic, N., Xun, S., Das, P. K., Song, X. and Liu, G., 2013. Toward an ideal polymer binder design for high-capacity battery anodes. *Journal of the American Chemical Society*, 135, 12048-12056.
- Wu, X. L., Guo, Y. G. and Wan, L. J., 2013. Rational design of anode materials based on group IVA elements (Si, Ge, and Sn) for lithium-ion batteries. *Chemistry-An Asian Journal*, 8, 1948-1958.
- Yang, Y., Yu, G., Cha, J. J., Wu, H., Vosgueritchian, M., Yao, Y., Bao, Z., and Cui, Y., 2011. Improving the performance of lithium-sulfur batteries by conductive polymer coating. *ACS nano*, 5(11), 9187-9193.
- Yao, J., Jia, Z., Zhang, P., Shen, C., Wang, J., Aguey-Zinsou, K. F. and Wang, L., 2013. Preparation of Si-PPy-Ag composites and their electrochemical performance as anode for lithium-ion batteries. *Ionics*, 19, 401-407.
- Yoon, J., Oh, D. X., Jo, C., Lee, J. and Hwang, D. S., 2014. Improvement of desolvation and resilience of alginate binders for Si-based anodes in a lithium ion battery by calcium-mediated cross-linking. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16, 25628-25635.
- Yue, L., Zhong, H., Tang, D. and Zhang, L., 2013. Porous Si coated with S-doped carbon as anode material for lithium ion batteries. *Journal of solid state electrochemistry*, 17, 961-968.
- Zhang, Q. M., Bharti, V. and Kavarnos, G., 2002. Poly (vinylidene fluoride)(PVDF) and its copolymers. *Encyclopedia of smart materials*. John Wiley and Sons, 807-825.
- Zheng, J., Png, Z. M., Ng, S. H., Tham, G. X., Ye, E., Goh, S. S. and Li, Z., 2021. Vitrimers: Current research trends and their emerging applications. *Materials Today*, 51, 586-625.
- Zhou, X. Y., Tang, J. J., Yang, J., Zou, Y. L., Wang, S. C., Xie, J. and Ma, L. L., 2012. Effect of polypyrrole on improving electrochemical performance of silicon based anode materials. *Electrochimica Acta*, 70, 296-303.
- Zhu, X., Zhang, F., Zhang, L., Zhang, L., Song, Y., Jiang, T., Liu, Z., 2018. A highly stretchable cross-linked polyacrylamide hydrogel as an effective binder for silicon and sulfur electrodes toward durable lithium-ion storage. *Advanced Functional Materials*, 28, 1705015.

İnternet Kaynakları

- [1] <https://www.precedenceresearch.com/lithium-ion-battery-market#:~:text=What%20is%20the%20current%20size,US%24%20278.27%20billion%20by%202030,12.01.2023.>



HÜCREDEN PAKETE: BATARYA VE ALT BİLEŞENLERİ

H. G. Kül^{1,2}[+], K. Ç. Barbas³, Y. C. Çelik³, F. Zengin⁴, A. Kocaman⁵, A. Altınay⁶, M. N. Ateş⁷, N. U. Bakoğlu³, K. C. Bayar⁸

ÖZET

Lityum iyon pil üretiminde ilk süreç hammaddelerden malzemelerin üretilip sonra bu malzemelerin hücre oluşturmak için bir araya getirilmesi daha sonra hücrelerin bir araya getirilerek modüllerin oluşturulması ile devam eder ve modüllerin bir araya getirilerek batarya paketlerinin oluşturulması ile son bulur. Bu süreçlerde malzemelerin tasarımları, seçimleri yanı sıra hücre, modül ve batarya tasarımları da oldukça büyük önem taşır.

Bu bölümde öncelikle hücre, modül ve batarya paketi tasarımlarından bahsedilecektir. Daha sonra bu tasarımlarda yer alan malzemelerin ülkemizde üretilebilirliği incelenecek, en son bölümde ise batarya pazar yapısından bahsedilecektir. Ülke ve kıta bazlı sektörün majör oyuncularını ve sektör analizleri yatırım detayları paylaşılacaktır. Avrupa ve Kuzey Amerika'da yeni pil üreticilerinin üçüncü bir dalgası şekillenmektedir, ancak bugün çoğunlukla planlama veya ölçeklendirme aşamasındadırlar. Üretim verileri ışığında kıta bazlı olarak sektördeki major oyuncular, beyan kapasiteleri, ürün çeşitleri ve yatırımları paylaşarak batarya pazarının dünyadaki durumları incelenecektir. Ayrıca fiyat analizleri, tedarik zincirleri ve devlet politikaları da paylaşarak kapsamlı bir inceleme yapılmaya çalışılacaktır.

[+] gencer@baterials.com

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Maslak, 34469 İstanbul, Türkiye.

2 Bateriais Ltd. London, WC2H 9JQ, England.

3 ASPİLSAN Enerji A.Ş., Mustafa Kemal Mahallesi 2127. Cadde No: 40 Çankaya, 06510 Ankara, Türkiye.

4 Marmara Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Recep Tayyip Erdoğan Külliyesi, Maltepe, 34854 İstanbul, Türkiye.

5 METCOM, Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği ve Teknolojileri Ltd., Emniyet Evleri Mah. Kağıthane, 34415 İstanbul, Türkiye.

6 Core Cell Teknoloji Yatırım İnşaat San. AŞ, Mutlukent Mah. 1986. Sokak No:18 Çankaya, 06800 Ankara, Türkiye.

7 Boğaziçi Üniversitesi, Kimya Bölümü, Bebek, 34342, İstanbul, Türkiye.

8 EVER İnovasyon ve Teknoloji AŞ, Sarıyer 34450, İstanbul, Türkiye.

1. LİTYUM İYON HÜCRE TASARIMLARI

Cep telefonlarında genellikle tek bir pil/hücre bulunurken dizüstü bilgisayarlarda bu pillerden birkaç tane vardır. Elektrikli araçlarda ise yüzlerce veya binlerce hücre bulunmaktadır. Her hücre, kendine has elektrokimyasal yapısı ile, kendi kendine yeten, kapalı bir pakettir. Hücreler genellikle düğme, silindirik, prizmatik ve kese tipi olmak üzere değişik geometrik şekil veya formlarda üretilip kullanılmaktadırlar. Düğme şeklindeki piller genellikle değişik çaplarda küçük elektrikli (saat, hesap makinesi vb) cihazlar için gerekli elektrik enerjisi sağlarlar. Elektrikli araç batarya paketlerinde düğme piller kullanılmadığından bu bölümde düğme piller ayrıntılı olarak anlatılmayacaktır.

1.1. Geometrik Şekline Göre Hücre Tasarımları

1.1.1. Silindirik (Cylindrical) Hücre/Pil

Silindirik hücrelerin en bilinenleri günlük hayatta yaygın olarak kullanılan AA (~ 13,5-14,5mm çap ve 49,2-50,5 mm yükseklik) veya AAA (~10,5 mm çapındadır. 44,5 mm yükseklik) kalem pil olarak bilinen hücrelerdir. Uzaktan kumandalar başta olmak üzere pek çok kablosuz ev aletinde kullanılmaktadırlar. Elektrikli Araç bataryalarında en yaygın olan silindirik hücreler 18650, 21700 ve 4680 modelleridir (18650 modeli için 18 mm çap, 65 mm yükseklik, 0, dairesel şekli temsil eder). Şekil 1’de yerli olarak üretimi gerçekleştirilen 18650 ASPİLSAN A28 pil görseli verilmiştir.

Silindirik hücrede anot, seperatör ve katot şeritler silindir şeklinde sarılır ve bir silindir kutu içerisine yerleştirilip sıvı elektrolit doldurularak sızdırmaz şekilde paketlenir. Silindirik hücre üretimi geleneksel olarak tabir edilebilecek ilk üretim teknolojilerini barındırması ve seri üretime uygun olması nedeniyle yaygındır.



Şekil 1. ASPİLSAN Enerji üretimi silindirik 18650 tip hücre. (Görsel ASPİLSAN Enerji'nin izniyle kullanılmıştır. Görselin tüm hakları ASPİLSAN Enerji A.Ş.'ye aittir.)

1.1.2. Prizmatik (Prismatic) Hücre/Pil

Prizmatik hücreler, dikdörtgenler prizması şeklinde olup cep telefonları, tabletler ve tıbbi cihazlar gibi düz dikdörtgen şekilli cihazlara enerji sağlamak için kullanılırlar.

Prizmatik hücrede de anot, seperatör ve katot şeritler dikdörtgenler prizması şeklinde sarıldıktan sonra dikdörtgen metalik (alüminyum veya çelik) veya sert plastik bir kasaya yerleştirilir ve sıvı elektrolit doldurularak sızdırmaz şekilde paketlenir. Bu sert muhafaza, iç basınç oluşması durumunda şişkinlik riskini azaltır.

Düz ve geniş yüzeyli olmaları nedeniyle paketleme yoğunluğu silindirik hücrelere göre yüksek olduğundan, elektrikli araçlar veya daha büyük araç ve cihazlara entegre edilmeye uygundurlar. Yüksek mekanik sağlımlıkları nedeniyle prizmatik hücreler, doğrudan hücreden pakete tasarımlara elverişlidirler. Belirli standart boyutları mevcut olmasına rağmen elektrikli üreticileri ihtiyaçlarına uygun boyutlarda prizmatik hücre tasarımları da yapılabilirler.

1.1.3. Kese tipi (Pouch) Hücreler

Kese tipi hücrelerde anot, seperatör ve katot şeritler tasarlanan boyutlarda istiflendikten sonra sıvı elektrolit doldurularak sert bir muhafaza yerine genellikle alüminyum lamine folyo kese içerisine yerleştirilir ve sızdırmaz şekilde paketlenir. Kesenin dış koruyucu katmanları genellikle naylon BOPA (iki Eksenli Yönlendirilmiş Poliamid) veya PET'ten (Polietilen tereftalat) oluşur.

Silindirik ve prizmatik hücrelere göre daha yeni tasarım olan kese tipi hücreler elektrikli araçlarda yakın zamanda kullanılmaya başlanılmışlardır. Kullanım amacına göre değişik en ve boylarda üretilebilirler. Bu hücrelerde sıvı elektrolit yanı sıra katı polimer elektrolit kullanılabilir ve bu hücreler kamuoyunda polimer hücreler olarak bilinirler.

1.2. Elektrot Tasarımına Göre Hücre Çeşitleri,

Yeni ticari lityum iyon pillerin tasarımı ve geliştirilmesi, amaçlanan uygulama tarafından belirlenen yüksek enerji veya yüksek güç yoğunluğu (Lain vd. 2019) arasındaki mühendislik dengesi ile karakterize edilir ve sınırlıdır. Yüksek enerji pillerinin (YE, High Energy: HE) temel özellikleri yüksek enerji depolama kapasitelerine sahip olmalarıdır. Enerji pilinde pilin enerjisi onun kapasitesidir. Yüksek güç pillerinde (YG, High Power: HP) ise enerji iletimi oldukça önemlidir. Enerjiyi en hızlı ileten pil, en güçlü pildir. Yüksek enerjili uygulamalar için, elektrot hacminin pil hücresi hacmine ve aktif malzemenin elektrot hacmine göre maksimum düzeye çıkarılması çok önemlidir (Şekil 2). Bunun aksine, yüksek güçlü uygulamalar (yani elektronik, iyonik ve termal) için elektrot direncinin en aza indirilmesi gerekir (Ding vd., 2019). Bu ikili yüksek enerjili veya yüksek güçlü tasarım yaklaşımının yanı sıra, enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğunun çarpımını maksimuma çıkarmak gibi çok amaçlı optimizasyonlar yapmak mümkündür (Mei vd., 2019). Elektrot ve hücre tasarım parametreleri;

- negatif/pozitif kapasite oranını,
- aktif malzeme türlerini,
- elektrotlardaki malzemelerin oranını,
- elektrot boyutlarını,
- elektrot katmanının yoğunluklarını ve kalınlıklarını,
- gözenekli malzemelerin özelliklerini (yoğunluk, gözeneklilik, gözenek kıvrımlılığı, parçacık tipi ve boyutu vb.),
- akım toplayıcıları,
- seperatörü,
- elektroliti ve
- iletken şeritleri kapsar.



Şekil 2. Enerji ve güç pillerinin karşılaştırılması (Int. Kyn. 1).

Burada, bileşenler arasındaki ve kendi aralarındaki tüm karşılıklı bağımlılıkların dahil edilmesi esastır. Üç örnek bunu açıklayacaktır.

- Elektrot gözenekliliği yalnızca enerji yoğunluğunu ve güç yoğunluğunu değil aynı zamanda mekanik stabiliteyi ve partikül uyumunu da etkiler (Rauscher, 2014).
- Elektrot kalınlığı spesifik kapasiteyi [$\text{mA}\cdot\text{sa}\cdot\text{cm}^{-2}$] ve aktif-pasif malzeme oranını ve dolayısıyla enerji yoğunluğunu, aynı zamanda iç direnci ve dolayısıyla yüksek güç kapasitesini etkiler.
- Daha ince akım toplayıcılar termal ve ohmik direnci artırır ve dolayısıyla yüksek güç kapasitesini azaltır ancak aktif malzemenin elektrokimyasal olarak pasif akım toplayıcılara oranı arttıkça enerji yoğunluğunu artırır.

Elektrot malzemesine uygun iletken katkı maddeleri ve bağlayıcılar elektrot özelliklerini daha da optimize edilebilir (Lain vd., 2019). Lain ve ekibinin çalışmasından uyarlanan Tablo 1, mühendislik değiş tokuşunu temel olarak özetlemekte ve tasarım yönünü sınıflandırmaktadır.

Tablo 1. Yüksek enerji veya yüksek güç lityum iyon hücreleri için tasarım parametreleri (Lain vd., 2019).

Bileşenler	Yüksek Enerji Hücresi (HE hücresi)	Yüksek Güç Hücresi (HP hücresi)
Elektrotlar	Kalın elektrotlar (yüksek kaplama ağırlığı) Düşük gözeneklilik Küçük iletken karbon katkısı Orta/büyük partikül boyutu	İnce elektrotlar (düşük kaplama ağırlığı) Yüksek gözeneklilik Yüksek iletken karbon katkısı Küçük/orta partikül boyutları
Akım toplayıcı	İnce	Kalın
Seperatör	İnce	Optimum kalınlığa ve yüksek gözenekliğe sahip
Elektrolit	Yüksek güvenlik	Yüksek güvenlik ve yüksek iyonik iletkenlik

1.3. Lityum İyon Hücrelerin Karşılaştırması

Hücrelerin/pillerin seri ve/veya paralel bağlanması ile modüller elde edilir. Hücre ve modül tasarımlarında enerji yoğunluğunu artırmak ve kW-sa başına maliyeti azaltmak temel amaçlar arasında yer alır. Prizmatik şekil, kalın hücre üretimine olanak sağladığından modül tasarımlarında hücreler arasındaki boşlukları en aza indirir ve yüksek hacimsel enerji yoğunluğu sağlar. Bu yönü ile prizmatik hücre ile yapılan modül tasarımları silindirik hücrelerden daha avantajlıdır (Bknz. Tablo 2).

Elektrikli araçlarda değişik çap ve yüksekliklerde (18650, 21700 ve 4680) silindirik hücreler yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda Tesla, özellikle uç kullanmadan (tabless) ürettiği 4680 silindirik bataryalarda kW-sa başına maliyette yaklaşık %15 oranında düşüşün mümkün olabileceğini duyurmuştur. Ancak, daha büyük bataryalarda ısınma problemi ve hızlı şarj zorlukları ortaya çıkabileceği de unutulmamalıdır (Int. Kyn. 2).

Tablo 2. Değişik standartlarda hücre ve modül tasarımları.

Hücre ve modüller	Örnekler
Silindirik hücre	 4680, 21700 ve 18650 Uçsuz (Tabless) 4680
Prizmatik hücre	 VDA (Verband der Automobil Industrie) Bıçak tipi (Blade)
Kese tipi hücre	 Tek-yönlü (Uni Directional) İki Yönlü (Bi-directional)
Batarya Modülü	 VDA 355 modül VDA 590 modül

VDA (Alman Otomotiv Endüstrisi Birliği) oluşturduğu prizmatik hücre standardında uzunluk x yükseklik x kalınlık (uç mesafesi hariç) belirtilerek boyutlandırma yapılmıştır. Örneğin 40 A-sa'lık araçlarda batarya boyutları 173 x 115 x 32 mm'dir (Int. Kyn. 3).



Bıçak hücre olarak bilinen tasarımlar esas olarak dikdörtgen şeklinde ve sert muhafaza içinde uzun ve ince bir geometriye sahiptir. Genel boyutlar 960 mm × 90 mm × 13,5 mm'dir. Farklı modellerin boyutları farklı olabilir. Örneğin 138 A-sa bıçak hücrenin kalınlığı yaklaşık 12 mm iken 202 A-sa hücrenin kalınlığı yaklaşık 13,5 mm'dir (Int. Kyn. 4).

Tablo 3. Değişik kimya ve geometrilerde hücrelerin enerji yoğunlukları.

Üretici Firma	Hücre Modeli	Kimyası	Boyutlar	Kapasite	Gerilim	Enerji	Ağırlık	Hücre Enerji Yoğunluğu	Araç modeli	Paket Enerji Yoğunluğu
			(mm)	(A-sa)	(V)	(W-sa)	(kg)	(W-sa·kg ⁻¹)		(W-sa·kg ⁻¹)
Prizmatik hücreler										
CATL	CB260	LFP	207,2x200,3x33,4	150	3,2	480,0	2,95	162,71		
CATL	CB210	LFP	200,3x172,2x33,2	100	3,2	320,0	2,27	140,97		
CATL		LFP		163,3	3,2	522,6	3,10	163,00	Tesla Model 3	125,00
BYD		LFP		150	3,2	480,0	2,89	166,00	BYD Han	144,26
Samsung	SDI94	NMC	173x125x45	94	3,68	345,9	2,10	164,72		
CALB	L148N58A	NMC	148,2x105,9x26,7	58	3,7	214,6	0,93	231,75		
CALB	L221N118	NMC	220,8x84,9x44,5	118	3,67	433,1	1,87	231,58		
Samsung		NMC111		60	3,70	221,9	2,05	108,00	BMW i3 2013	80,00
Samsung		NMC111		94	3,68	345,6	2,01	172,00	BMW i3 2016	129,72
Samsung		NMC622		120	3,67	440,0	2,20	200,00	BMW i3 2018	151,80
CATL		NMC811		116	3,67	425,7	1,73	246,26	BMW iX3	154,99
Silindirik hücreler										
BYD	FC46120P	LFP	46120	24,5	3,2	78,4	0,453	173,07		
BYD	FC4680	LFP	4680	15,3	3,2	49,0	0,335	146,15		
A123	ANR26650M1B	LFP	26650	2,5	3,3	8,3	0,076	108,55		
Samsung	ICR1865026F	NMC	18650	2,6	3,7	9,6	0,047	204,68		
Aspilsan	INR18650A28	NMC811	18650	2,8	3,65	10,2	0,0445	229,66		
Panasonic		NCA	18650	2,6	3,7	9,6	0,0465	206,88	Toyota RAV4 2012	110,77
Panasonic		NCA	18650	3,4	3,66	12,4	0,049	253,96	Tesla Model S 2019	165,44
Panasonic		NCA	21700	4,8	3,7	17,8	0,069	257,39	Tesla Model 3 2021	170,83
Samsung	50G	NCA	21700	5	3,63	18,2	0,0695	261,15	Rivian R1T	177,30
Panasonic		NCA	4680	23,35	3,7	86,4	0,355	243,37	Tesla Model Y	160,75
Kese-tipi hücreler										
AESC		LMO		32,5	3,75	121,9	0,787	155,00	Nissan Leaf 2011	81,63
A123	WX14I3231	LFP	308,5x102,5x9,9	31	3,2	99,2	0,61	162,62		
EVE	D21	NMC	301,5x99,7x11,6	50,5	3,65	184,3	0,74	249,09		
AESC		NMC		43	3,73	160,4	0,966	166,00	Nissan Leaf 2015	97,75
AESC		NMC523		56,3	3,65	205,5	0,914	225,00	Nissan Leaf 2016	130,23
LG Energy	LGX E63	NMC622		65,6	3,6	236,2	0,965	244,73	Renault ZOE	148,66
LG Energy	LGX E63B	NMC622	310x114x15	60	3,63	225,2	0,8878	253,66	Hyundai Kona	149,34
LG Energy	LGX E66A	NMC712	350x104x11,7	65	3,657	232,2	0,897	258,86	Porsche Taycan	143,00
LG Energy	LGX E78	NMC712	548x100x8,65	78	3,67	286,0	1,083	264,08	Audi Q4 e-Tron	157,14
SK On		NMC		55,6	3,63	201,8	0,8625	234,00	KIA EV6	162,23



Çinli BYD şirketi tarafından geliştirilen bu hücrelerde katot malzemesi LiFePO₄ olup geliştirilmiş enerji yoğunluğu ve azaltılmış maliyetlerin yanı sıra oldukça güvenlidir. Prizmatik ve bıçak şeklindeki hücrelerin avantajlarından bir diğeri de silindirik hücreler kadar ilave sabitleme gerektirmemeleridir.

Kese tipi hücrelerde tek yönlü ve iki yönlü tasarımlar mevcuttur. Tek yönlü tasarımlarda artı ve eksi yüklü terminal/bağlantı uçları kesenin bir ucunda iken, iki yönlü kese tipinde artı kutup bir uçta, eksi kutup diğ er uçta yer alır (Park vd., 2022).

Silindirik hücreler dairesel şekillerine bağlı olarak prizmatik ve kese tipi hücrelere göre hücre çalışması esnasında ortaya çıkan ısıyı çevreye daha iyi yayarlar ve mekanik olarak daha kararl ıdırlar. Modül veya batarya paketi oluşumunda silindirik hücrelerle temel dezavantaj ı aynı hacimde diğ er hücrelere göre daha az hücre yerleştirilebilmesidir. Bu, benzer güç seviyelerine ulaşmak için prizmatik veya kese tipi hücrelere nazaran daha fazla hücre ihtiyacı ve hücrelerin sabitlenmesi için daha fazla montaj ve daha ağır batarya paketi demektir.

Silindirik hücre üretim teknolojinin olgunluğu, gelişmişliğ i ve erişim kolaylığ ı, hem yatırım hem de üretim maliyetlerinin düşük olması sonucunu getirmektedir. Aynı zamanda pazarda pek çok tedarikçinin bulunması sonucu oluşan rekabetçi ortamla alıcıların aralarından seçim veya aralarında geçiş yapabilecekleri uygun fiyatlı pazar da oluşmaktadır.

Yüksek mekanik stabilitesi ve tasarımıyla silindirik hücre çoğ unlukla optimize edilmiş otomasyon süreçleri ve teknikleriyle üretilebilir. Bu da kalitede tutarlılığ ı artırır ve birim başına maliyeti düşürür. Aslında pek çok üretici, ürün tekdüzeliğ i yaratan bu tip hücre üretebilir. Bu, elektrikli araç veya batarya paket üreticisine herhangi bir nedenle teslimat yapılamaması durumunda, performans ve boyut açısından benzer ürünü üreten başka bir tedarikçi bulunabileceğ i veya tedarikçiler arası geçiş yapılabileceğ i anlamına gelir.

Silindirik şekli nedeniyle batarya modülündeki mevcut alanın tam olarak kullanılması mümkün değ ildir, bu da silindirik hücrelerle oluşturulan paketlerde daha düşük paketleme yoğunluğ unu yol açar. Bu nedenle silindirik hücreler performans ve optimizasyon açısından sınırlarına ulaşmakta ve bu da bunların yeni nesil hücreler için fırsat olup olmadığı konusunda tartışmaların ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Silindirik hücre, sarılmış elektrotlarından dolayı iyi bir hacim kullanımına, yüksek enerji yoğunluklarına, yüksek hücre sağlamlığ ına sahip olup geleneksel üretim süreçleri nedeniyle de düşük maliyetlidir. Diğ er tasarımlarla karşılaştırıldığında küçük hacimleri nedeniyle hücre başına düşük enerji içerikleri dezavantaj olarak görülebilir ve elektrotun dinamik sarım yarıçapı hücrede homojen olmayan mekanik kuvvetlere de yol açabilir.

Prizmatik hücreler paketleme yoğunluğ u için ideal olan tasarımlardır. Silindirik hücrelere göre daha az elektrik bağlantısına ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca boyut farklılıkları göz önüne alındığında, belirli durumlarda bir prizmatik hücre, 20-100 silindirik hücrenin enerji eşdeğ erini içerebilir. Şekil faktörü hücrelerin istiflenmesini kolaylaştırırken, vidalı bağlantı uçlarının kullanımı, montaj ve arızalı ürün değ işimini kolaylaştırır.

Bütün bu avantajlara rağmen, prizmatik şeklin getirdiğ i olumsuzluklardan biri çalışma esnasında köşelere yakın elektrot ve ayırıcı tabakaların daha fazla gerilime maruz kalmasıdır. Bu, elektrotlardaki aktif malzeme içeren kaplamaların hasar görmesine ve eşit olmayan elektrolit dağılımına yol açabilir ve hücreler arasında silindirik şekilli olanlarda olduğu gibi boşluk olmadığından modül ve batarya paketinin ısı dağılımı zarar görür. Prizmatik hücrelerde standart boyutların olmaması kullanım esnekliğ i anlamına gelse de diğ er taraftan modeller arasında standardizasyon eksikliğ i prizmatik hücrelerin üretimini daha pahalı hale getirmektedir.

Hali hazırda, hücredeki yüksek hacim kullanımı ve hücre muhafazasının ağ ırlığ ı nedeniyle prizmatik hücreler, silindirik ve kese tipi hücrelere göre daha düşük enerji yoğunluğ unu sahiptirler (Bknz. Tablo 2). Şekil faktörü dışında, prizmatik hücrelerin kimyalarının hücre performanslarını etkilediğ i bilinmektedir. Farklı hücre şekilleri ve kimyalar karşılaştırıldığında, prizmatik hücrelerin tüm kimyalar için kW·sa başına daha düşük maliyet sunduğu tespit edilmiştir (Ciez ve Whitacre, 2017).

Kese tipi hücreler pazardaki en yeni ve en esnek batarya seçenek olup, yüksek enerji yoğunluğ u sunmakta ve aynı kapasitedeki çelik (silindirik) veya alüminyum (prizmatik) muhafazalı hücrelerden yaklaşık %40 daha hafiftirler. Her ne kadar düşük maliyetli dış gövde nedeniyle paketleme maliyeti düşük olsa da kese tipi hücreler elektrikli araçlarda kullanılmak istediğ inde modüller içerisinde birbirilerine kaynaklanarak bağlandıklarından modülde yer alan hücrenin birinde arıza oluştuğ unda tüm modülün değ iştilmesi gerektiğ i unutulmamalıdır.

Kese tipi hücre muhafazasının düşük ağ ırlığ ı, üretimde esneklik ve kullanım ömrü sonunda kolay geri dönüşüm sağlar. Ancak, poşet folyosunun düşük mekanik stabilite ve modül tasarımında zorluklar çıkarabilir.

Ayrıca, dış gövdenin nispeten düşük ısı iletkenliği ve mekanik stabilitesi ~500 şarj döngüsünden sonra orijinal boyutunun ~%10'una kadar şişmesine neden olabildiğinden kese hücreleri korumak için ekstra tasarımlara ihtiyaç olabilir. Keselerdeki keskin kenarlar ciddi bir tehdit oluşturur ve kese boyutları bazen soğutma sistemleri ile hücre merkezi arasında mesafeden dolayı sıcak noktaların oluşumunu engellemek zor olabilir (Int. Kyn. 5).

Mevcut güvenlik endişelerine rağmen gelişmeler, kese hücrelerinin yeni nesil hücre tipi olarak rağbet göreceğini göstermektedir. Batarya paketlerinin iyi paketleme verimliliği (~%95) ve daha iyi enerji yoğunluğu sunabilmesi güvenlik ve işlevsellik sağlamak amacıyla yapılan ekstra testlere ve tasarım değişikliklerine bağlıdır. Unutulmamalıdır ki güvenlik ve kese yapısının bütünlüğü sorun olmaya devam ederse kese tipi hücrelerin pazarda yaygın kullanım alanı bulması pek olası olmayacaktır.

Kese tipi hücreler daha düşük mekanik dirence sahiptir ve elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle oluşabilecek gazın neden olduğu potansiyel genleşme hala giderilmesi gerekli teknik problemler arasındadır. Ayrıca, ürünlerdeki standardizasyon eksikliği üretim maliyetlerini ve satış fiyatlarını etkilemektedir. Kese tipi hücreler, bu problemler çözülüp seri üretimde verimlilik artırıldığında pazarda daha etkin bir paya sahip olabilirler. Tablo 3'de hücre tiplerinin müşteri beklentilerine göre karşılaştırmaları verilmiştir.

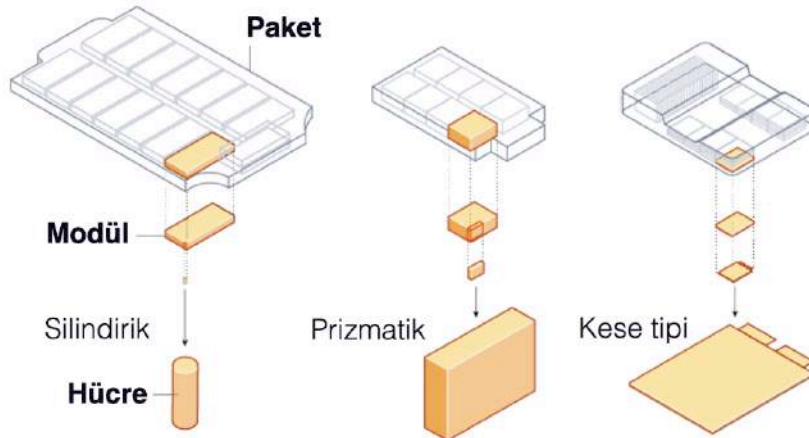
Tablo 4. Hücre geometrilerinin karşılaştırması (Int. Kyn. 6)

Özellikler	Silindirik	Prizmatik	Kese-tipi
Enerji yoğunluğu	●	●	○
Standart ölçüler / boyutlar	●	○	●
Maliyet / Enerji (W.sa)	●	○	○
İnce profil / boyutlar	○	●	●
Düşük Ağırlık	○	●	●
Hacimsel paket verimliliği	○	●	●
Şişme / şekil değiştirme	●	●	○

● En iyi
● Daha iyi
○ Ortalama
○ Kötu
● Daha kötü

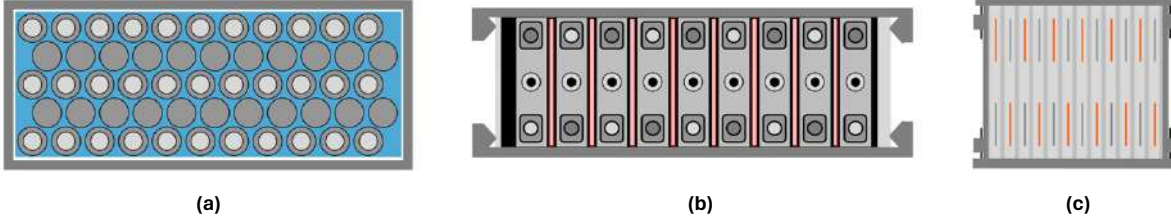
2. LİTYUM İYON MODÜL KAVRAMI VE TASARIMLARI

Geleneksel anlayışta hücrelerden modüller, modüllerden de batarya paketleri oluşturulur ve elektrikli araçlara entegre edilir (Bknz. Şekil 3). Modüller bireysel hücrelerin birbirlerine seri veya paralel bağlanması ile elde edilir. Hücrelerin yanı sıra diğer elektrikli, mekanik ve termal bileşenler de modüllere monte edilmektedir.



Şekil 3. Batarya hücrelerine göre batarya modül ve paket geometrileri (Harper vd., 2019).

Silindirik hücrelerden yapılmış batarya modül mimarisinde hücreler, hücre tutucuları aracılığıyla modül muhafazasına sabitlenir. Yuvarlak hücreler üst ve alt taraftaki baralarla (metal plakalar) temas ettirilir, seri ve paralel devre kombinasyonu ile bağlanır (Şekil 4.a). Silindir hücrelerin geometrilerinden dolayı hücre aralarında boşluklar bulunmaktadır. Çalışma esnasında hücrede oluşan ısı yüzey alanını maksimuma çıkarmak amacıyla değişik geometrilerde soğutma sistemleri kullanılır. En eski hücre şekli olması, standartlarının varlığı ve üretim teknolojisinin yaygın, kolay ve esnek olması nedeniyle fiyatları nispeten düşük olup batarya modüllerinde standart çözüm olarak kullanılırlar.



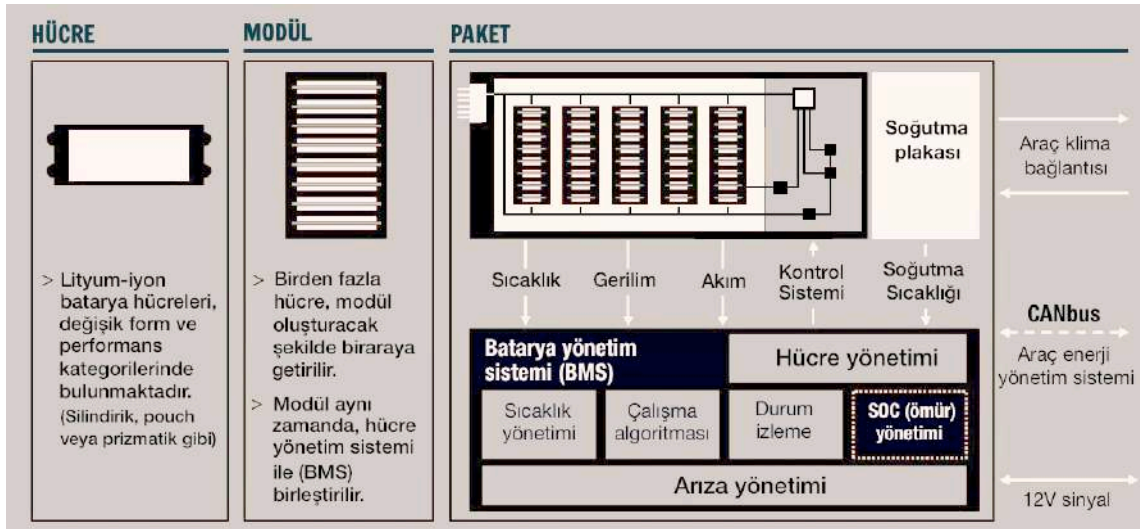
Şekil 4. (a) Silindirik hücreli modül, (b) Prizmatik hücreli modül, (c) Kese tipi hücreli modül (Heimes vd., 2018).

Prizmatik hücrelerden yapılmış batarya modülünde hücreler üst üste boşluk kalmayacak şekilde istiflenebilir (Şekil 4.b). Bireysel hücreler yapışkan filmler aracılığıyla birbirine temas ettirilir. Ayrıca hücrelerin arasına ped veya boşluk dolgusu yerleştirilip ısı ve titreşim koruması, düzgünlüklerin telafisi, hacim değişikliklerine ve darbe sonucu deformasyona varan olumsuzluklar için modül desteklenebilir. Hücreler, istiflenip, desteklendikten sonra muhafazasına yerleştirilerek oluşturulur.

Kese tipi hücrelerden yapılmış batarya modülü ise hücrelerin üst üste istiflenip birbirine bağlanacağı şekilde tasarlanmıştır (Şekil 4.c). Esnek zarfları sayesinde tek tek kese hücreleri önceden bir çerçeveye yerleştirilebilir. Hücreler arasına hacim dengelemesi için boşluk dolgusu veya aktif ve pasif soğutma elemanları yerleştirilebilir. Oluşan hücre yığını farklı şekillerde desteklenir ve modül muhafazasına yerleştirilir. Şarj veya deşarj döngüleri sırasında kese tipi hücrelerin hacim genişlemesi (nefes alması) modül tasarımında dikkate alınmalıdır.

3. LİTYUM İYON PAKET KAVRAMI VE TASARIMLARI

Batarya paketleri hücreleri içeren modüller, batarya yönetim sistemi (BYS), soğutma ve ısıtma yönetim sistemleri, kablolar ve koruyucu muhafazadan oluşur (Bknz. Şekil 5).



Şekil 5. Hücreden pakete batarya bileşenlerinin genel görünümü (Schlick vd. 2011).

Elektrikli araç batarya paketi tasarımlarının ilk yıllarında, paketler mevcut içten yanmalı motorlu (İYM) araç platformlarına uyarlanmak için genellikle motor bölümüne veya tahrik mili geçişine yerleştirilmiştir. Elektrikli araçlarda tipik batarya paketi konumlandırması arabanın ortasında ve/veya zeminin altında yapılmaktadır. Batarya paketleri

araçların hem sürüş güvenliği hem de maliyeti açısından önemli olup her elektrikli araç üreticisi kendisine özgü paketleme ve paket konumlandırma yapmaktadır.

Elektrikli araçlarda enerji yoğunluğunu ve araç maliyetini azaltmak için hücrelere benzer şekilde batarya paket tasarımları üzerine oldukça yoğun çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan tasarımlar;

- Modülden Pakete (Module to Pack, MP)
- Hücreden Pakete Tasarım (Cell-to-pack, HP)
- Hücreden Gövdeye Tasarım (Cell-to-body, HG)
- Hücreden Şasiye Tasarım (Cell-to-chassis, HŞ)
- Modülden Şasiye Tasarım (Module-to-chassis, MŞ) olmak üzere 5 başlık altında sınıflandırılabilir.

3.1. Modülden Pakete Tasarım (Module-to-pack, MP)

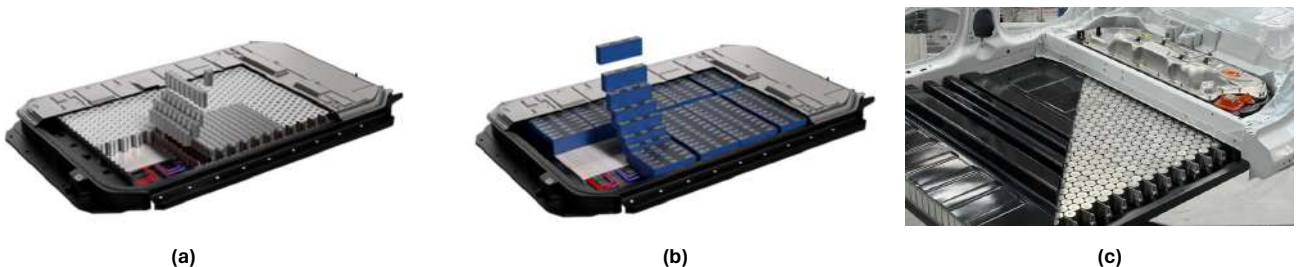
Modülden Pakete (MP) tasarım geleneksel olarak kullanılan EA batarya paketi tasarımıdır. Şekil 6'da gösterildiği gibi bir paket muhafazası içine monte edilmiş modüller ve modüllerin içinde yer alan hücrelerden oluşan çok katmanlı bir yapıdır. MP tasarımı sağlam olmakla birlikte çoklu muhafaza teknolojisi nedeniyle nispeten geniş alan ve çok sayıda bileşen gerektirir. Bu nedenle bu tasarım paket düzeyinde nispeten düşük bir enerji yoğunluğuna sahiptir (Pampel vd., 2022). MP, batarya üreticilerinin farklı hücre ve boyutları gerektiren farklı modelleri için ekonomik olarak ölçeklendirilebilir.



Şekil 6. MP tasarımlı bir batarya paketinin içindekilere birlikte resmi (Ürün: 5. Nesil BMW batarya paketi, görsel BMW basın görselidir).

3.2. Hücreden Pakete Tasarım (Cell-to-pack, HP)

Hacimsel enerji yoğunluğunu iyileştirmek için, yeni nesil elektrikli batarya paketleri, modülleri kullanmadan Hücreden Pakete (HP) tasarım geliştirilmiştir (Pampel vd., 2022). İlk HP batarya paketi, Çinli elektrikli araç batarya üreticisi CATL tarafından 2019 yılında pazara sürülmüştür. Aynı zamanlarda başka bir Çinli otomotiv firması olan BYD, modülleri ortadan kaldıran Blade “bıçak tipi” hücresini tanıtmıştır. Bu tasarımla daha yüksek enerji yoğunluğu yanısıra parça sayısında yaklaşık %40 oranında azalma ve dolayısıyla batarya paket maliyetinde düşüşü beraberinde getirmektedir (IEA, 2022). Şekil 7, HP'nin sırasıyla silindirik ve prizmatik hücrelerle nasıl tasarlanabileceğini göstermektedir.

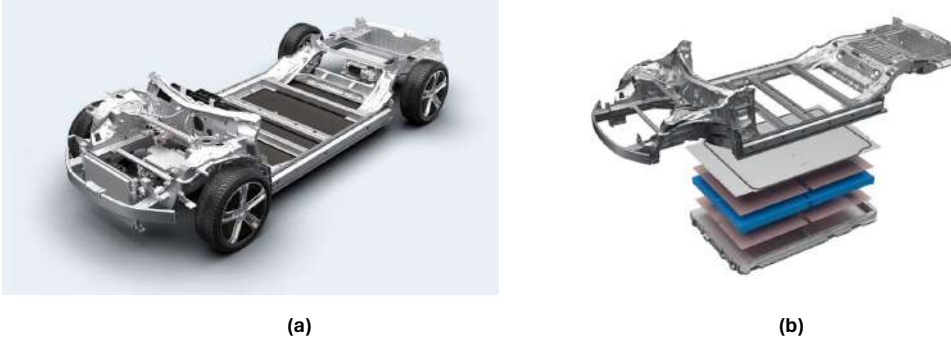


Şekil 7. CTP tasarımlı batarya paketleri (a) Silindirik ve (b) prizmatik hücrelerle geliştirilen (Henkel ürün görsellerinden alınmıştır) (c) Testa Motors'un 4680 silindirik hücrelerle tasarladığı HP paket yapısı (Int. Kyn. 7).

3.3. Hücreden Gövdeye Tasarım (Cell-to-body, HG)

BYD firması tarafından batarya/araç entegrasyonunda yenilik yapmak için önerilen, elektrikli araçların alan kullanımını artırmaya ve daha fazla performans elde etmeye yardımcı olan yeni bir batarya hücresi entegrasyonudur.

Yapısal tasarım açısından bakıldığında, BYD'nin hücreden gövdeye paket (HG) teknolojisi (Bknz Şekil 8.a ve b), gövde taban sacını ve batarya paketinin üst kabuğunu, (batarya üst kapağı, eşik ve ön ve arka kirişlerin oluşturduğu) tek bir parçada birleştirir. Yolcu kokpiti sızdırmaz bir kaplama ile kaplanır, montajlanarak gövde ile birleştirilmiştir. Bir başka deyişle batarya sistemi bir bütün olarak gövdeyle entegre edilir.



Şekil 8. BYD firmasının (a) BYD Seal model aracında kullandığı e-Platform 3.0 modeli HG mimarisini, (b) BYD Seal model aracın HG batarya konseptinin ayrıntılı resmi (Int. Kyn. 8).

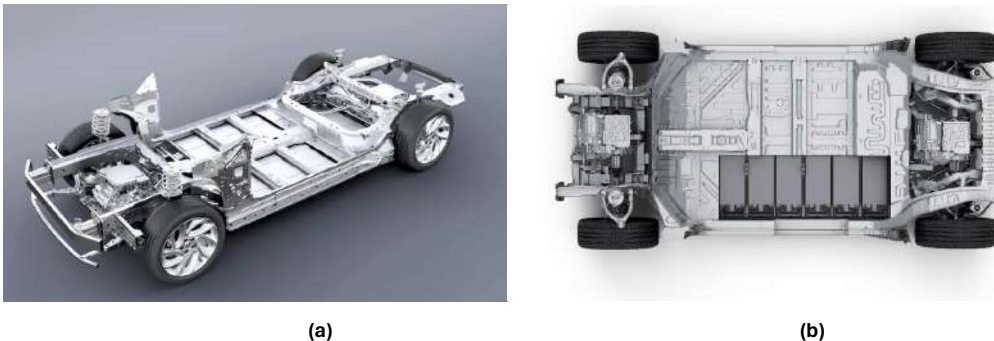
HG teknolojisi, HP'nin bir uzantısıdır. BYD'nin ilk HG'si daha basitleştirilmiştir. Gövde ile batarya kapağı arasındaki bağlantının neden olduğu alan kaybını azaltır ve genel alan kullanımını daha da iyileştirir. Bu tasarım, batarya sadece enerji sağlayıcı değil, aynı zamanda tüm aracın kuvvet aktarımına ve mukavemetine katkı sağlayan yapısal bileşen olduğundan çarpışmalarda yan kasa direğinin içeri girmesini %45 oranında azaltabilir.

3.4. Hücreden Şasiye Tasarım (Cell-to-chassis, HŞ)

Hücreden Şasiye (HŞ) üçüncü nesil elektrikli araç batarya paketleri olup batarya hücrelerinin doğrudan araç şasisine entegre edilmesi yöntemidir (Şekil 9.a ve b). Bu yöntem; batarya sisteminin elektrikli araç güç sistemi ve şasi ile entegrasyonunu daha da derinleştirir, bileşen sayısını azaltır, yerden tasarruf sağlar, yapısal verimliliği artırır, araç ağırlığını önemli ölçüde azaltır ve batarya menzilini artırır. HŞ'nin gelecekteki hedefleri, araç içi eşleştirme verimliliğini %90, alan kullanımını %70'in üzerine çıkarmak ve bileşen sayısını yaklaşık 400'e düşürmektir.

Hücreden Şasiye Tasarım, HŞ teknolojisi, Hücreden Pakete, HP'nin basit bir uzantısı değildir. HP, batarya paketini hala kullanmaktadır. HŞ teknolojisinde, Orjinal ürün üreticileri (OEM) bağımsızlıklarını ilan etmişlerdir. Bu teknoloji ile batarya paketi ve şasi tasarımlarında birlikte hareket edilerek elektrikli araç tasarımları yapılabilecektir.

HŞ, hücrelerin, gerekli ek bileşenlerle birlikte doğrudan araç gövdesine entegre edildiği destekleyici tasarımıdır. Hücrelerin doğrudan çerçeveye uygulanmasıyla büyük paket muhafazasına gerek kalmaz ve dolayısıyla büyük miktarda ölü ağırlık ortadan kaldırılabılır. Hücreleri sabitlemek için paket muhafaza yerine genellikle bir tür dolgu veya yapıştırıcı kullanılır. HŞ tasarım trendi, daha düşük maliyetle performansın daha da artırılması için araç şasisi ve hücre tasarımının birlikte geliştirildiği daha büyük bir elektrikli araç tasarım modeline geçişin bir parçası olarak görülebilir (Pampel vd., 2022).



Şekil 9. (a) Leapmotor firmasının kendi geliştirdiği HŞ batarya/şasi entegrasyonu, (b) HŞ batarya şasisi üstten görünüşü (Int. Kyn. 9).

HŞ, bileşen sayısının daha da azalmasına, daha yüksek enerji yoğunluğuna ve kW-sa başına daha düşük maliyete olanak tanımaktadır. Ancak bu hücrelerin değiştirilmesi, sökülmesi ve geri dönüştürülmesi konusunda hem teknik hem de ekonomik açıdan olası zorluklara ilişkin farklı görüşler bulunmaktadır. Şekil 10, HŞ düzenlemesinin bir örneğini göstermektedir (IEA, 2022).

Elektrikli araçlarda güç dağıtımını optimize etmek, enerji tüketimini azaltmak, üretim verimliliğini artırmak ve üretimi azaltmak için batarya sistemi ve şasinin entegrasyonuna ek olarak, elektrikli araç sürücülere, kontrol ünitelerine, ve güç elektroniği denetleyicilerine tümü araç şasisine yüksek düzeyde entegre edilebilecektir. Bu nedenle, CTC teknolojisi hala geliştirme aşamasında olup gelecekte HŞ teknolojisi “skateboard” şasisiyle birleşmesi öngörülmektedir. (Schlick vd. 2021).



Şekil 10. Hücreden şasiye tasarımı Tesla Model X “skateboard” şasi mimarisi.

3.5. Modülden Şasiye Tasarım (Module-to-chassis, MŞ)

Bu kavram hem modüllerin hem de paket muhafazasının kaldırılmasıyla ortaya çıkan zorlukların çok önemli olduğu düşünülerek HŞ tasarımına karşı geliştirilmiştir. MŞ tasarımı modüllerden oluşan ancak paket muhafazası olmayan bir yapısal batarya paketidir (Schlick vd. 2021). Ancak, Tesla'nın HŞ tabanlı yapısal batarya paketinin başarısı, son yıllarda MŞ trendini gölgede bırakmıştır. Ancak, 2021'den itibaren, örneğin General Motors (GM) firması “Ultium hücre platformu” aracılığıyla MŞ teknolojisini pazara sunmak için geliştirme çalışmalarına başlamıştır (General Motors, 2023). Hem GM hem de Leapmotors, MŞ tasarımlarında prizmatik veya kese tipi hücreleri kullanmaktadır.

Batarya paket tasarımlarında temel farklar Tablo 5’de özetlenmiştir (Klayman ve Lienert, 2021). Batarya paketleri ve elektrikli araçlarda entegrasyonunda ortaya çıkarılan kavramsal tasarımlardaki yenilikler tüm dünyada hızla devam etmektedir. Güney Koreli pil üreticileri, Çinli rakipleriyle rekabet edebilmek için yeni hücre tasarımlarına hız vermektedir. SK On, hücreden pakete (HP) teknolojisini kullanan “S-Pack” adını verdiği ürününü piyasaya sürerken, Samsung SDI da 2015 yılında tanıttığı modülsüz pil paketinden sonra, hücreden pakete (HP) teknolojisinin gelişimini 2025 yılına kadar tamamlamayı ve hücreleri araç gövdesiyle bütünleştiren daha yenilikçi bir ürüne geçmeyi planlamaktadır (Int. Kyn. 10 ve 11).

Batarya paketinde yüksek enerji yoğunluğu, kW-sa başına maliyetin düşük olması ve güvenilirlik temel hedefler olduğundan bir hücrede kullanılan anot ve katot aktif malzemelerin özellikleri oldukça önemlidir. Ticari hücrelerde genelde anot aktif malzeme olarak grafit kullanıldığı için batarya paketlerinde kullanılan hücreler şekilleri yanı sıra katot aktif malzemelerinin kimyalarına göre sınıflandırılmaktadır.

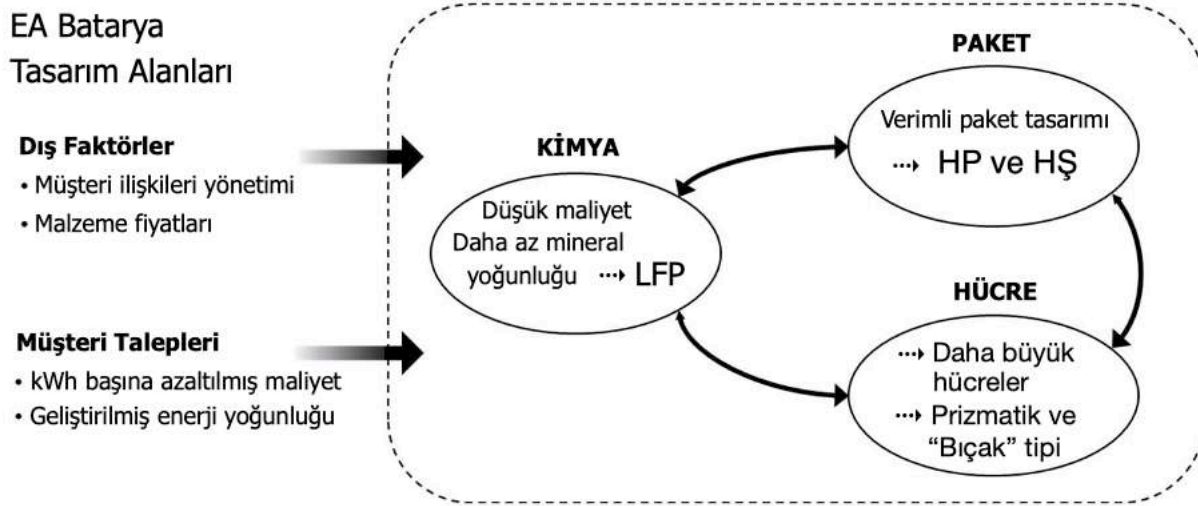
Tablo 5. Elektrikli araç batarya paketi tasarım trendlerinin tasarım özellikleri (Klayman ve Lienert, 2021).

Batarya Paketi Tasarımları	Batarya Hücresi	Batarya Modülü	Özel Batarya Paket Muhafazası	Yapısal Şasi Entegrasyonu
MP, Modülden pakete	√	√	√	--
HP Hücreden Pakete	√	--	√	--
HG Hücreden Gövdeye	√	--	x	x
HŞ Hücreden Şasiye	√	--	--	√
MŞ Modülden Şasiya	√	√	--	√

Not: √ : var, -- : yok, x: kısmen

LFP olarak bilinen kimya birim ağırlıkta daha düşük mineral maliyetleri, doğada daha çok bulunurluğu, güvenilirliği nedeniyle tercih edilmekle birlikte düşük enerji yoğunlukları nedeniyle de başka kimyalara (NMC, NCA vb) ilgi artmaktadır. Katot aktif malzemelere ait detaylı bilgi üçüncü bölümünde verilmektedir.

Batarya paket ve araç entegrasyon kavramlarından HP ve HŞ teknolojileri ile elektrikli araçlardaki yüksek enerji yoğunluğu ve kW-sa başına maliyetin düşük sağlanabilir (McKinsey&Co., 2021). Paket tasarımlarına ek olarak hücrelerde kullanılan katot aktif malzemelerin seçimi de oldukça önemlidir. Örneğin, LFP katot kullanan hücrelerde bir başka deyişle LFP kimyası içeren hücreler diğerlerine göre daha basit paket tasarımlarına ve daha küçük bir termal yönetim sistemine ihtiyaç duyar. Tasarımlarda LFP'nin benimsenmesi yalnızca paket tasarımı açısından fayda sağlamakla kalmaz, aynı zamanda daha büyük hücrelere izin verdiği için hücre tasarımında da esneklik sağlar. Güvenliğin görece daha iyi olduğu kimyalarda modül ara muhafazaların çıkarılması paket tasarımlarında daha fazla alan anlamına gelebilir. Daha büyük hücreler, daha iyi bir hacim-yüzey oranına sahiptir, bu da paket seviyesinde hem daha düşük maliyetler hem de daha yüksek enerji yoğunluğu demektir (Ciez ve Whitacre, 2017). Şekil 11, hücre kimyası, paket tasarımları ve hücre şekilleri arasındaki etkileşimlere genel bir bakış sunmaktadır (Johannisson, 2023). Son yıllarda verimli paket tasarımıyla birlikte düşük maliyetli kimyaların Tesla, Volkswagen, Rivian ve Çinli olmayan diğer elektrikli araç üreticileri tarafından da benimsendiği görülmektedir.

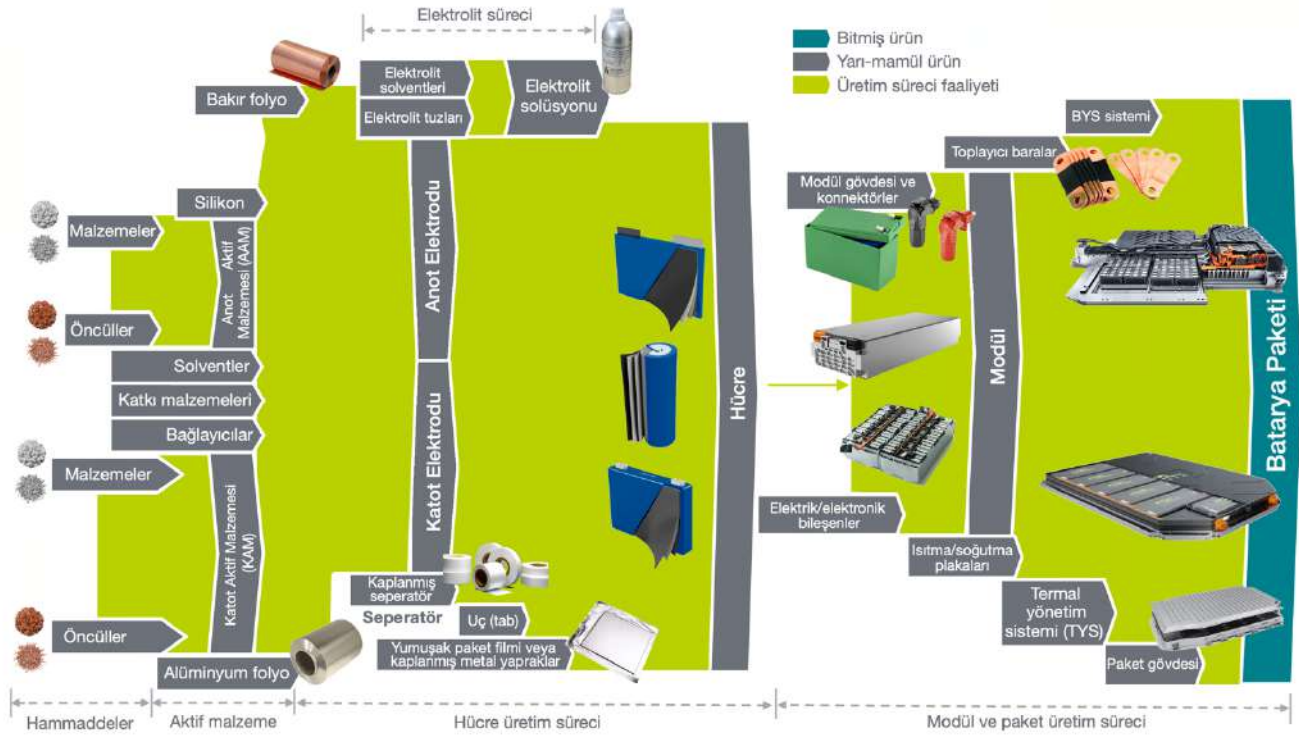


Şekil 11. Tasarım alanları arasındaki etkileşimler (Johannisson, 2023).

4. HÜCRE BİLEŞENLERİ ve YERLİLEŞTİRME POTANSİYELLERİ

Lityum iyon bataryaların alt bileşenlerinin yerleştirilmesi ülkemizin dışa bağımlılığının azaltılması ve yeni iş alanları açılması için son derece önemlidir. Lityum iyon bataryaların önce ana bileşenlerinin yani batarya paketlerinin ve hücrelerin daha sonra da bu ana bileşenleri oluşturan diğer bileşenlerin yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu konuda ülkemiz büyük bir yol katederek hem yerli batarya paketleri hem de yerli hücreler üretebilmektedir. Diğer alt bileşenlerin yerleştirilmesi için de birçok çalışma bulunmaktadır. Tüm batarya alt bileşenleri hücre -modül- batarya paketi sırasıyla Şekil 12'de gösterilmektedir.

Ülkemiz, birçok batarya alt bileşeninin ticari üretimi açısından maden, altyapı ve ekipmana sahiptir. Bu hammaddelerden başlıcaları alüminyum folyo, bakır folyo, alüminyum/nikel iletken şeritler ve pil kutuları gibi metalik pil bileşenleridir. Bu metalik bileşenlerin dışında, ülkemizde lityum, nikel, kobalt, mangan madenlerinden katot aktif malzemesi öncülleri, grafit madenlerinden de anot aktif malzemesi üretme çalışmaları bulunmaktadır. Tüm bu hammaddelerin yerleştirme çalışmaları başlıklar halinde bu dokümanda incelenmiştir.

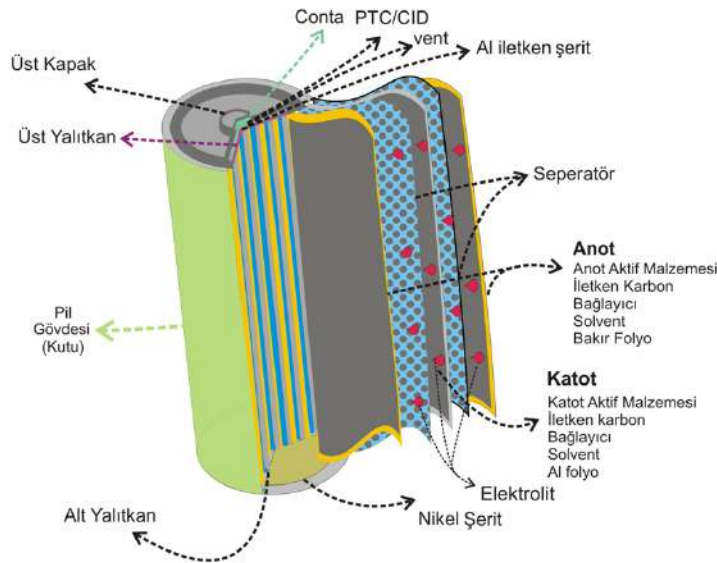


Şekil 12. Batarya alt bileşenleri (APC raporu, 2023).

4.1. Lityum İyon Hücre Bileşenleri

Lityum iyon hücrelerdeki bileşenler hücre tipine göre değişse de 20'den fazla bileşen bulunduğunu, katot aktif malzemesi hammaddeleriyle birlikte bu sayının daha da arttığını söylemek mümkündür. Bu bileşenler Şekil 13'de gösterilmiştir.

Katot aktif malzemelerinin hücre hammadde maliyetleri içerisinde en büyük orana sahip olduğu, katot aktif malzemelerinin ardından anot aktif malzemesi, elektrolit ve seperatörün maliyet oranlarının ise birbirine yakın olduğu bilinmektedir.



Şekil 13. Li iyon hücre alt bileşenleri.



4.1.1. Elektrotlar

Li iyon hücrelerde, enerji depolanmasını sağlayan en önemli bileşenler anot ve katot elektrotlarıdır. Bu elektrotların üretiminde temel olarak **aktif malzeme, bağlayıcı, çözücü, iletken karbon ve akım toplayıcı** kullanılmaktadır. Elektrot üretiminde ilk olarak aktif malzeme, bağlayıcı, çözücü, iletken karbondan oluşan bir çamur oluşturulmaktadır. Oluşturulan çamur akım toplayıcı üzerine kaplanmakta ve daha sonra çözücü uçurulmaktadır. Ardından haddeleme işlemi gerçekleştirilerek elektrotlar üretilmektedir.

Hem anotta hem de katotta kullanılan malzemelerin kullanım amaçları birbirlerine benzese de malzemeler farklılık göstermektedir. Anot ve katot için farklı aktif malzemeler kullanılmasının dışında genel olarak anotta akım toplayıcı olarak bakır folyo, katotta ise alüminyum folyo kullanılmaktadır. Anotta suda çözünebilir bağlayıcılar, katotta ise solventte (NMP) çözünebilir bağlayıcılar tercih edilmektedir.

Katot Aktif Malzemeler; elektrikli araçlarda kullanılan Li iyon pillerde yaygın olarak katmanlı (NMC, NCA, LCO vb.), olivin (LFP) ve spinel (LMO) olmak üzere değişik yapılarda katot aktif malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin üretiminde genel olarak pek çok yöntem kullanılsa da ticari olarak en çok katı hal sentezi ve birlikte çöktürme yöntemlerinin kullanıldığı bilinmektedir. Bu üretim yöntemleriyle katot malzemesinin öncüsünün sentezi için, geçiş metallerinin tuzları (sülfat, nitrat, asetat vb.) kullanılmaktadır. Katı hal sentezinde tüm öncüller ve lityum hidroksit veya karbonatlar karıştırılarak ısıtılarak işleme tabi tutulur. Isıtma işlemleri, katmanlı yapıdaki malzemelerin üretiminde oksijen atmosferinde yapılırken olivin yapısındaki malzemelerde oksijensiz atmosferde yapılmaktadır. Bahsi geçen üretim süreçlerinin içerisinde yıkama, öğütme vb. birçok ara işlem de bulunmaktadır. Tüm bu işlemlerin yer aldığı büyük çaplı bir üretim tesisi kurmak için gereken maliyetlerin çok yüksek olmasının dışında bir de bu işlemlerin optimizasyonu için uzun süren maliyetli çalışmalar gerekmektedir. Bu konuda uzak doğu ülkeleri yıllarca Ar-Ge ve sanayi destekleri ile pek çok ticari ürün üretmeyi başarmışlardır. Bu bölgelerdeki teknoloji ve yüksek miktarlarda katot aktif malzemelerin üretimi, küresel ürün ve teknoloji rekabetini zorlaştırmaktadır. Buna karşın, dünyadaki gelişmeler ülke sanayisinde de son yıllarda karşılık bulmuş ve katot aktif malzemesi üretimi üzerine çalışan sanayi oluşumu başlatmıştır.

Anot Aktif Malzemeler; grafit, dünyada teknolojinin gelişmesiyle birlikte, fazlaca kullanılan ve günümüz teknolojisi için vazgeçilemez bir endüstri hammaddesidir. Doğada; kristal, pul ve amorf diye tanımlanan şekilleri mevcut olup, en iyi formu kristal grafitir ve tenörü en yüksek olanıdır.

Lityum iyon hücrelerde anot olarak kullanılan grafitler ikiye ayrılmaktadır;

- Yüksek saflıkta küresel doğal grafit
- Sentetik grafit

Yüksek saflıkta küresel doğal grafitler; sentetik grafitlere göre daha yüksek kapasiteye ve düşük maliyete sahiptirler fakat çevrim ömürleri, kapasite korunumları ve yüksek akımlara karşı kararlılıkları daha kötüdür. Bu nedenle yüksek saflıkta küresel doğal grafitler ve sentetik grafitler, lityum iyon pil hücrelerinin kullanım alanlarına uygun olarak optimizasyon amacı ile birbirleriyle karıştırılarak da kullanılmaktadır. Tüketici elektroniklerinde yüksek oranlarda doğal grafit kullanılırken, elektrikli araç uygulamalarında yüksek oranlarda sentetik grafit kullanılmaktadır.

Li iyon hücrelerde en çok kullanılan anot aktif malzemesi olan grafit dışında yüksek kapasitesi nedeniyle silisyum esaslı malzemeler ve yüksek çevrim ömrü sebebiyle Lityum Titanat (LTO) anot malzemesi de kullanılmaktadır.

Bakır Folyo; anot elektrotları hazırlanırken, grafit, iletken karbon, çözücü ve bağlayıcı içeren çamur, bakır folyo üzerine kaplanmaktadır. Bakır, Li iyon pillerin üretiminde yaygın olarak kullanılan iletken bir malzemedir ve anot elektrotu için ideal bir akım toplayıcıdır. Yüksek iletkenliği, Li iyonlarının hızlı hareketini sağlar ve elektrotlar arasında güçlü bir bağlantı kurulmasını kolaylaştırır. Ayrıca bakırın anot çalışma voltajındaki elektrokimyasal kararlılığı pilin uzun ömürlü olmasına katkıda bulunmaktadır. Bu durum, pilin çok sayıda şarj-deşarj döngüsüne dayanabilmesini ve performansının zaman içinde korunmasını sağlar. Li iyon pillerdeki bakır folyolar haddeleme ve elektrokimyasal biriktirme olarak iki çeşit yöntem ile üretilmektedir. İki yöntem ile üretilen folyoların; mukavemet, yüzey kalitesi, üretim ve yatırım maliyetleri açısından avantaj ve dezavantajları vardır. Dünyada ticari bataryalarda kullanılan 12 µm altı kalınlıktaki bakır folyo üretimi için kullanılan üretim yöntemleri haddeleme ve elektrokimyasal biriktirmedir (Zhang vd., 2022). Bu üretim teknikleri ile yüksek elektriksel iletkenliğe sahip, mekanik olarak pil üretiminde kullanıma uygun çok ince folyolar elde edilebilmektedir. EN Standartlarına göre 150 µm ve altında kalınlıklardaki yassı bakır mamul, folyo olarak tanımlanmaktadır. Ticari Li iyon pillerde kullanılan bakır folyonun kalınlığı uygulama amacına göre 8-15 µm aralığında tercih edilmektedir. Şekil 14'de Li iyon pillerde kullanılan bakır ürünleri verilmiştir.



Şekil 14. Bataryalarda kullanılan bakır ürünler ve öncülleri

Ülkemizde Li iyon pillerde kullanılabilir kalitede bakır folyo üretme çalışmalarını sürdüren iki firma bulunmaktadır. Bu firmalar Sarkuysan Elektrolitik Bakır A.Ş. ve Metal-Kim A.Ş.'dir.

Alüminyum folyo, katot elektrot kaplamaları için mükemmel bir akım toplayıcı görevi görmektedir. Uygun fiyatı, yüksek elektrik iletkenliği ve katot malzemesinin çalışma voltajındaki elektrokimyasal kararlılığı sebebi ile katot akım toplayıcısı olarak kullanılmaktadır. Bu özellikler bataryadaki elektron ve iyon taşınmasını etkili bir şekilde sağlayarak bataryanın genel performansına katkıda bulunur. Alüminyum folyonun hafif ve korozyona dayanıklı olması, onu pil üretimi için uygun bir seçenek haline getirir. Dayanıklılığı, pilin şarj-deşarj döngüleri sırasında katot elektrotunun stabil kalmasını sağlar, böylece pilin ömrünü uzatır. Katot elektrotunda kullanılan alüminyum folyonun kalınlığı uygulama amacına bağlı olarak 10-20 μm aralığında tercih edilmektedir. Hücrelerde kullanılan alüminyum bileşenlerin madenden itibaren dönüşüm süreci Şekil 15'de gösterilmektedir. Asaş Alüminyum, Assan Alüminyum ve ETİ Alüminyum üreticisi firmalar, özellikle yerli akım toplayıcı alüminyum folyo üretme konusunda yoğun olarak çalışmaktadır. Ülkemizde bu folyoları üretme kabiliyeti diğer folyo üreticisi firmalarda da oldukça yüksektir. Ek olarak, ETİ Alüminyum separatörlerin alümina ile kaplanması üzerine de çalışmalar yürütmektedir.



Şekil 15. Hücrelerde kullanılan alüminyum mamülleri ve öncülleri

Katot folyosu olarak kullanılacak alüminyum folyolardan beklentiler malzemenin uzun kullanım süresi boyunca mukavemetini koruyabilmesi ve üretim aşamasında yüzeyinde ve sarımında herhangi bir düzgünlük olmaması, yağ, kir ve delik gibi kusurların bulunmamasıdır. Ülkemizin alüminyum sektöründe yetkin ve başarılı firmalara sahip olması sayesinde bu zorlukların kolaylıkla aşılabileceği düşünülmektedir.

Bağlayıcılar Li iyon hücrelerde elektrot çamurunun kaplama esnasındaki viskozitesini optimize etmek ve çamurun akım toplayıcıya tutunmasını arttırmak, kaplama sonrasında elektrot bileşenlerini bir arada tutmak amacıyla çeşitli organik bağlayıcılar kullanılmaktadır. Anot tarafında bağlayıcı olarak CMC, SBR, PAA gibi suda çözünebilir bağlayıcılar kullanılırken katot tarafında ise NMP içerisinde çözünebilir PVDF bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Bu bağlayıcılar ile ilgili detaylı incelemeler Bağlayıcılar bölümü'nde verilmiştir.

Çözücüler; PVDF'yi çözebilir bir çözücü olmasının yanında; daha az reaktif, yüksek derecede geri dönüştürülebilir ve diğer alternatif çözücülere göre daha yüksek bir parlama noktasına sahip olması NMP'yi Li iyon pil üretiminde kritik bir malzeme yapmaktadır. Öte yandan, NMP toksik bir malzeme olduğu için insan sağlığına ve doğaya zararlıdır. Bu nedende hem pahalı hem toksik bir malzeme olan NMP'nin yerine alternatif çözücüler kullanılması için çalışmalar devam etmektedir fakat henüz NMP'nin yerini alabilecek bir alternatif bulunmamıştır. Neyse ki, satın alma ve bertaraf maliyetleri yüksek olan NMP, doğru teknoloji kullanılarak %99'un üzerinde bir saflıkla geri dönüştürülebilme ve tekrar kullanılabilir. Türkiye'de NMP üreten bir firma ise bulunmamaktadır.

İletken karbonlardan CB (Karbon siyahı); elektronik iletkenliği az olan aktif malzemelerin elektronik iletkenliğini arttırmak için çamur hazırlık aşamasında nano boyuttaki karbon siyahı katkısı kullanılmaktadır (Dominko vd., 2003). Bu katkılar, aktif malzeme parçacıklarının arasındaki boşluklarda homojen bir şekilde dağılarak partiküller arasında ve partiküller-akım toplayıcı arasındaki elektrik iletimini sağlamaktadır. Ayrıca, yüksek yüzey alanı sağlayarak elektrokimyasal reaksiyonlara daha fazla aktif maddeye erişim imkanı sunar. Bu sayede pilin performansı ve enerji depolama kapasitesini artırmaktadır. Türkiye'de bilinen üreticisi bulunmamaktadır.

Karbon nanotüp (CNT) ve grafenlerde iletken karbon olarak kullanılabilir. *Karbon nanotüpler*, Li iyon pilin performansını ve enerji depolama kapasitesini artırmak amacıyla kullanılabilir. Elektronların daha etkin bir şekilde iletilmesini sağlar ve pilin enerji transfer verimliliğini artırır. Aynı zamanda, karbon nanotüplerin çamur içerisine eklenmesi, aktif malzemenin homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Bu da pilin performansını artırırken, daha fazla aktif maddeye erişimi sağlar. Ayrıca, karbon nanotüplerin yüksek yüzey alanına sahip olması, elektrokimyasal reaksiyonlar için daha fazla aktif madde yüzeyi sunar ve pilin enerji depolama kapasitesini artırır. Bunun yanı sıra, karbon nanotüpler elektrot malzemelerinin stabilitesini artırarak pilin uzun süreli kullanımına ve çevrim ömrüne katkıda bulunur. Karbon nanotüpler, Li iyon pillerde elektrokimyasal performansın iyileştirilmesi, enerji depolama verimliliğinin artırılması ve pilin daha güvenilir ve dayanıklı olması için önemli bir malzeme olarak değerlendirilmektedir.

Grafen, grafitin bir veya birkaç katmandan oluşan nano boyutlu malzemelerdir. Yüksek elektrik iletkenliği ve yüksek yüzey alanı sebebiyle tercih edilebilmektedir. Yüzey alanının çok geniş olması, elektrot çamura katılmasındaki güçlükler hafiflik, nano tozun havaya yayılma ve çamurda homojen karışma zorlukları ve özellikle maliyetleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmamaktadır. Türkiye'de CNT ve grafen üzerine çalışmalar yapan; Nanografi, AeroFen, NanographenX ve Yüksel Tohum gibi firmalar bulunmaktadır.

2011 yılında kurulmuş olan Nanografi, nano malzeme geliştirme, üretme ve tedariğini sağlamaktadır. Firma son yıllarda Grafen üretim teknolojilerine ağırlık vermiştir. Ankara'da bulunan üretim tesislerinde yılda 100 ton kapasite ile grafen üretimi yapmaktadır. Aynı zamanda CNT üretim kabiliyetlerinin de bulunduğu belirtilmektedir.

NanographenX İngiltere'de 2020 yılında kurulmuş sahipleri Türk olan bir şirkettir. Havacılık, savunma, kimya ve otomotiv gibi sektörlerinde nano boyuttaki yapıların kullanılmasını sağlamayı amaç edinmiştir. CNT, grafen, fulleren gibi karbon bazlı nano malzemelerin üretimini yapacakları aktarılmaktadır.

Yüksel Tohum, Türkiye'nin en büyük tohum markalarından biridir. Firma ikisi yurt dışında beşi Türkiye'de olmak üzere 7 araştırma ve üretim istasyonuna sahiptir. Yenilenebilir enerji alanında da yatırımlar yaptıklarını belirtmişlerdir. Özellikle CNT, aktif karbon ve grafen üzerine araştırmaları mevcuttur. Aylık 5 kg grafen üretim kapasitesine kadar çıkan şirket, pil alanında bu ürünün kullanımı için Ar-Ge çalışmaları yapmaktadır.

4.1.2. Elektrolit

Elektrolitler elektrotlar arasındaki iyon geçişini sağlayan malzemelerdir. Li iyon pillerde kullanılan elektrolitlerin çoğu organik çözücüde çözülmüş tuzlardan ve elektrolitin çeşitli özelliklerini geliştiren katkı malzemelerinden oluşmaktadır. Ülkemizde bilinen bir ticari elektrolit ve elektrolit katkı üreticisi yoktur.

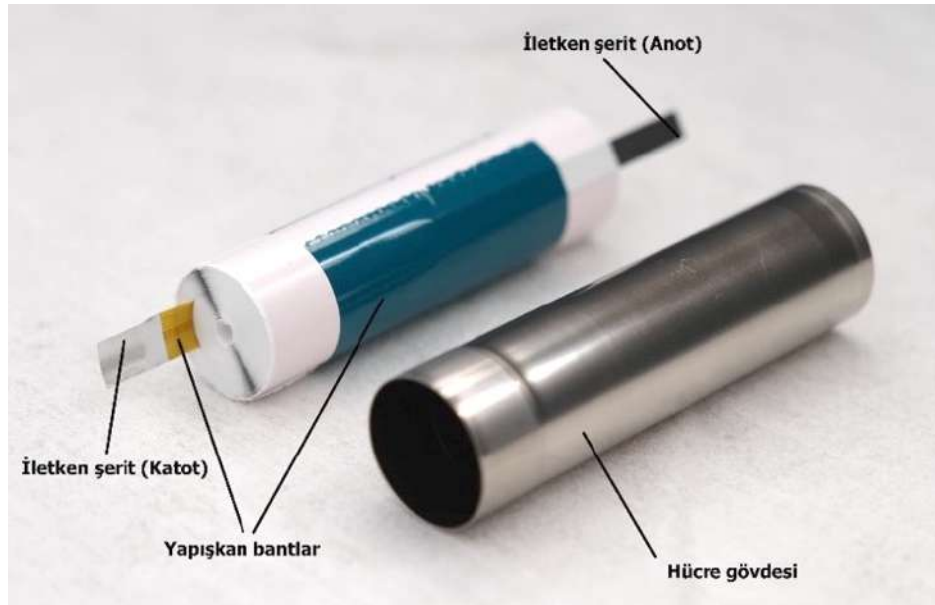
4.1.3. Seperatör

Seperatör, Li iyon pillerde anot ve katotun birbiri ile fiziksel temasını engellemek için kullanılan 6-15 µm kalınlıkta, elektriksel olarak yalıtkan, iyonik olarak iletken bir ayraçtır. Genellikle polietilen (PE) veya polipropilen (PP) kullanılmaktadır. Çeşitli kullanım amaçlarına göre PP/PE kombinasyonları olarak veya yüzeyinde seramik kaplanmış halde de kullanılabilir. Ülkemizde bilinen bir ticari seperatör üreticisi mevcut değildir.

4.2. Diğer Metalik Bileşenler

4.2.1. İletken Şeritler

İletken şeritler, akım toplayıcılar ile pil kutupları arasındaki bağlantıyı sağlar. İletken şeritler, akım toplayıcılara kaynaklanır ve daha sonra sarılmış veya destelenmiş elektrotlardan çıkarak elektrik akımını kutuplara iletir (Şekil 16). Tipik olarak katot için alüminyum iletken şeritler kullanılırken anot için nikel veya nikel kaplı bakır kullanılır, ancak farklı hücre kimyaları ve türleri için başka malzemeler de kullanılabilir. Bir Li iyon hücresinin güvenilir ve emniyetli performansı için iletken şerit ve kaynaklanma kalitesi çok önemlidir. İletken şerit tasarımı, bir hücrenin optimize edilmiş performansı için gereklidir. İletken şeritlerin genişliği, kalınlığı ve alaşımı pil performansı üzerine direkt olarak etkilidir. İletken şeritler belirlenen alaşımda ve kalınlıktaki metal levhaların istenen genişlikte kesilmesiyle üretilir. Ülkemizde iletken şerit üretimi için dilme makinesi yatırımı yapılmak istendiğinde bu teknolojiyi sağlayabilecek firmalar bulunmaktadır.



Şekil 16. ASPİLSAN A28 hücresinde kullanılan iletken şerit ve bantların görünümü. (Görsel ASPİLSAN Enerji'nin izniyle kullanılmıştır. Görşelin tüm hakları ASPİLSAN Enerji A.Ş.'ye aittir.)

4.2.2. Hücre Gövdesi

Genel olarak paslanmaz çelikten, nikel kaplı çelikten veya alüminyumdan üretilen pil gövdesi, Li iyon hücrenin dış kabuğu olarak görev yaparak yapısal bir bütünlük sağlamaktadır (Şekil 17). Hücre gövdesi, hücreyi fiziksel darbelerden, çevresel faktörlerden ve dış etkenlerden korur. Ayrıca mekanik destek sunarak hücrenin iç bileşenlerini korumaktadır ve hücrenin güvenli çalışmasını sağlamaktadır. Hücre tipine ve kimyasına göre pozitif veya negatif kutup olarak da görev yapmaktadır. Silindirik ve prizmatik hücre gövdeleri derin çekme ve metal işleme ile üretilmektedir. Prizmatik hücre gövdesinin üretimi esnasındaki görünüşleri Şekil 18’de gösterilmektedir.



Şekil 17. Silindirik ve prizmatik hücre gövdeleri (Int. Kyn. 12)



Şekil 18. Prizmatik hücre gövdesi üretim süreci (Int. Kyn. 13)

Kese tipi hücrelerde lamine edilmiş alüminyum folyo hücre gövdesi olarak kullanılırken prizmatik ve silindirik hücrelerin gövdeleri alüminyum veya çelik levhaların işlenmesiyle oluşturulmaktadır. Alüminyum lamine folyoların alt ve üst katmanları poliamid ve/veya polipropilen vb. polimerlerden oluşmaktadır.

Kese tipi hücre gövdesi üretimi üzerine Assan ve Asaş alüminyum gibi firmalarının çalışma yürüttüğü bilinmektedir. Ülkemizdeki diğer alüminyum folyo üretici firmaların da bu ürünleri üretebileceği teknolojik alt yapıları mevcuttur. Silindirik ve prizmatik hücre gövdelerinin üretimi üzerine çalışan bilinen firma bulunmamaktadır. Fakat ülkemizde metal işleme ve derin çekme konusunda çalışan birçok firma bulunmaktadır. Bu firmaların, gerekli çalışmaları yaparak Li iyon pil gövdesi üretimi yapabileceği düşünülmektedir.

4.3. Üst Kapaklar, Ventil ve Contalar

Prizmatik ve silindirik hücrelerde hücre gövdesinin içerisine sarılmış/destelenmiş elektrotlar yerleştirildikten sonra üst kapak kapatılarak hücrelerin sızdırmazlığı sağlanmaktadır. Üst kapaklar; hücre gövdesine silindirik hücrelerde mekanik olarak, prizmatik hücrelerde ise kaynak yapılarak kapatılır. Kullanılan bu kapaklar her hücreye özel olarak tasarlanmaktadır ve hücrenin özelliklerine göre farklı güvenlik cihazları bu kapaklarda kullanılmaktadır. Silindirik ve prizmatik tüm hücrelerde kullanılan ana güvenlik aracı, tasarlanmış bir gaz basıncı ile açılan ventillerdir. Kısa devre, aşırı ısınma vb. durumlarda aşırı gaz çıkışı ile ventil patlayarak gazın tahliyesini sağlar ve pilin patlaması engellenmiş olur. Ventile ek olarak akım kesici cihazı (CID, Current Interrupt Device), Pozitif Sıcaklık Katsayısı (PTC, Positive Temperature Coefficient), aşırı şarj güvenlik cihazı (OSD, Overcharge Safety Device) gibi çeşitli güvenlik araçları kullanılarak hücrelerin ısıl sürüklenmeye girmesinin ve yanmasının önüne geçilmeye çalışılmaktadır.



Şekil 19. Silindirik hücrelerde kullanılan üst kapak (Int. Kyn. 14)



Şekil 20. Prizmatik hücrelerde kullanılan üst kapak ve sızdırmazlık elemanları (Int. Kyn. 15)

Üst kapakların malzemeleri hücre özelliklerine bağlı olarak alüminyum veya çelik olabilmektedir. Silindirik hücrelerde genel olarak üst kapak pozitif kutup, hücre gövdesi negatif kutuptur. Bu nedenle aralarında polimer contalar bulunmaktadır (Şekil 19). Prizmatik hücrelerde ise hem pozitif kutup hem de negatif kutup üst kapakta bulunduğu için kutup başları ve üst kapağın birbirlerine temas edebileceği noktalarda özel contalar ve sızıntı olabilecek kısımlarda cam-metal sızdırmazlık teknolojisi (hermetik koruma) kullanılmaktadır (Şekil 20). Bunlara ek olarak silindirik hücrelerde sarılmış elektrotların alt ve üstünde kısa devreyi önlemek için polimerik contalar kullanılmaktadır. Prizmatik hücrelerde ise sarılmış/destelenmiş elektrotlar PET (polietilen tereftalat) kılıf içerisine yerleştirilerek hücre gövdesi ile temasın önüne geçilmektedir.

4.4. Yapışkan Bantlar

Pillerin içerisinde farklı amaçlara yönelik tek taraflı yapışkan bantlar kullanılmaktadır. Bantlarda yapıştırıcı olarak akrilik tercih edilmektedir. Bu bantlar iletken şeritlerin üzerinde kısa devreleri engellemek amacıyla ve sarılmış/destelenmiş sarılmış ruloyu (jelly-roll) sabitlemek için kullanılmaktadır. Pillerde kullanılan bant malzemeleri içerisinde en çok kullanılan bant malzemesi yüksek sıcaklığa dayanıklılığı ve yalıtkanlığı sebebiyle polimid (PI) banttır. PI bantların maliyetinin yüksek olması nedeniyle sarılmış ruloyu sabitlemek gibi yüksek sıcaklığa dayanıklılık gerektirmeyen PET veya PP bantlar kullanılmaktadır. Türkiye’de yapışkan bant üretimi yapan firmalar bulunmaktadır fakat PI bant üretimi yapılmamaktadır.



5. MODÜL, PAKET BİLEŞENLERİ ve YERLİLEŞTİRME POTANSİYELLERİ

Modüller hücrelerin/pillerin elektriksel ve mekanik olarak birleştirilmesi ile oluşmaktadır. VDA355, VDA590, MEB vb. standart boyutlarda olabildiği gibi batarya-modül üreticilerinin özel yapı ve boyutlarda tasarımları da mevcuttur.

Paketler ise özellikle elektrikli aracın geometrisi ile birlikte tasarlanan bir geometriye sahiptir. Bileşenler; elektronik, mekanik ana bileşenler ve diğer bileşenlerden oluşmaktadır. Şekil 21’de tüm batarya paketi bileşenleri verilmiştir.

5.1. Elektronik Ana Bileşenler

a. Batarya Yönetim Sistemi (BYS): Bataryaların güvenli çalışma alanında bulunmasını sağlayan, verileri takip eden, elektronik kontrolü sağlayan, bataryaya dair dengeleme-koruma-kestirim algoritmaları vb. fonksiyonları gerçekleştiren, gömülü yazılımları olan, farklı topolojileri olan ve batarya ile platform arasında haberleşmeyi sağlayan elektronik bileşenlere denir.

b. Kontaktör/Röle: BYS tarafından kontrol edilerek batarya paketi çıkışındaki enerjiyi devreye alan veya devreden çıkaran elektromekanik bileşene denir.

c. Sigorta: Yüksek akımlarda atarak devreyi kesmeyi sağlayan, güvenlik amaçlı kullanılan bileşendir.

d. Güç Konnektörü: Batarya paketi ile platform arasında bağlantıyı sağlayarak güç-gerilim çıkışı sağlayan bileşendir.

e. Haberleşme/Düşük Gerilim Konnektörü: Batarya paketindeki BYS ile platform arasında haberleşme ve düşük gerilim bağlantısını sağlayan bileşendir.

f. Termal Sürüklenme Sensörü (Thermal Runaway Sensor): Batarya içerisindeki basınç, sıcaklık ve gaz takibini yaparak herhangi bir tehlikeli durum tespit ettiğinde BYS’e sinyal veren elektronik bileşendir.

g. MSD (Manuel Service Disconnect): Batarya paketindeki gerilimi platformdan manuel olarak ayıran, servis ve güvenlik amaçlı kullanılan elektromekanik bileşendir.

5.2. Mekanik Ana Bileşenler

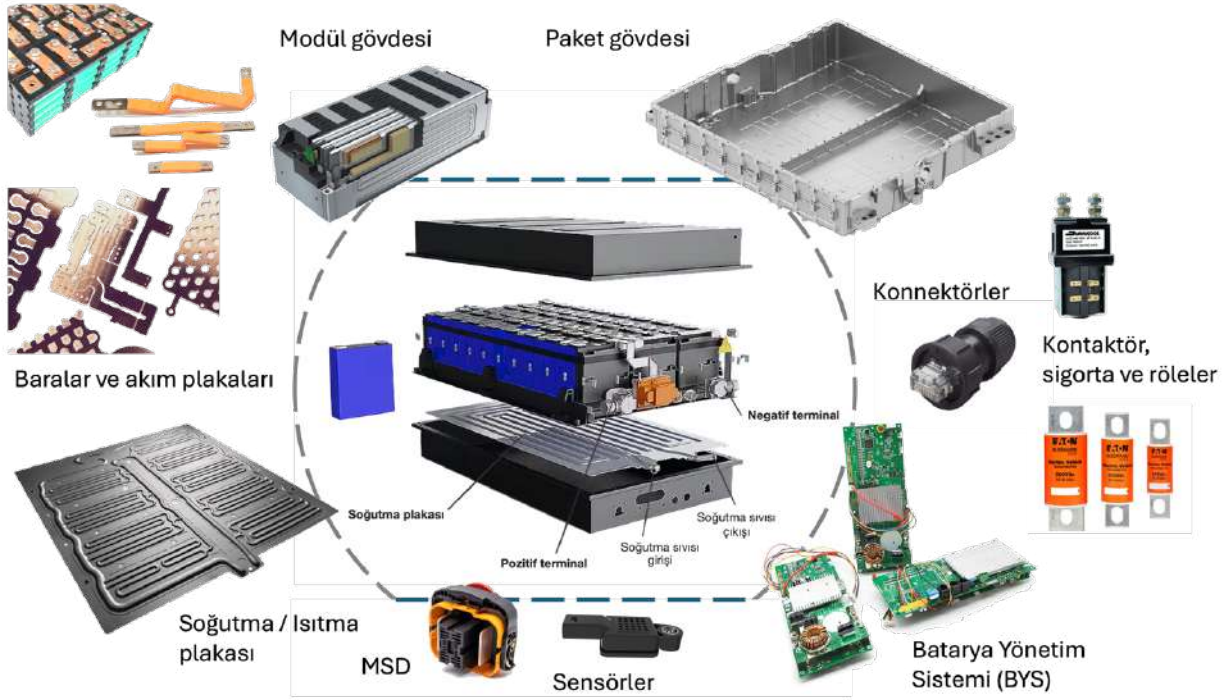
a. Modül Gövdesi: Hücrelerin elektriksel bağlantısı ile oluşturulan modülleri mekanik bir yapı içerisinde tutan bileşendir.

b. Paket Gövdesi: Modüllerin ve elektronik tüm bileşenlerin tamamını içererek taşıyan, batarya paketinin mekanik yapısal parçası olan, genellikle alüminyum malzemeden tercih edilen, ekstrüzyon profiller ve lazer kaynak vb. yöntemler ile üretilen bileşendir.

c. Soğutma/Isıtma Plakaları: Bataryanın termal yönetim sistemi kapsamında hücreleri soğutma-ısıtma görevi olan, hücrelerin geometrilerine göre düz veya dalgalı plakalar şeklinde üretilen, farklı imalat yöntemleri ile oluşturulabilen, içerisinde dolaşmak üzere ısıtma/soğutma sıvısını barındıran, genellikle alüminyum gibi hafif malzemelerin tercih edildiği, termal iletken yumuşak örtü/ pedler ile birlikte kullanılan yapılara denir. Batarya paketleri soğutma teknolojilerinde hava ile dolaylı soğutmanın en düşük soğutma performansı sağladığı, su ve glikol ile dolaylı soğutmanın nispeten yüksek, daldırma soğutma teknolojisinin ise en yüksek performansı sağladığı bilinmektedir.

d. Baralar: Hücreler/modüller arasındaki elektriksel iletimi sağlayan, genellikle bakır ve alaşımlarından oluşan, güvenlik amaçlı olarak izole edilen, taşıyacağı akıma göre kesiti belirlenen bileşenlere denir.

Hem elektronik hem de mekanik ana bileşenlerin Türkiye’de yerli imalatı ve tedariki mümkündür. Birçok elektrik-elektronik ekipman üreticisi bu ürünlerle ilgilenmiş ve numune tedariki sağlamışlardır. Soğutma/ısıtma plakaları da klima ve radyatör üreticilerinin ilgi alanı içindedir. Yatırım ve üretimlerin önündeki en büyük kriter ölçek ekonomisi olup ürün talep adetleri arttıkça üretimin yerleşmesi cazip hale gelecektir.



Şekil 21. Batarya paketi ve modül üretiminde kullanılan elektronik ve mekanik bileşenler (Çalışma grubu tarafından oluşturulmuştur)

5.3. Diğer Bileşenler

a. Elektriksel İzolasyon Malzemeleri: Elektriksel olarak temas etmesi istenilmeyen noktalar ve bölgeler arasında elektrik akımlarını önlemek amacı ile kullanılan malzemelerdir.

b. Yalıtım ve Yapıştırma Malzemeleri: Hücrelerin yapısal olarak birbirine yapıştırılmasında, modüller arasında ısıl ara yüz oluşturulmasında veya yalıtımında kullanılan malzemelere denir. Şekil 22’de batarya paketlerinde kullanılan yalıtım ve yapıştırma malzemeleri gösterilmiştir.

c. Termal İletken Yumuşak Örtü/Ped: Isıtma/Soğutma plakaları ile hücre-modüller arasında ısı transferini arttırmak üzere kullanılan, termal iletkenlikleri yüksek, yapışkan ve uygulaması kolay malzemelere termal iletken ped denir.

d. Yanma Geciktirici Malzemeler: Herhangi bir alev-termal sürüklenme durumunda hücreler-modüller arasındaki termal yayılımı önlemek ve alevi belli bir alanda muhafaza etmek amaçlı kullanılan, bariyer özelliği taşıyan ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelere denir.

e. Sızdırmazlık Contaları: Conta vb. malzemeler bataryaların sızdırmaz özellikte olmasını sağlamaktadır. Batarya gövde-kapak arasında mekanik olarak bağlantıyı kesintisiz olarak sağlayan, sızdırmazlık özelliğini destekleyen malzemelere sızdırmazlık contaları denir.

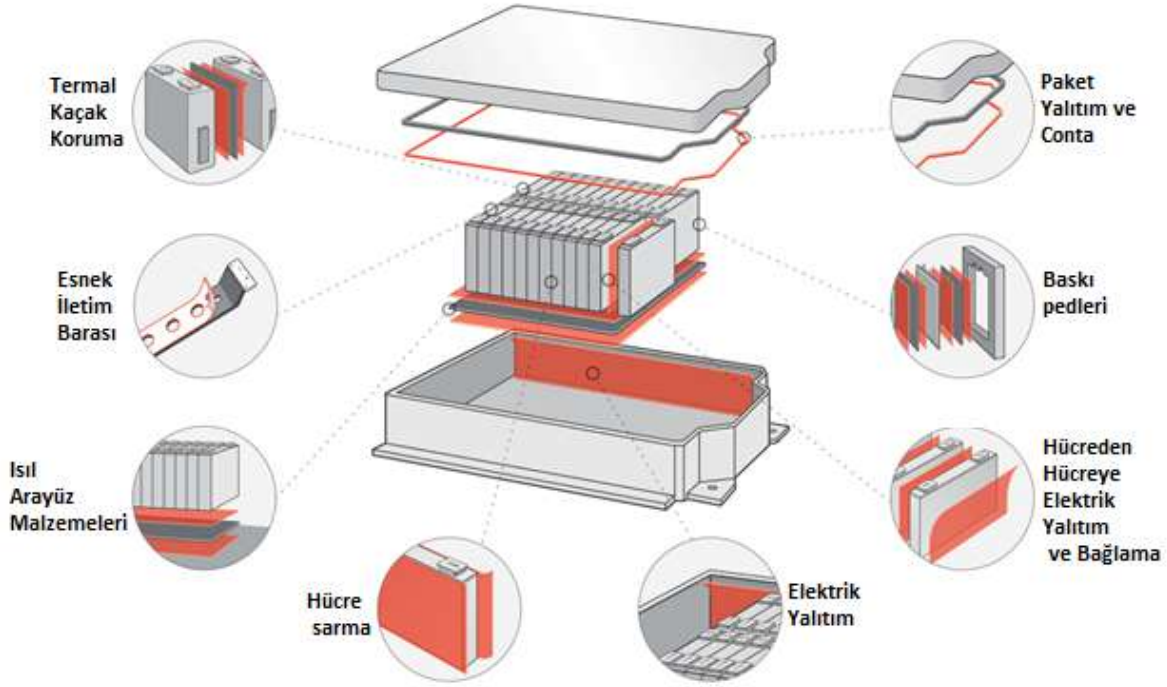
f. Elektromanyetik Contalar: Batarya gövdesi ve kapağı dahilinde tüm bataryada elektriksel bağlantıyı kesintisiz olarak sağlayarak bataryanın elektromanyetik girişimi engellemek (EMI, Electromagnetic Interference) veya elektromanyetik uyumluluk sağlamak (EMC, Elektromagnetic Compatability) bağlılığına katkı sağlayan contalara denir.

g. Sıkıştırma Malzemeleri: Hücre ve modüllerde ezilme, şişme ve darbelere karşı sıkıştırma pedleri kullanılarak güvenlik sağlanmaktadır. Bu amaçlı kullanılan malzemelere “sıkıştırma malzemeleri” denir.

h. Kablolar: Elektrik iletkenliği sağlayan tellerdir.

- **Haberleşme Kabloları:** Genellikle ekranlı (shielded) olarak tercih edilen, batarya içerisindeki elektronik bileşenler arasında haberleşmeyi sağlayan kablolardır.
- **Düşük Akım Kabloları:** Genellikle düşük kesitli, termal ve yapısal olarak dayanıklı kablolardır.

- **Yüksek Gerilim-Yüksek Akım Kablolar:** Genellikle yüksek kesitli, termal ve yapısal olarak dayanıklı, esnek, otomotiv uygulamalarında turuncu dış izolasyonlu kablolardır.



Şekil 22. Batarya paketi ve modül üretiminde kullanılan yalıtım ve yapıştırma malzemeleri (Avery Dennison ürün görsellerinden alınmıştır).

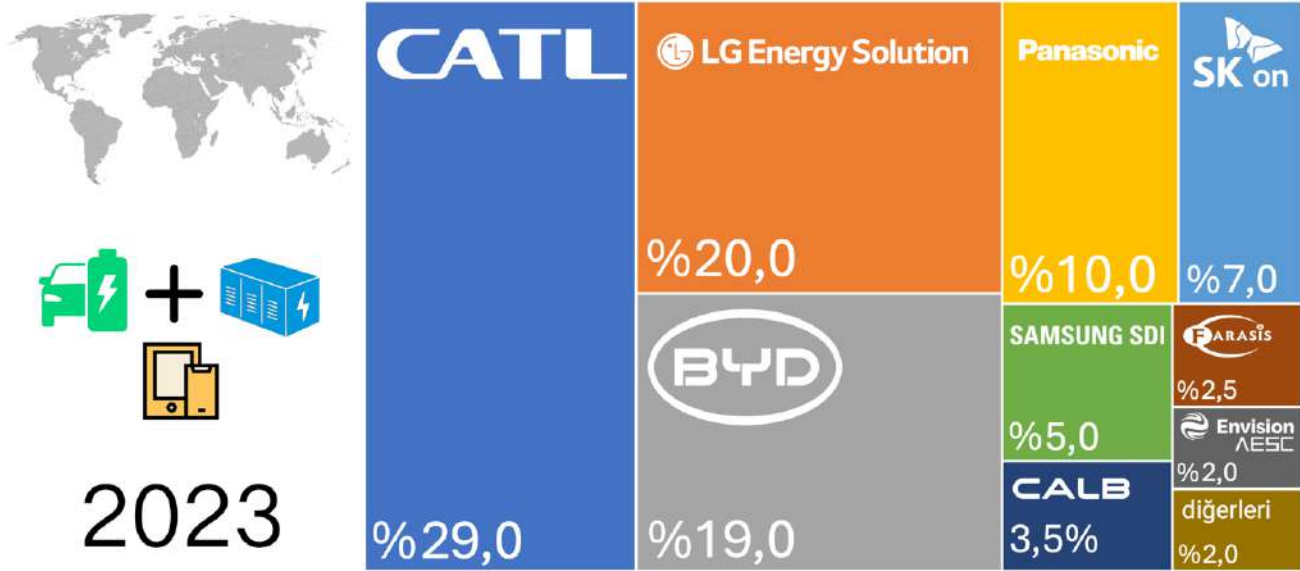
6. DÜNYA BATARYA PAZARI

2023 yılında global ölçekte Li iyon batarya hücre üretimi 1.164 GW-sa'e ulaşmıştır (Tablo 6). Bu üretimin çok büyük bir kısmı (893 GW-sa) Çin'de gerçekleşmiştir. 2023 yılındaki satış ve sevkiyat rakamları ise 1.203 GW-sa'e gelmiştir. Elektrikli araçlar 706 GW-sa'lik (Çin'de 387 GW-sa ve diğer ülkelerde 318 GW-sa) payı alırken ticari araçlar (otobüs, kamyon vd.) ve diğer taşıtlar 160 GW-sa, sabit enerji depolama amaçlı 224 GW-sa, ve diğer uygulamalar için 113 GW-sa'lik satış gerçekleşmiştir (Not: Bu bölümdeki istatistik bilgileri, China Automotive Battery Research Institute (CABRI) ve SNE Research firmalarının aylık haberlerinden toplanmış ve çalışma grubu tarafından analiz ve şematize edilerek kullanılmıştır).

Tablo 6. Global Li iyon batarya hücresi üretim ve sevkiyat rakamları

Üretim adetleri (GW · sa, 2023)	
1.164	<p>Ülkelere göre dağılım; Çin (893, %74,7), Polonya (73, %6,3), A.B.D. (70, %6), Macaristan (38), Almanya (31), İsveç (16), Güney Kore (15), Japonya (12), Fransa (6), Hindistan (3) ve diğerleri (7)</p>
Satış ve sevkiyat adetleri (GW · sa, 2023)	
1.203	<p>Sektörlere göre dağılım; Elektrikli araçlar (706, %58,7), ticari ve diğer taşıtlar (160, %13,3), sabit enerji depolama (224, %18,6), tüketici elektroniği ve diğerleri (113, %9,4)</p> <p>Firmalar göre dağılım; CATL (Çin, %29), LG Energy Solutions (Güney Kore, %20), BYD (Çin, %19), Panasonic (Japonya, %10), SK On (Güney Kore, %7), Samsung SDI (Güney Kore, %5), CALB (Çin, %3,5), Farasis (Çin, %2,5), Envision AESC (Japonya, %2) ve diğerleri (%2)</p>

Tablo 6’da görüldüğü gibi 1.203 GW-sa satışın %74’lük bölümü Çin menşeli firmalar tarafından gerçekleştirilmiştir. 2023 yılı içinde gerçekleşen toplam 1.203 GW-sa’lik hücre sevkiyatının firmalara göre dağılımı Şekil 23’de gösterilmiştir. Bu sevkiyatın 887 GW-sa’lik büyük bir kısmı Çin genelindeki müşterilere gerçekleştirilmiştir.



Şekil 23. Global Li iyon batarya hücreleri satış ve sevkiyatının üretici firmalara göre dağılımı (2023)

6.1. Elektrikli Araç Batarya Pazarı

Elektrikli araç batarya pazarı, Çin, Güney Kore ve Japon batarya üreticileri arasında paylaşılmaktadır. Üretim rakamları ile satış-sevkiyat rakamları arasında küçük farklılıklar firmaların stok durumlarına göre oluşmaktadır. Tablo 7’de “yedi büyükler” diye tanımladığımız üretici firmaların 2022 ve 2023 satış ve üretim değerleri yer almaktadır.

Tablo 7. EA pazarı için global satış ve üretim rakamlarının karşılaştırması

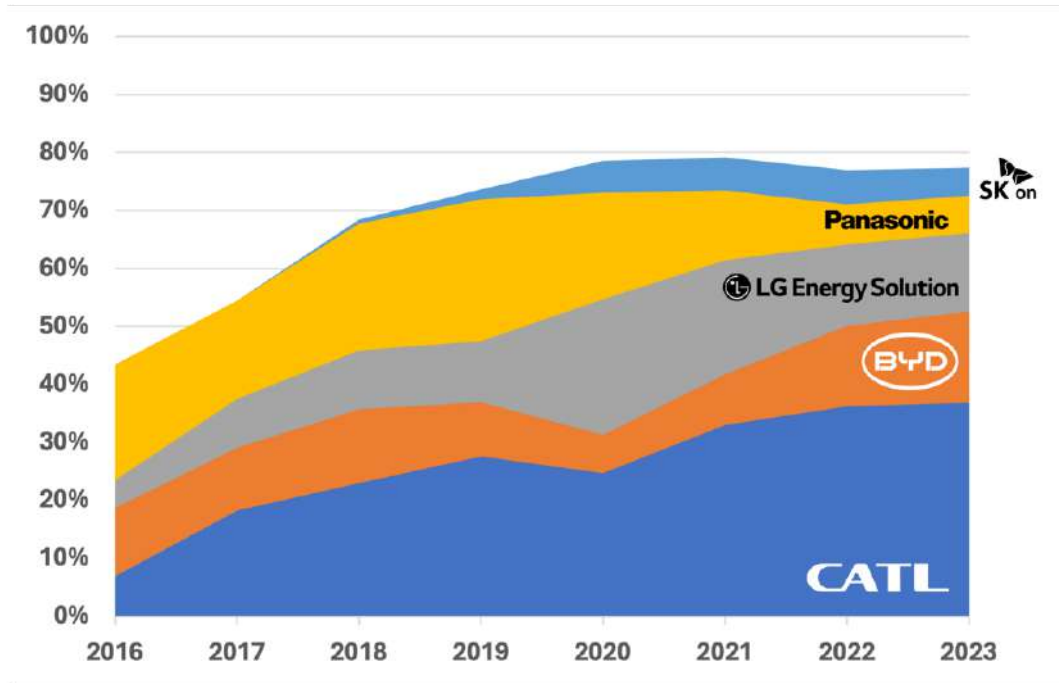
Li iyon hücre üreticisi	2022		2023		2022		2023	
	Satış [GW·sa]	Üretim [%]	Satış [GW·sa]	Üretim [%]	Satış [GW·sa]	Üretim [%]	Satış [GW·sa]	Üretim [%]
1. CATL (Çin)	184.400	36,2%	163.831	32,3%	259.700	36,8%	242.700	34,1%
2. BYD (Çin)	70.500	13,8%	72.841	14,4%	111.400	15,8%	115.917	16,3%
3. LG Energy Solution (G. Kore)	71.600	14,1%	86.575	17,1%	95.800	13,6%	108.487	15,2%
4. Panasonic (Japonya)	35.600	7,0%	45.452	9,0%	44.900	6,4%	56.560	7,9%
5. SK On (G. Kore)	30.100	5,9%	31.299	6,2%	34.400	4,9%	40.711	5,7%
6. CALB (Çin)	18.500	3,6%	25.262	5,0%	33.400	4,7%	23.493	3,3%
7. Samsung SDI (G. Kore)	23.900	4,7%	20.125	4,0%	32.600	4,6%	35.703	5,0%
diğerleri	74.600	8,8%	61.354	12,1%	93.300	7,0%	87.888	12,4%
Toplam	509.200		506.739		705.500		711.459	

Pazardaki en büyük oyuncular, CATL, BYD, LG Energy Solutions, Panasonic ve SK On şirketleridir. Bu beş şirketin üretimi de satışları da genel pazarın %77’den büyük bir paya sahiptir (Şekil 24).



Şekil 24. Global elektrik araç pazarı Li iyon batarya hücresi satış ve sevkiyatının üretici firmalara göre yüzde dağılımı (2023)

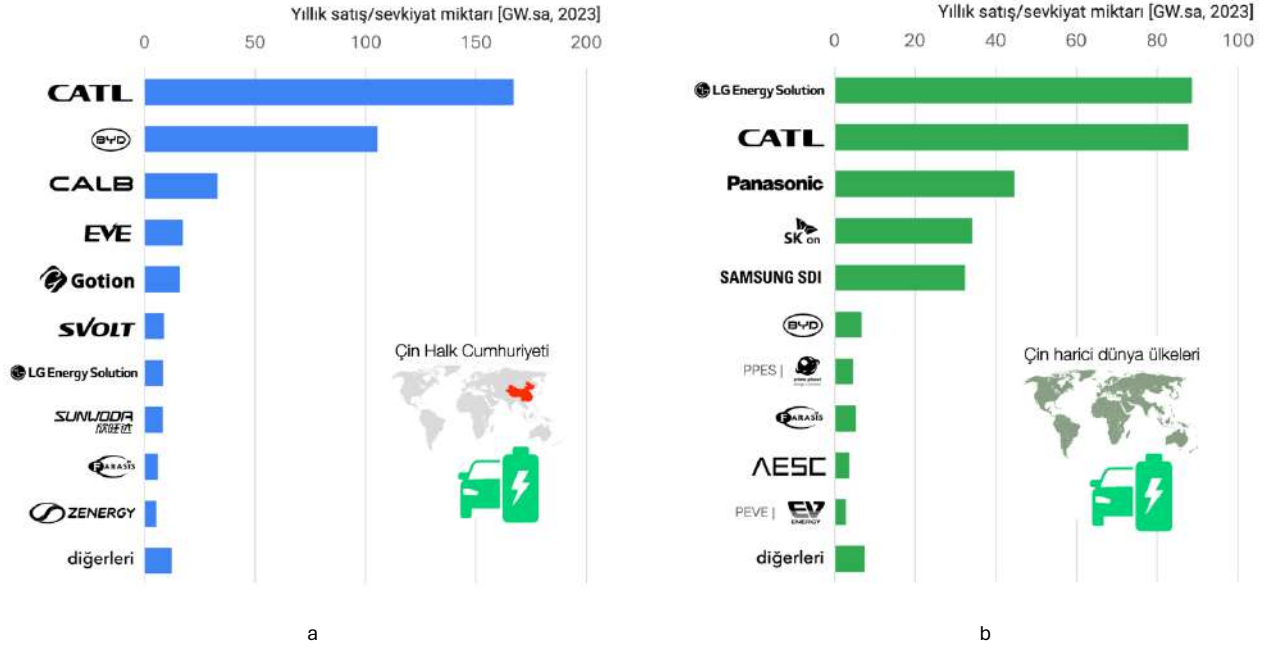
Bu beş şirketin pazar payları 6-7 yıl önce %50'nin altında yer alırken zamanla teknoloji ve Ar-Ge çalışmaları ve yaptıkları küresel yatırımları nedeniyle son birkaç yılda pazarı domine etmeye başlamışlardır (Şekil 25).



Şekil 25. 2023 yılında küresel elektrikli araç batarya üretiminde ilk beş firmanın 2016 – 2023 yılları arasındaki pazar dağılımları

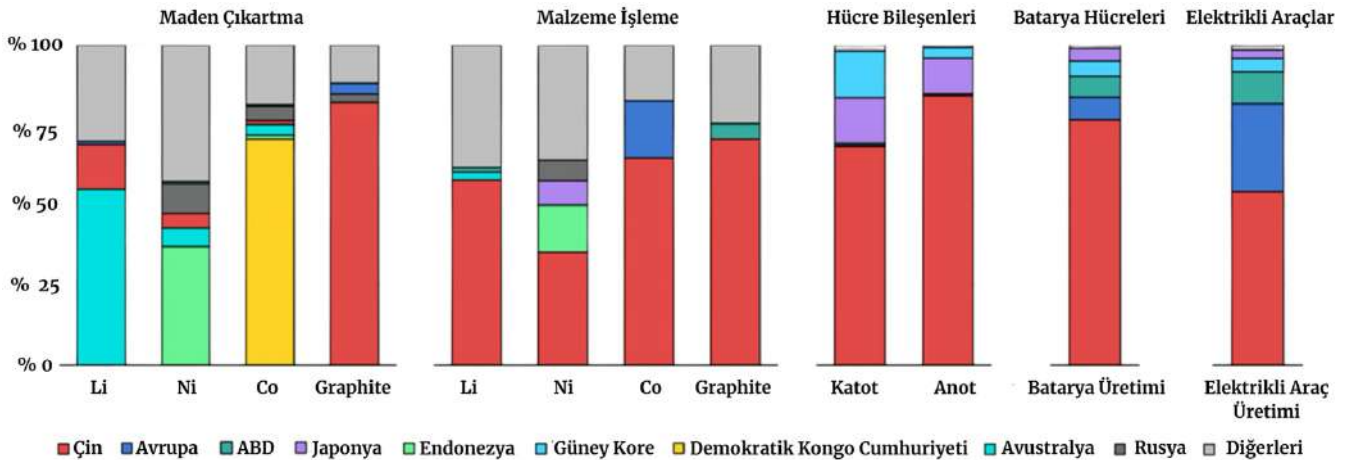
2023 yılında 705,5 GW-sa'lik üretimin 386,1 GW-sa'lik bölümü Çin'de kullanılmıştır (Şekil 26.a ve b). Elektrikli araç batarya pazarında Çinli firmaların olmadığı senaryo incelenirse Çin haricindeki elektrikli araç pazarı 2023 yılında sadece 319,4 GW-sa'lik üretimi kullanabilmiştir.

Çinli elektrikli araç üreticilerini dışarıda bıraktığımızda küresel pazarda daha rekabetçi bir yarış olduğu görülmektedir. Bu yarışta ilk beş hücre üreticisi arasında sadece bir adet Çinli (CATL), bir adet Japon (Panasonic) ve üç adet Güney Koreli (LG Energy Solutions, SK On, Samsung SDI) firma bulunmaktadır (Şekil 26.b).



Şekil 26. Çin ve Çin'in dışındaki ülkeler için elektrikli araç pazarına hücre üreten firmaların 2023 yılı satış/sevkiyat miktarları

Şekil 27'de elektrikli araç tedarik zincirinin basamaklarına göre küresel dağılımları verilmiştir. Metal madenciliğinde kobalt madeninin Demokratik Kongo Cumhuriyeti tarafından, grafitin ise Çin tarafından domine edildiği görülmektedir. Malzeme işleme, hücre bileşenleri tedariki, batarya hücre üretiminde sektörde baskın ülkenin Çin olduğu aşikardır ve diğer ülkelerin Çin ile rekabet edebilmesi için ciddi yatırımlar yaptığı dikkat çekmektedir.



Şekil 27. Elektrikli araç tedarik zincirinin küresel ve bileşen bazlı dağılımları (Int. Kyn. 16)

Geleneksel otomotiv üreticilerinin gelecekte binek araçların elektrikli olacağını öngördükleri noktada, büyük bir güç dengesi geçişi yaşanmış araç üreticileri birdenbire tedarik tabanlarına, özellikle hücre üreticilerine bağımlı olduklarını tespit etmişlerdir. Bu, otomotiv üreticilerinin geleneksel içten yanmalı motorlarda oluşturdukları tedarik zinciri stratejilerine ters düşen bir durumdur. Motor ve mekanik şasi bileşenlerinin aksine, otomobil ölçeğinde, kalite ve maliyet açısından Li iyon hücre tedarikçilerinin sayısı oldukça azdır. Elektrikli araç pazarındaki talepteki hızlı değişimler, hücre tedarikçileri için tehlike olarak değerlendirilmekte ve tedarikçiler güvenilir taahhütler almadan yeni üretim tesisi yatırımlarında risk almamaktadırlar (Tablo 8). Arz-talep dengesi kurulmadığı durumda yüksek hücre ve batarya paket fiyatı, araç fiyatını ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte artan emtia fiyatları da pazardaki dengeyi etkilemektedir. Bu nedenle en büyük elektrikli araç üreticileri tedarik zincirlerini kısmi dikey entegrasyon yoluyla daha sıkı kontrol sağlamak için harekete geçmişler stratejik ortaklıklar kurma, hücreleri kendi fabrikalarında üretmeye başlama kararları almışlardır.

Başlangıçta Nissan, Leaf modeli için kendi Li iyon hücrelerini üretmiş olup, elektrikli araçlara olan zayıf taahhüt nedeniyle fabrika on yıl sonra satılmıştır. Esasen çoğu OEM ve hücre üreticisi, dev fabrikalar inşa etmiş veya inşa etme



planları yapmaktadır, bunu ya bağımsız olarak ya da ortak girişimlerle gerçekleştirmektedirler. Ancak, dev fabrikaların geliştirilmesi zorlu bir süreçtir. En deneyimli hücre üreticileri bile genellikle üretim başlangıcı gecikmeleriyle karşılaşılır, ki bu gecikmeler genellikle dokuz ay veya daha fazla olabilmektedir. Bu, bir proje ekonomisinde önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin, 50 GW-sa'lik bir tesisin her kaybedilen günü, yaklaşık 4 milyon \$'lık bir maliyet yaratmaktadır. Bir aylık üretim kaybı yaklaşık olarak 120 milyon \$ azalarak, ilk yıl marjını 2,5 puan düşürebilmekte bu durum da araç başına 220 \$'lık bir etki oluşturabilmektedir. Tesisler devreye alındığında, ilk yıl verimlilik genellikle %60 seviyelerinde olurken, beklenenden yüksek bu kayıplar verimlilik kayıpları ve makine arızaları arasında eşit olarak dağılmaktadır. Hücre üretimi sırasında kalite sorunları, itibar ve finans açısından da zorluk oluşturmaktadır. Örneğin, 100.000 araç üretmiş bir şirkette pilleri geri çağırma, satış kayıpları ve geri ödeme maliyetleri nedeniyle %5 karı %150'den fazla net zarara dönüştürebilir (Hensley vd. 2022).

Nissan'ın aksine, Tesla, sektördeki en yakın ortaklıklardan birini Panasonic'le oluşturmuş, Gigafabrika'yı birlikte inşa etmiştir ve işletmektedir. Tesla'nın bu başarısının altında yatan faktör dikey entegrasyon fikri henüz sektörde kabul görmemişken uygulamasıdır.

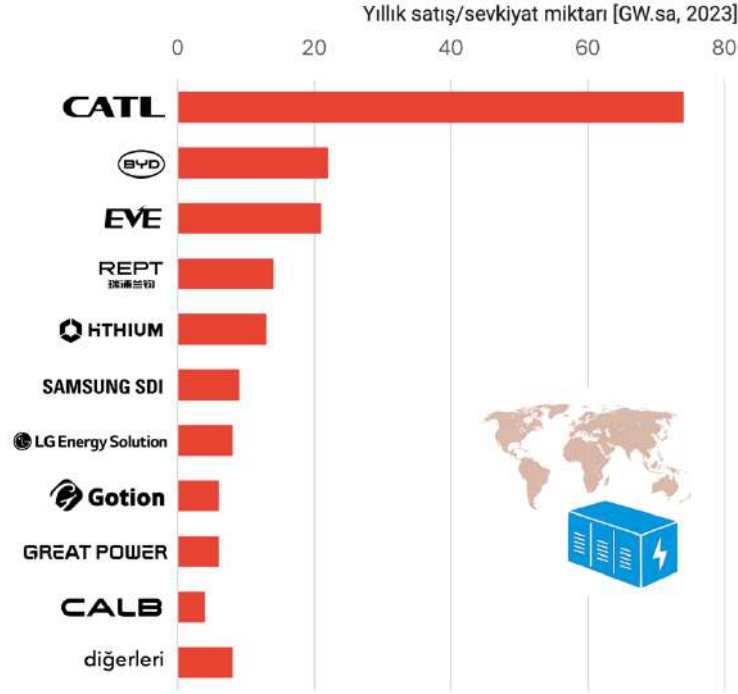
Volkswagen, Northvolt'a büyük yatırımlar yapmış olup ve ortak tesisler kurmaktadır. Panasonic ve Toyota da bu yöne doğru ilerliyip, bir ortaklık açıklamış ve binlerce mühendisi görevlendirmiştir. Son olarak, henüz sadece söylentiler olsa da, Tesla'nın yakında kendi başına hücre üretim planlarını duyurması muhtemeldir. Bu ortaklıkların ve dikey entegrasyon girişimlerinin şu anda son derece avantajlı olmasının birkaç nedeni vardır. Genç ama son derece hızlı büyüyen bir endüstride hızlı ve koordineli kararlar alınması, doğru talep planlaması ve gerekli pil tedarikinin maliyetlerini kontrol etmek için olumlu bir döngü yaratabilmesi bunlardan birkaçıdır.

Tablo 8. Elektrikli araç pazarı batarya üreticilerinin otomotiv üreticileri ile model ilişkisi (Int. Kyn. 17)

Batarya Üreticisi	OEM Otomotiv Üreticisi
CATL	Zeekr 001, GAC Aion S, Tesla Model 3/Y (Çin'de üretilen ve Avrupa, Kuzey Amerika ve Asya pazarına satılan), Nissan Ariya, Hyundai KONA, KIA Ray EV ve BMW iX3, MG modelleri, Mercedes EQE/S, Volvo C40/XC40.
BYD	Bütün BYD modelleri
LG Energy Solution	Tesla Model 3/Y, VW ID. Serisi ve Ford Mustang Mach-E.
Panasonic	Tesla Y ve diğer modellerin Kuzey Amerika pazarındaki tek tedarikçisi, Lexus UX300e, RZ450e, Subaru Solterra, Honda e.
Samsung SDI	BMW I serisi modelleri, Audi Q4 ve Q8 e-Tron, Rivian R1T/R1S, Mini Cooper SE ve FIAT 500e.
SK On	Hyundai IONIQ 5, KIA EV6, KIA EV9, Genesis G80, GV60, Mercedes EQA/B ve Ford F-150 Lightning.

6.2. Sabit Enerji Depolama Sistemleri Batarya Pazarı

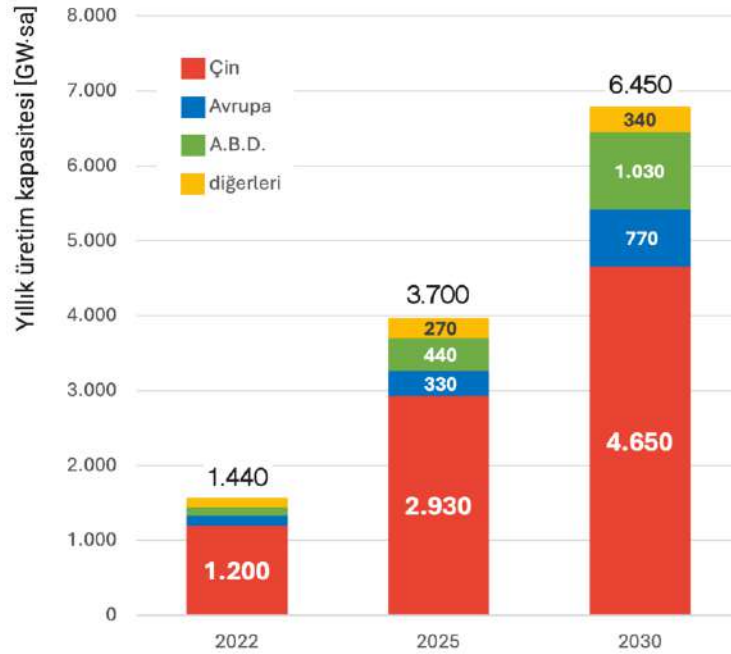
Enerji depolama sistemleri (EDS) pazarı, güçlü bir şekilde büyüyen pazardır. Çin, tutarlı düzenlemeler ve cazip batarya çözümleriyle pazarı yönlendirmektedir. Güney Koreli hücre üreticileri (LG Energy Solution, SK Innovation ve Samsung SDI), LFP ürünlerinin eksikliği nedeniyle sıkıntı yaşamaktadırlar. EDS pazarının elektrikli araç pazarına kıyasla farklı ihtiyaçları olduğundan, LFP kimyası bu pazarın tercih edilen kimyası haline gelmiştir. Bu pazarın hakim üreticileri Çin'li firmalar olmuştur (Şekil 28). 2022 yılında 146,5 GW-sa'lik hücre satışı gerçekleşen bu pazarda 2023 yılında 224 GW-sa'lik hücre sevkiyatı gerçekleşmiştir. Bu sevkiyatların 102 GW-sa'lik kısmı Çin'e satılırken, 66,5 GW-sa'lik bölümü ABD'nde kurulmuş ve sadece 28 GW-sa'lik bölümü Avrupa Birliği'ne sevk edilmiştir.



Şekil 28. Küresel Sabit EDS pazarına hücre üreten firmaların 2023 yılı satış/sevkiyat miktarları

6.3. Ülke ve Kıta Bazlı Gelecek Yatırımları

Ülkelere bağlı olarak batarya üretici firmaların varolan üretim kapasiteleri ve gelecek için varsayılan büyümeler Şekil 29'da verilmiştir. Çin'in 2022 yılında da varolan liderliğini 2025 ve 2030 yılında da sürdüreceği görülmektedir.



Şekil 29. Ülke ve kıta bazlı batarya üretici firmalarının kapasite yatırımları, 2022 – 2030 (Int. Kyn. 18)

6.3.1. Çin Halk Cumhuriyeti

Çin'in batarya hakimiyetinin arkasında, metal madenciliğinden elektrikli araçların üretimine kadar EA tedarik zincirinin geri kalanındaki dikey entegrasyonu yatmaktadır. Çin'de faaliyet gösteren ve duyurulan giga-fabrika yatırımları Şekil 30'da verilmiştir. Çin yalnızca hücre üretiminde değil, lityum, elektrolitler, seperatör, katotlar ve anotlar gibi hücreyi oluşturan parçaların ve metallerin üretiminde de piyasanın en büyük oyuncusudur. Çin'e rakip olmak isteyen başlıca oyuncuların ikisi olan ABD ve Avrupa'nın, 2030 yılında tahmin edilen yurt içi batarya talebini karşılamak için tedarik zincirine sırasıyla 87 milyar \$ ve 102 milyar \$'a ulaşan devasa bir yatırımlar yapmak zorunda kalacağını tahmin edilmektedir (Int. Kyn. 18).

Çin Giga-fabrika yatırımları

(2.294 GWsa, 2023)

- 1 Jiangsu - 55
- 2 Zhejiang - 31
- 3 Guangdong - 29
- 4 Anhui - 24
- 5 Hubei - 24
- 6 Jiangxi - 21
- 7 Sichuan - 15
- 8 Fujian - 12
- 9 Henan - 12
- 10 Shandong - 10
- 11 Chongqing - 9
- 12 Hunan - 9
- 13 Guangxi - 8
- 14 Guizhou - 4
- 15 Inner Mongolia - 4
- 16 Yunnan - 4
- 17 Liaoning - 3
- 18 Shaanxi - 3
- 19 Tianjin - 3
- 20 Hebei - 2
- 21 Heilongjiang - 2
- 22 Ningxia - 2
- 23 Qinghai - 2
- 24 Shanghai - 2
- 25 Gansu - 1
- 26 Jilin - 1
- 27 Beijing - 1

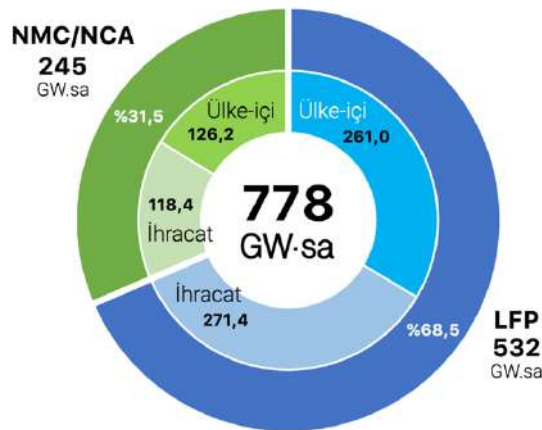
Note: Number of gigafactories is per province.

Source: Global Battery Factory Database, Benchmark Mineral Intelligence, Battery Intelligence



Şekil 30. Volta Foundation tarafından açıklanmış olan Çin giga-fabrika yatırımları (Int. Kyn.19).

Çin otomotiv batarya inovasyon birliği (CABIA) tarafından açıklanan verilere göre Çin iç pazarında yer alan ilk 15 şirket ve pazar payları karşılaştırıldığında global ölçekte piyasa lideri olan CATL firmasının Çin iç pazarında da %44,29'luk pay ile lider olduğu görülmektedir. Global ölçekte ikinci sırada olan BYD firması Çin iç pazarında %26'luk paya sahiptir.



Şekil 31. 2023 yılında Çin'de üretilen Li iyon hücrelerin kimyasal dağılımı.

Şekil 31'de görüldüğü gibi Çin'in NMC/NCA bazlı hücre üretim/satış miktarı 2023 yılı sonunda 245 GW-sa olup, toplam hücre satışının yüzde 31,5'ini oluştururken, LFP pilinin satış hacmi 532 GW-sa olup toplam kapasitenin %68,5'ini oluşturmaktadır. NMC/NCA bazlı Li-iyon pil pazarında CATL, Aralık 2023 ayı verilerine göre % 57,7 payla ilk sırada yer alırken onu % 10,5 ile LGES ve % 8,5 ile CALB firması takip etmiştir. LFP bazlı Li iyon batarya pazarında BYD ve CATL, Aralık 2023 ayında % 35'lik paylarla listenin ilk iki sırasında yer alırken diğer firmaların pazar payları %8'lerin altında kalmaktadır.

6.3.2. Avrupa kıtası

Avrupa kıtası son yıllarda EA ile ilgili yatırımlarını hızlandırmış ve hücre üretimleri üzerine yeni giga fabrika yatırımları planlamışlardır. Şekil 32'de faaliyet halinde olan ve yatırım aşamasındaki tüm işletmeler gösterilmektedir.

Avrupa Giga-fabrika

yatırımları (1.923 GWhsa, 2023)

France

- 1 ACC, 40 GWh*
- 2 Envision AESC/Renault, 30 GWh*
- 3 Verkor/Renault, 50 GWh*
- 4 Prologium, 48 GWh*

Germany

- 5 ACC, 40 GWh*
- 6 CATL, 14 GWh*
- 7 Leclanche, 25 GWh
- 8 Northvolt, 60 GWh*
- 9 SVOLT, 24 GWh
- 10 SVOLT, 16 GWh*
- 11 Tesla, 100 GWh*
- 12 PowerCo, 40 GWh*

Italy

- 13 ACC, 40 GWh*
- 14 ITALVOLT, 70 GWh*

Portugal

- 15 CALB, 45 GWh*

Netherlands

- 16 Eurocell, 1 GWh

Sweden

- 17 Northvolt, 60 GWh*
- 18 Volvo*
- 19 NOVO, 50 GWh*

*Non-operational, slated for future date

Source: Felt: Global Battery Factory Database, Benchmark Minerals, Battery-News24

Hungary

- 20 CATL, 100 GWh*
- 21 Cellforce Group, 10 GWh*
- 22 EVE Energy, 28 GWh*
- 23 Samsung SDI, 40 GWh*
- 24 SK, 47.3 GWh*

Norway

- 25 Elinor*
- 26 FREYR, 29 GWh*
- 27 Morrow, 43 GWh*
- 28 Beyondr, 10 GWh*

Spain

- 29 Envision AESC, 50 GWh*
- 30 PowerCo, 60 GWh*
- 31 Basquevolt, 10 GWh*

U.K.

- 32 Envision AESC, 35 GWh*
- 33 Tata, 40 GWh*
- 34 AMTE Power, 10 GWh

Slovakia

- 35 Inobat, 10 GWh

Poland

- 36 LGES, 115 GWh*

Czech Republic

- 37 MES, 15 GWh*

Turkey

- 38 Aspiisan, 1 GWh*
- 39 Siro Energy, 20 GWh*
- 40 Pomega, 5 GWh*



Şekil 32. Volta Foundation tarafından açıklanmış olan Avrupa giga-fabrika yatırımları (Int. Kyn. 19).

6.3.3. Kuzey Amerika

Teknolojinin çıkış noktası kabul edilen Kuzey Amerika bölgesi an itibari ile rekabette Asya kıtasının çok gerisinde kalmış ve rekabette yerini korumak için batarya hücre/modül/paket üretimi konularında teşvikler ile desteklenen birçok yatırımı planlamış, özellikle yabancı ortaklı hareket planlarını duyurmuşlardır. Bu raporda özellikle ticari olarak satılan EA'lara yönelik hücre üreten firmalar ve üretim tesisleri ele alınmıştır (Bknz. Şekil 33). Kuzey Amerika kıtasında hücre kimyaları özellikle NMC ve NCA etrafında yoğunlaşmaktadır. Hücre tipleri özellikle başta silindirik tip olmak üzere bunu takiben kese tipi ve bazı niş otomotiv markaları için prizmatik hücreler üretilmektedir.

Çin ile rekabet edebilmek amacıyla aldığı ciddi yatırımlarla dikkatleri çeken Kuzey Amerika 2020 yılında toplam üretimin %9,22'lik kısmına sahip iken 2030 yılında ise bu oranın %11,9 olacağı öngörülmektedir (Int. Kyn. 18).

Kuzey Amerika Giga-fabrika

yatırımları (1.564 GWhsa, 2023)

USA

- 1 ABF, USA, 15 GWh*
- 2 Amprius Tech, USA, 10 GWh*
- 3 Electrova Tech, USA*
- 4 Envision AESC, USA, 3 GWh
- 5 Envision AESC, USA, 30 GWh*
- 6 Envision AESC/Mercedes-Benz, USA, 40 GWh*
- 7 Ford/CATL, USA, 20 GWh*
- 8 FREYR, USA, 34 GWh*
- 9 Gotion, USA*
- 10 IMZNY/MAGNIS, USA, 38 GWh*
- 11 KORE Power, USA, 12 GWh*
- 12 LGES, USA, 27 GWh*
- 13 LGES, USA, 25 GWh*
- 14 Ultium Cells, USA, 50 GWh*
- 15 Ultium Cells, USA, 70 GWh
- 16 LGES/Honda, USA, 40 GWh*
- 17 Panasonic, USA, 39 GWh*
- 18 Panasonic/Tesla, USA, 100 GWh*
- 19 Samsung SDI/GM, USA, 30 GWh*
- 20 Samsung SDI/Stellantis, USA, 67 GWh*

*Non-operational, slated for future date

Source: Charged: NA EV Battery Supply Chain, Benchmark Minerals, Felt: Global Battery Factory Database, Battery-News24

- 21 SK, USA, 31.3 GWh
- 22 SK/Ford, USA, 86 GWh*
- 23 SK/Hyundai, USA, 35 GWh*
- 24 Tesla, USA, 10 GWh
- 25 Toyota, USA, 30 GWh*
- 26 LGES/Hyundai, USA, 30 GWh*
- 27 Ultium Cells, USA, 41 GWh
- 28 Electrova, USA*
- 29 Forge Battery, USA* 1-3 GWh
- 30 SAFT, USA, 2 GWh*
- 31 Tesla, USA, 100 GWh
- 32 Our Next Energy, USA, 20 GWh*
- 33 Gotion, USA, 40 GWh*

Canada

- 34 LGES/Stellantis, CA, 45 GWh*
- 35 PowerCo, St. Thomas, CA, 90 GWh*
- 36 Lion Electric, Quebec, CA, 5 GWh
- 37 STORMVOLT, Quebec, CA, 10 GWh*
- 38 Northvolt, Montreal, CA, 60 GWh*



Şekil 33. Volta Foundation tarafından açıklanmış olan Kuzey Amerika giga-fabrika yatırımları (Int. Kyn. 19).

Tesla gibi bir markanın başı çektiği ABD pazarında, Tesla tesislerinin bulunduğu bölgelerden ziyade, ülkenin batı bölümünde batarya tesisleri yoğunlaşmaktadır. Michigan bölgesinde, Detroit şehrinin otomotiv geçmişinin etkisinde, bazı teşvikleri değerlendiren batarya üreticilerinin konumlandığı görülmektedir.

ABD pazarında, hücre üreticileri, şirket birleşmeleri ve satın almalarını çoğunlukla dikeyde, uygulama geliştiricileri olan müşterileri ve bileşen sağlayan tedarikçileri ile yapmaktadırlar. Henüz nihai ürün üreticileri ve hammadde tedarikçileri olan uçlarda satın almalar yaygın değildir. Yatayda ise farklı kıtalardaki firmaların alınarak pazara giriş stratejileri gözlenmektedir, nitekim genel tercih iş birliği çatısı altında veya ana firmanın iştiraki olarak yatırım yönündedir.

Yatırımların yapılacağı bölgeler, miktarlar ve ortaklıklar, ilgili bölgelerin yerel yönetimleri ve federal yönetimin yürürlüğe aldığı teşviklere göre belirlenmektedir. Federal yönetimin enflasyon ile mücadele hareketi kapsamında birim kW. sa başına 35\$ vergi indirimi ve batarya teknolojisine dayalı üretim ile istihdam planı (19.10.2022 - Beyaz Saray Bildirgesi H.R. 4693) bir çok firma için teşviklerin hem erişilebilir hem de uzun dönemde cazip olmasını sağlamıştır. Uygulamayı takiben birçok yatırım planı yürürlüğe alınmış ve önümüzdeki yıllarda devreye girmesi üzere yatırım planları yapılmıştır. 2030 yılına kadar Amerika'daki araçların yarısının elektrikli olması hedefi ile süreçleri hızlandırma gayreti ülke yönetiminde hakimdir.

En büyük yatırımları Güney Koreli firmalar (LG Energy Solutions ve SK On) yapmaktadır. İki firma da yüksek kapasiteyi hedef almış ve Amerikalı üreticiler ile ortak girişimlerde hareket etmektedirler. Firmalar, aldıkları bazı yatırım kararlarını artan hammadde maliyetleri ve istikrarını koruyamayan batarya siparişleri sebebi ile iptal etmekte veya daha yüksek teşvik veren başka bir yere taşımakta veya genelde müşterileri olan otomotiv üreticileri ile iş birliği kurarak değiştirmektedirler. Nitekim çoğu karar iptal edilmekten ziyade belirtilen gerekli şekil değişikliği yapılarak devam edilmesi yönündedir. LG Energy Solutions firması duyurduğu yatırım bölgesi kararını, daha yüksek teşvik aldığı başka bir yere taşımak üzere aniden değiştirmiştir. Keza, Tesla'nın yatırım yaptığı fabrikalarda hücre kimyası ve hücre tipi kararlarını sıklıkla değiştirdiği bilinmektedir. Hatta bazı durumlarda hatlarını bir tesisten diğerine taşıdığı da belirtilmektedir. Tesla firmasının yaptığı taşımalar ve değişikliklerin tamamen proje fonları ve yatırım teşvikleri güdümünde fırsatları değerlendirdiği sonucuna varmak yerinde olacaktır.

6.3.4. Asya Pasifik ülkeleri

Asya pasifik ülkeleri de benzer şekilde elektrikli araçlar konusundaki gelişmelere kayıtsız kalmayıp batarya yatırımları yapmaktadırlar. Şekil 34'te bu yatırımlar gösterilmiştir.

Asya Giga-fabrika

yatırımları (2.680 GWh'a, 2023)

India

- 1 Reliance, Gujarat, 50 GWh*
- 2 Amara Raja, Telangana, 16 GWh*
- 3 Exide, Karnataka, 12 GWh*
- 4 Godi, Hyderabad, 12 GWh*
- 5 OLA, Tamil Nadu, 100 GWh*
- 6 TATA, Gujarat, 10 GWh*

Vietnam

- 7 Gotion, Vung Ang, 5 GWh*

Thailand

- 8 EVE Energy, Thailand, 6 GWh*
- 9 GPSC, Map Ta Phut, 10 GWh*

Indonesia

- 10 CATL, Indonesia, 15 GWh*
- 11 LGES, Karawang, 10 GWh*

Malaysia

- 12 EVE Energy, Malaysia*
- 13 Samsung SDI, Seremban, 16 GWh*

*Non-operational, slated for future date

South Korea

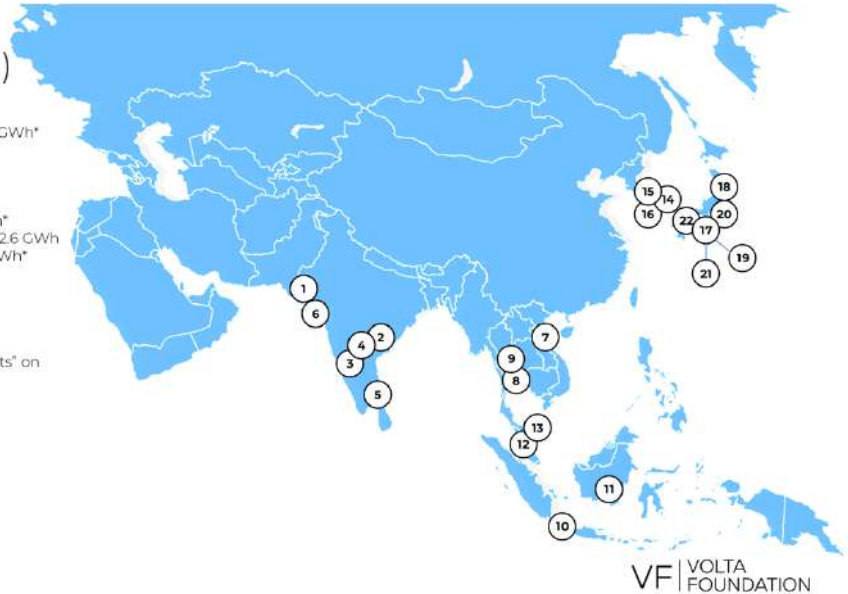
- 14 Samsung SDI, Cheonan, 12 GWh*
- 15 LGES, Ochang, 35 GWh*
- 16 SK, Seosan, 5 GWh

Japan

- 17 Prime Planet, Japan, 7 GWh*
- 18 Envision AESC, Kanagawa, 2.6 GWh
- 19 Envision AESC, Ibaraki, 18 GWh*
- 20 Panasonic, Osaka
- 21 Panasonic, Uchita, 10 GWh
- 22 Panasonic, Asonaka*

China

See "Chinese Gigafactory Plants" on the following page.

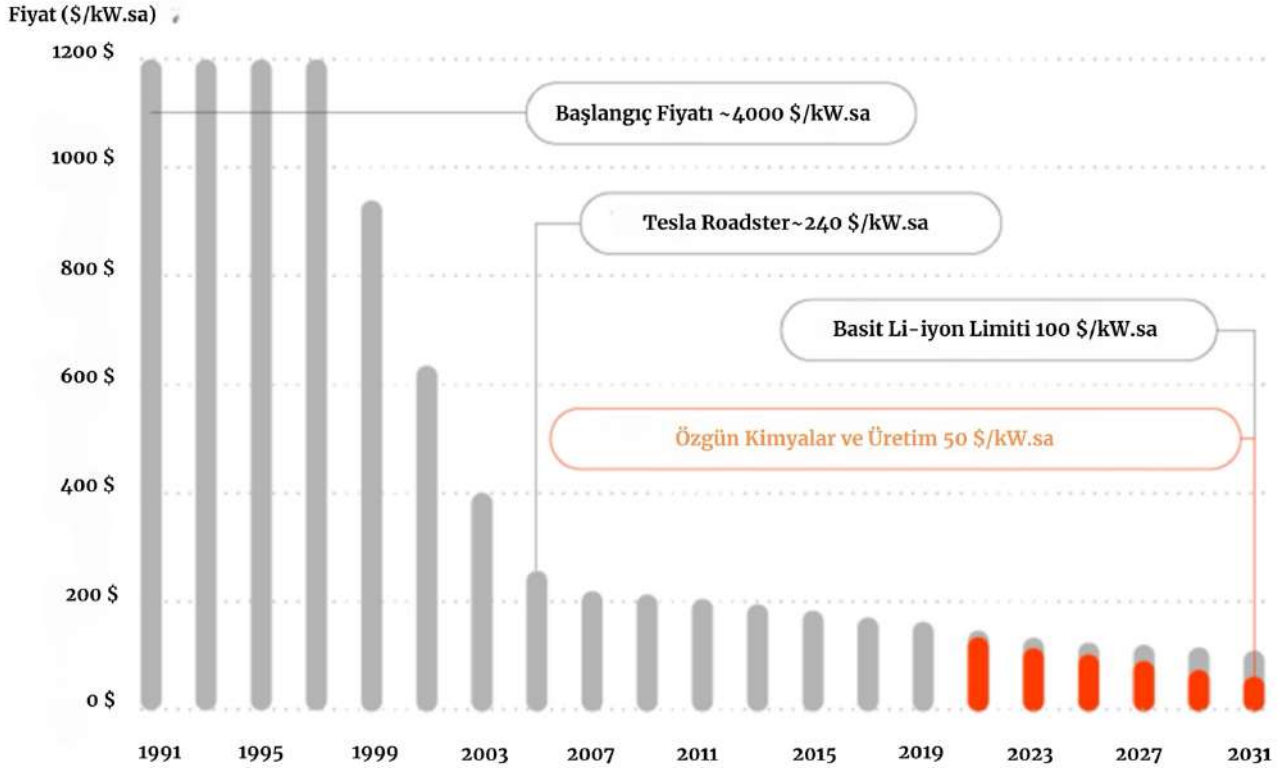


Source: Global Battery Factory Database, Benchmark Minerals, Battery-News.de

Şekil 34. Volta Foundation tarafından açıklanmış olan Asya ülkeleri giga-fabrika yatırımları (Int. Kyn. 19).

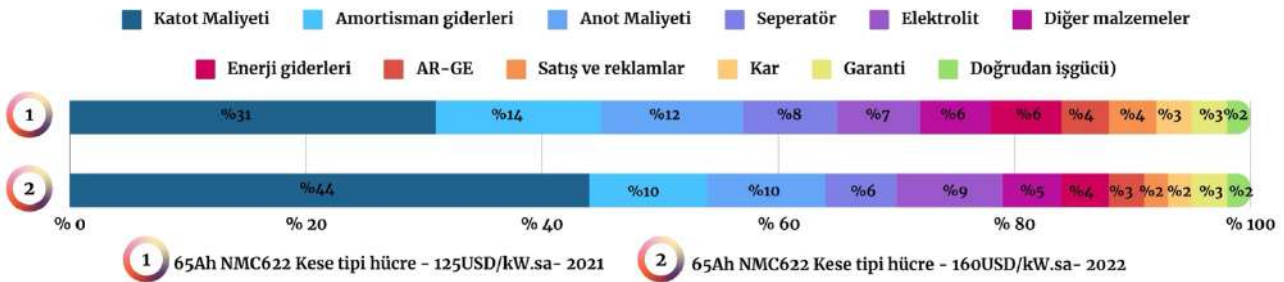
6.4. Batarya Hücresi Fiyat Analizleri

Batarya hücre fiyatları elektrikli araç fiyatlarını doğrudan etkileyen unsurlardandır. Bir teknoloji ilk üretildiği yıllarda proses ve malzeme maliyetlerine bağlı olarak genellikle oldukça pahalıdır, üretilen yeni teknoloji üzerine yapılan Ar-Ge çalışmaları ile hem ürün hem de proses performansı artar. Bununla birlikte müşterinin yeni ürüne ilgisi de artacağından oluşan taleplere karşı piyasada fiyatlanma değişir.



Şekil 35. kW-sa başına batarya hücreleri fiyat değişimi (Int. Kyn. 20)

Şekil 35’de Li iyon bataryaların icadından bu yana yaşanan fiyat değişimi paylaşılmıştır. 1990’lı yıllarda kW-sa başına 4.000 \$ olan fiyatlar yıllar geçtikçe azalmıştır ve 2031 yılında inovasyonların etkisi ile 50 \$ mertebelerine düşeceği öngörülmektedir.

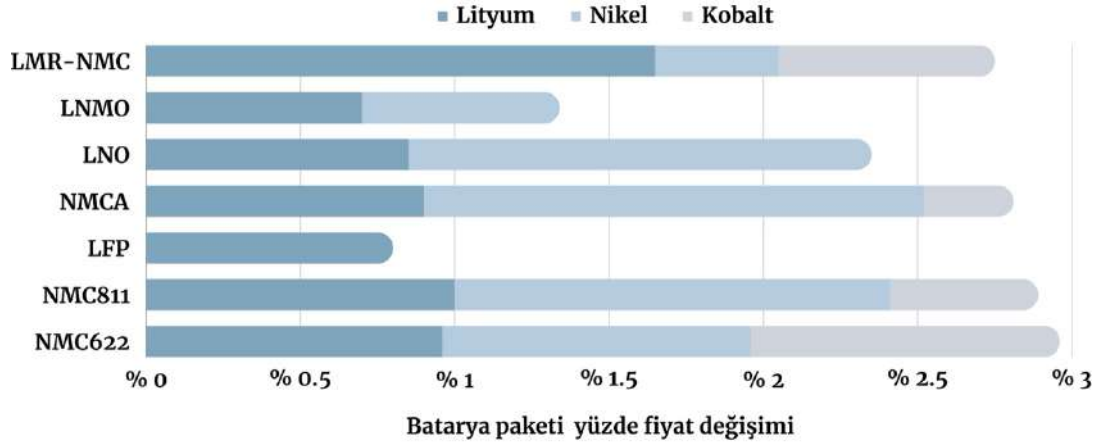


Şekil 36. 65 A-sa kapasiteli bir kese tipi hücrenin bileşenlerinin 2021 ve 2022 yılına ait fiyat analizleri (Renard, 2023).

Şekil 36’da 2021 ve 2022 yıllarına ait 65 A-sa kapasiteye sahip kese tipi hücrenin maliyet dağılımı paylaşılmıştır. Hücredeki en yüksek maliyeti %44 oranıyla katot oluşturmaktadır ve bu sebeple katot aktif malzemeleri oluşturan kritik elementlerin fiyat dalgalanmaları toplam paketin fiyatının belirlenmesinde önem arz etmektedir.

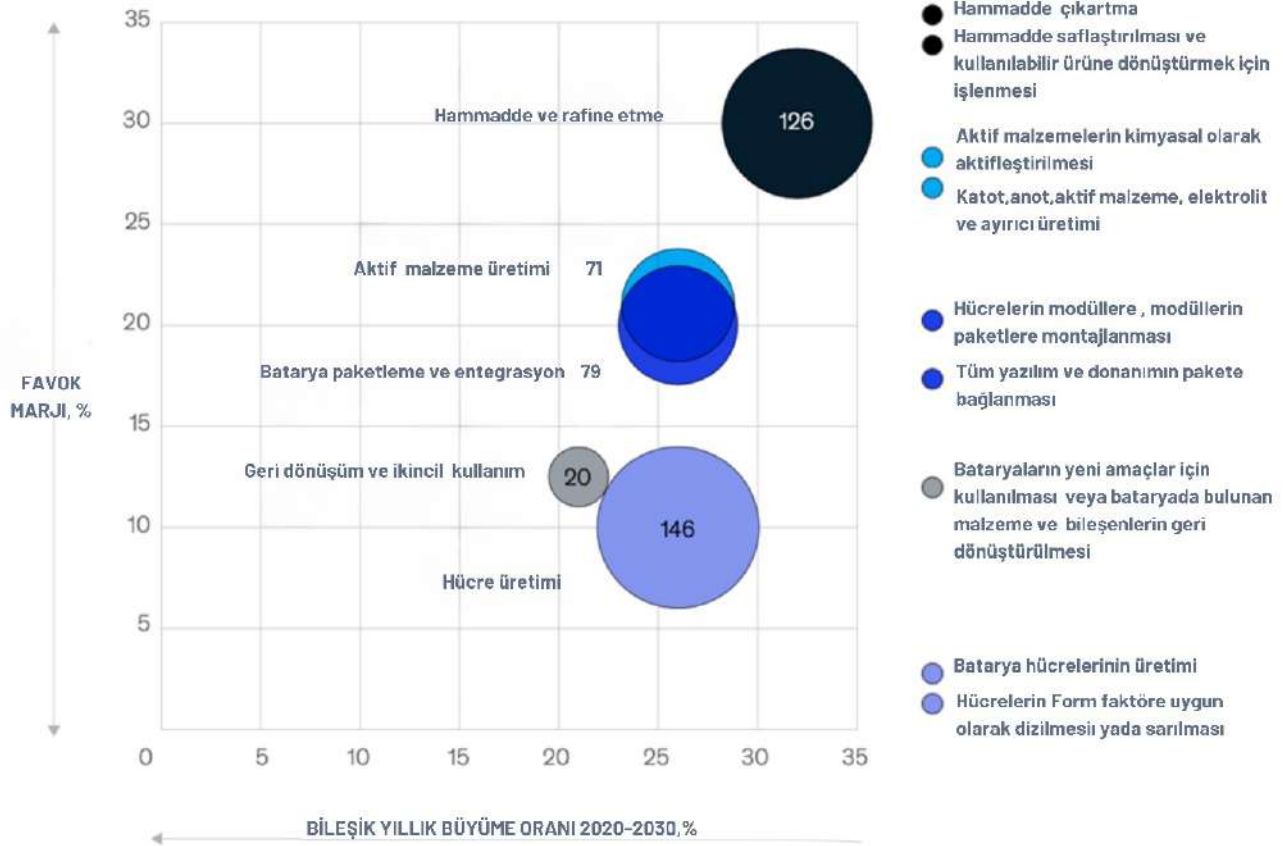
Şekil 37’de katot kimyalarını oluşturan elementlerin fiyatlarında meydana gelen %10’luk dalgalanmanın toplam paket fiyatına etkisi yüzdelik dilimler halinde verilmiştir. Kritik elementlerin (kobalt gibi) bulunduğu katot kimyalarındaki fiyat dalgalanmalarının toplam paket fiyatına olan etkisinin çok büyük olduğu görülmektedir. Bu sebeple fiyat

dalgalanmalarından daha az etkilenmek isteyen büyük firmalar CATL gibi şimdiden hammadde ve geri dönüşüm konularında yeni arayışlara başlamışlardır.



Şekil 37. Çeşitli katot kimyaları için emtia fiyatlarında oluşan % 10'luk değişimin batarya paketin toplam fiyatına etkisi (Int. Kyn. 21)

Şekil 38'de pil değer zincirinin tüm bileşenlerinin 2030'a kadar olan tahminleri verilmektedir. Zincirdeki tüm sektörlerin 2030 yılına gelindiğinde hızla büyümesi beklenmekte ve bunların içerisinde özellikle hücre üretimi ve madencilik sektörlerinin en büyük pazarlar olacağı öngörülmektedir. Bu büyümenin tedarik zinciri zorlukları yaratacağı beklenmektedir.



Şekil 38. Batarya tedarik zincirinde bulunan sektörlerin 2030 yılı büyüme tahminleri (Favok: Faiz, Amortisman ve Vergi Öncesi Kâr), (Int. Kyn. 22)

7. BATARYA ÜRETİMİNE DEVLETLERİN YAKLAŞIMLARI

7.1. Çin Halk Cumhuriyeti

Çin'in 14,5 yıllık kalkınma planında stratejik ve yükselmekte olan endüstrilere geniş yer verilmiştir. Bunlardan bir tanesi ise yeni enerjili araçlar (YEA, New Energy Vehicle) kategorisidir. Planda yerel ve devlet yönetimlere yüksek kalite ve standartlarda YEA üretiminin desteklenmesi, bu hususta planlar geliştirilmesi amacıyla yol gösterilirken bir yandan da gelecek nesil pil kimyaları odaklı Ar-Ge çalışmalarının gerekliliğine de vurgu yapılmaktadır. 2021-2025 yılları için Na iyon batarya üzerinde çokça durulmuştur. Planda Na-iyon pil endüstrisinin gelişimini teşvik etme hususu vurgulanmakta ve plan, endüstri ürün standartlarını kullanarak ölçek büyütme, maliyeti düşürme ve pil performansını artırmak hedeflenmektedir. Bölgesel beş yıllık planlar (örneğin Pekin, Şanghay, Guangdong, Tianjin, Jiangsu, Fujian ve Shaanxi gibi) büyük endüstriyel elektrikli araç bileşen ve hücre üreticileriyle iş birliği yaparak yeni nesil elektrikli araç üretimini ilgili endüstrilerle entegre etmeye odaklanıyor. Bu planlar, vergi muafiyetleri, tercih edilen krediler, ortak finansman gibi teşviklerle endüstriyel kalkınma bölgelerinde yeni nesil elektrikli araç üretimini desteklemeyi ve endüstriyel üretim üslerini geliştirmeyi hedefliyor. Kasım 2021'de Sanayi ve Bilgi Teknolojisi Bakanlığı, sektörün yönetimini güçlendirmek amacıyla Li iyon pil endüstrisinin gelişimi üzerine iki taslak kılavuz yayınlamıştır. Taslak kılavuzlar, tesis genişletmelerini yalnızca üretimin kapasitenin %50'sinin üzerinde olması durumunda öneriyor. Ayrıca, minimum enerji yoğunluğu (kilogram başına en az 180 W·sa), döngü ömrü ve üretim sürecinde güneş enerjisinin kullanımını teşvik eden teknik standartlar öneriyor.

7.2. Avrupa Birliği

Avrupa Birliği, yerli pil tedarik zincirlerinin gelişimine stratejik olarak odaklanmıştır. Mart 2022'de, Avrupa Pil Birliği ve ABD Li-Bridge Birliği, Li iyon ve gelecek nesil pillerin, kritik hammadde dahil olmak üzere gelişimini hızlandırmak amacıyla bir işbirliği duyurmuştur. Ortak Avrupa Çıkarı Projeleri (IPCEI), Avrupa Birliği Sanayi Stratejisi'nin uygulanması açısından önemli bir stratejik araçtır. Pil üretimini teşvik etmek için iki bölümlü bir IPCEI uygulanmıştır: Pil IPCEI ve Avrupa Pil İnovasyonu IPCEI (EuBatIn). Her ikisi de katılımcıların malzemeden hücrelere, pil sistemine ve geri dönüşüme kadar tam değer zincirini temsil ettiği ortak bir özelliğe sahiptir. Ayrıca, şirketler ve iki IPCEI arasında yüksek düzeyde iletişim bulunmaktadır. 2019'da kurulan Pil IPCEI, farklı Avrupa Birliği üye devletlerinde merkezi olan şirketleri bir araya getirmektedir. EuBatIn, 2021 yılında kurulmuştur ve pil tedarik zincirlerine odaklanmaktadır. EuBatIn 12 AB üye devleti ve 40 şirketi bir araya getirmiştir Ayrıca 2031'e kadar olan dönem için 2,9 milyar € finansman sağlamıştır.

Avrupa Komisyonu, 2022 mart ayı itibarıyla Yeşil Yeni Mutabakat Kapsamı'nda alınan önlemler dahilinde, Avrupa'da satılan piller için zorunlu karbon ayak izi beyanını, geri dönüştürülmüş içerik için minimum gereksinimleri ve elektrikli araç pillerinin toplanması ve geri dönüşümü için gereksinimleri içeren batarya regülasyonunu kabul etmiştir.

Batt4EU Ortaklığı, Avrupa Komisyonu pil tedarik zinciri içinde endüstri ve Ar-Ge paydaşlarını içeren Batteries European Partnership Association üyelerinin (BEPA) çabalarını birleştirmek için Haziran 2021'de kurulmuştur. Ortaklık, UFUK Avrupa Programı çerçevesinde pil Ar-Ge ve yenilik projelerine fon sağlamaktadır. İki taraf arasında imzalanan bir Mutabakat Zaptı'na göre, Avrupa Komisyonu'nun 2021 ile 2027 arasında pil araştırma ve yenilik çalışmaları için 925 milyon € fon yönlendireceği belirtilmiştir.

Şubat 2022'de Avrupa Komisyonu, EIT InnoEnergy'ye Avrupa Pil Birliği Akademisi'nde değer zinciri boyunca işgücünde giderek artan bir beceri boşluğunu kapatmaya yardımcı olmak için 10 milyon € tahsis etmiştir. Almanya'da, Federal Ekonomi ve İklim Eylemi Bakanlığı tarafından 2022'ye kadar pil hücresi üretiminde ülkeyi küresel bir lider haline getirmek için 1 milyar € kadar fon ayrılmıştır.

7.3. Japonya

Japonya, 2021'de Stratejik Enerji Planı'nı yayınlamış ve 2020 Yeşil Büyüme Stratejisi altındaki hedefleri yeniden vurgulamıştır; bu hedefler 2030'a kadar araç pilleri için yerli üretimi 100 GW·sa'e çıkarmayı amaçlamaktadır. Nisan 2021'de kurulan Tedarik Zinciri için Pil Birliği, önemli Japon OEM'leri içermektedir. Birliğin kuruluş belgesi, hükümetin pil üretim tesisleri için finansal teşvikler sağlamasını talep etmiş olup yapılan değerlendirmelerin sonucunda, Japonya hükümeti, yerli pil üretimi için 2021 mali yılı ek bütçesi için 100 milyar JPY paketini duyurmuştur.



7.4. Güney Kore

2021'in ortalarında yapılan K-pil mavi planı duyurusu, vergi teşviklerini genişletmeye ve Ar-Ge harcamalarını artırmaya odaklanan bir hükümet stratejisi olarak yenilenmiş olup, belirtilen hedef, Kore'nin 2030'a kadar dünyanın en büyük elektrikli araç pil üretim ülkesi olmasıdır. LG Energy Solution, Samsung SDI ve SK On gibi üç büyük Güney Koreli (ve küresel) yerli pil üreticisi arasında "büyük ittifak"ın oluşturulması, endüstriyel bir ağ inşa etmeyi amaçlamaktadır. Hükümetin, şirketlerin ve finansal kurumların katkılarıyla 80 milyar KRW (69 milyon dolar) fon, diğer şirketler ve akademik kurumlarla iş birliği içinde pil teknolojisi, parçaları ve malzeme gelişimini desteklemek üzere kurulacaktır. Ek olarak, pil gelişimini desteklemek için KRW 1,5 trilyon (1,3 milyar \$) daha sağlanacaktır.

7.5. Amerika Birleşik Devletleri

Ulusal Lityum Pilleri Mavi Planı'nın (2021-2030) yayınlanmıştır. Bu plan, ülkede güvenli pil malzemeleri ve teknoloji tedarik zincirleri kurma vizyonunu detaylandırmaktadır. Plan uzun vadeli politika yapıcılar, endüstri ve yatırımcılar için rehberlik oluşturmayı amaçlamış ve tedarik zinciri boyunca hedefler belirleyerek uzun vadeli hedefler oluşturmuştur. Bunlar; yukarı akış zincirinde hammadde ve kritik minerallerin güvence altına alınması ve malzeme işleme tabanının oluşturulması; yerli elektrot, hücre ve paket imalat sektörlerinin oluşturulması; yaşam sonu kritik malzeme geri dönüşümü, ve pil teknolojisi geliştirme üzerine Ar-Ge çalışmalarıdır. Ekim 2021'de ABD Enerji Bakanlığı Argonne Ulusal Laboratuvarı, Li-Bridge'in oluşturulduğunu duyurmuştur. Bu, yerli lityum pil tedarik zincirindeki boşlukları doldurmak için yeni bir kamu-özel ortaklıktır. Bu, ABD pil endüstrisindeki ilk türde bir iş birliği olarak kayda geçmiştir. Şubat 2022'de Altyapı Yatırımı ve İstihdam Yasası (Bipartisan Infrastructure Law) kapsamında ileri düzey pil tedarik zincirlerinin üretimini artırmak için yaklaşık 3 milyar \$ onaylanmıştır. Bu onay, pil malzemeleri ve rafinasyonu için finansmanı, üretim tesislerini, pil hücre ve paket imalat tesislerini ve geri dönüşüm tesislerini içermektedir.

2022-2023 yılları için Amerika 369 milyar \$ bütçe sağlamıştır. Bütçe iklim ve temiz enerji girişimlerine yönelik harcamaları kapsayıp ve batarya üreticileri ile elektrikli araç üreticilerini etkileyen bazı ana unsurları içermektedir:

Teşvikler: Batarya üreticileri, ABD'de hücre üretimi için kW-sa' başına 35 \$ ve modüller için 10 \$ teşvik alabilirler.

Yerli kaynak kullanımı: Elektrikli araç üreticileri, vergi kredisi için 2024 yılına kadar kritik batarya minerallerinin %40'ını yerel kaynaklardan veya serbest ticaret ortaklarından temin etmek zorundadır. Bu yüzde gereksinimi 2026'da elektrikli araçlarla ilgili vergi kredileri için %80'e çıkacaktır.

Serbest ticaret anlaşması (FTA) ülkeleri: Mevzuat, kritik minerallerin kaynağı için uygun olan Kanada, Meksika, Avustralya, Şili, Fas, Güney Kore gibi FTA ülkelerini tanımlamaktadır.

Kritik mineraller: 50 tanımlı kritik mineral listesinde lityum, nikel, kobalt, mangan, grafit gibi elementler yer alırken, ilginç bir şekilde fosfor veya demir gibi mineraller yer almıyor.

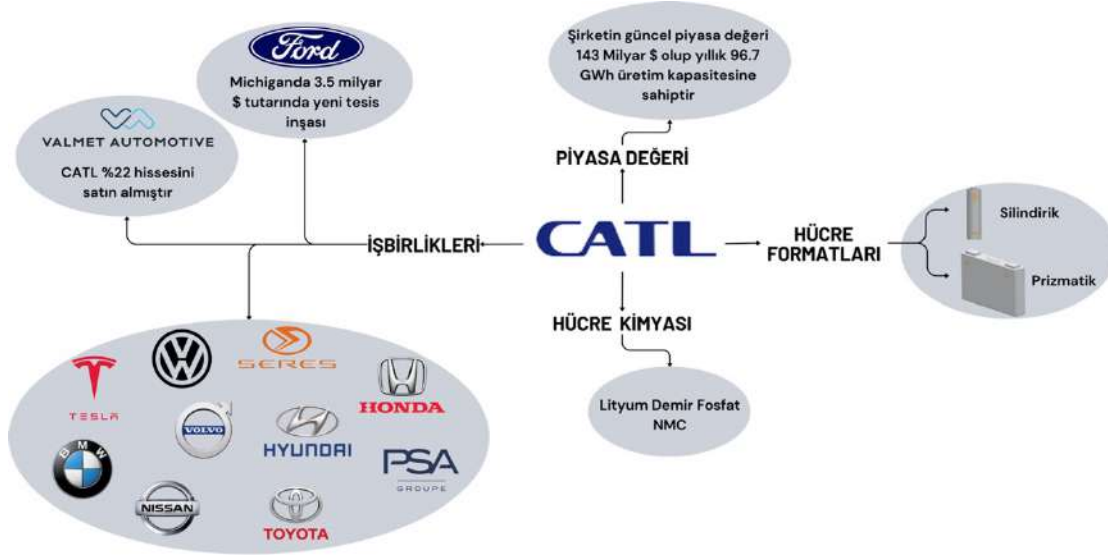
Kaynak sınırlamaları: Vergi kredisi almak için kritik mineraller, 2025'ten itibaren "Yabancı Endişe Uyandıran Entite" olarak belirlenmiş kurumlardan çıkarılmamış, işlenmemiş veya geri dönüştürülmemiş olmalıdır.

Vergi kredileri: 2023 ile 2030 arasında, ABD'de işlenmiş olan katot/anot aktif malzemeler veya kritik mineraller için %10 üretim vergi kredisi uygulanmaktadır (Renard, 2023).

8. BATARYA ÜRETİMİNE ŞİRKETLERİN YAKLAŞIMLARI

8.1. CATL

CATL firması Çin'in en büyük oyuncusu olup 2022 yılı birinci çeyrek verilerine göre global pil üretiminin %35'lik kısmını gerçekleştirmektedir. CATL Ekim 2022 itibarıyla Çin pazarında %48,33'lük pay ile lider konumdadır. Global ölçekte ve Çin'de başlıca otomotiv sektörü olmakla birlikte birçok sektörde firma ile iş ilişkisi bulunmaktadır. Şekil 39'da şirketin başlıca iş birlikleri hücre kimyası, hücre şekilleri ve piyasa değeri verilmektedir.



Şekil 39. CATL firmasının iş birlikleri hücre formatları ve piyasa değeri.

Şirketin gelecek yatırımlarına bakıldığında Amerika'da Ford ile birlikte 3,5 milyar \$ tutarında bir tesisin çalışmaların devam ettiği, Avrupa kıtasında ise Debrecen'de (Macaristan) 2025 yılında tamamlanması planlanan 100 GW-sa kapasitesinde bir fabrika ve Erfurt'da (Almanya) 2022 yılında 8 GW-sa ilk aşama kapasitesi ile faaliyete geçen sonraki fazda 24 GW-sa kapasiteye sahip olacak fabrika yatırımı bulunmaktadır (Int. Kyn. 23, 24).

8.2. BYD

Şekil 40'da şirketin başlıca iş birlikleri hücre kimyası, hücre şekilleri ve piyasa değeri verilmektedir. BYD, Çin'in global ölçekte en büyük role sahip oyuncularındandır.

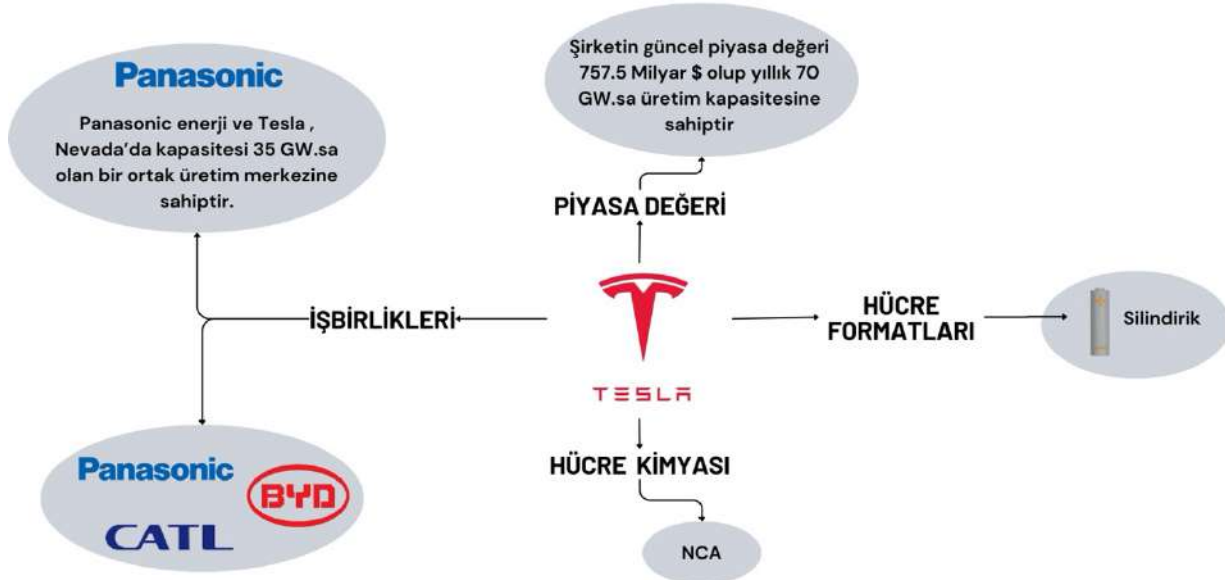


Şekil 40. BYD firmasının iş birlikleri hücre formatları ve piyasa değeri.

2022 yılında global batarya üretiminin %13,5'lik payını almıştır. BYD'nin Toyota Mercedes gibi otomotiv firmaları ile iş birlikleri bulunmaktadır. Bununla birlikte Ssang young ile Güney Kore'de ortak bir şirket kurmak yolunda adım atmıştır. Girişimleri, Çinli bir pil hücresi üreticisi ile Güney Koreli otomobil üreticisinin Güney Kore'deki ilk ortak fabrikası olacaktır (Int. Kyn. 25, 26 ve 27).

8.3. TESLA

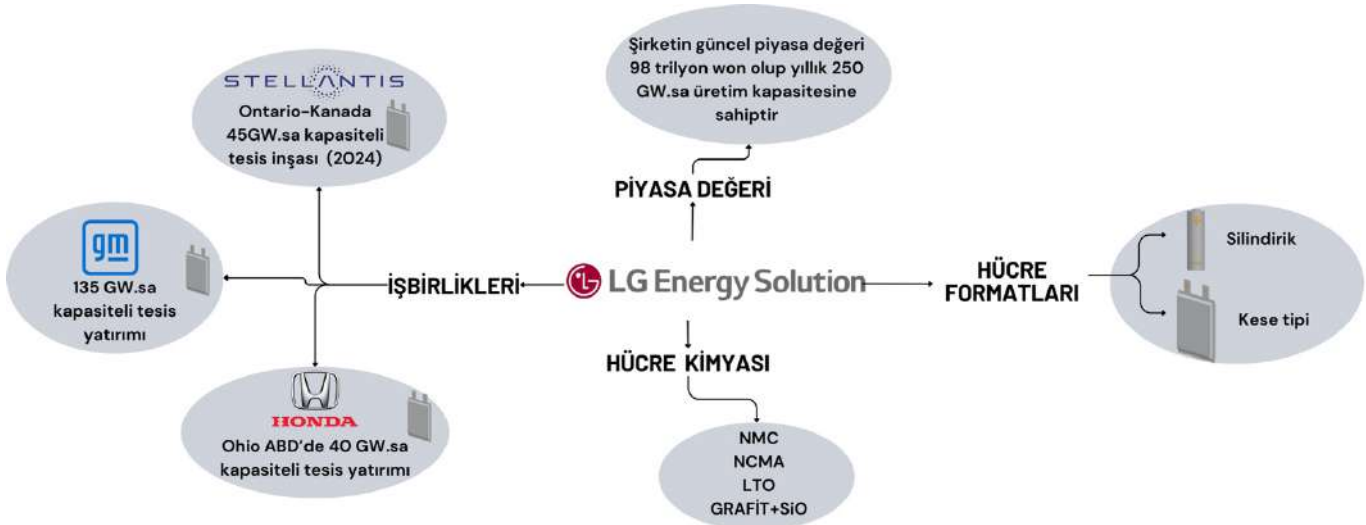
Tesla Amerika'da 70 GW-sa üretim kapasitesi ile pazarı domine etmektedir. Şirketin Nevada, Kaliforniya ve Teksas'da üretim tesisleri bulunmaktadır. Şirket 18650, 21700 ve 4680 tiplerinde silindirik pil üretimi yapmaktadır. Nevada'da bulunan tesis Panasonic enerji ile bir iş birliği olmakla birlikte Kaliforniya'da bulunan tesis ise silindirik pil pilot üretim hattı olarak görev yapmaktadır (Bknz. Şekil 41).



Şekil 41. Tesla firmasına ait iş birlikleri, ürün ve yatırım detayları.

8.4. LG ENERGY SOLUTIONS (LGES)

LGES, küresel olarak faaliyet gösteren ve özellikle planlı yatırımları ile dikkat çeken firmalardan biridir. Şirket dünya pazarında 250 GW-sa üretim kapasitesi ile büyük oyuncuların birliğiyle, Amerika kıtasında hali hazırda 5 GW-sa üretim kapasitesine sahiptir (Bknz Şekil 44).

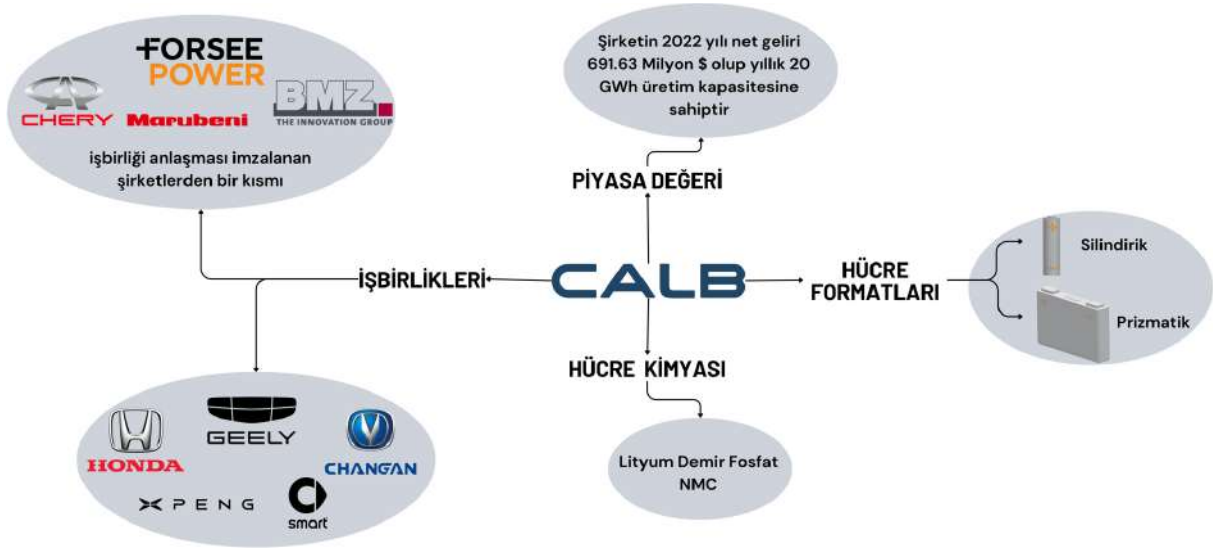


Şekil 44. LG Energy Solutions firmasına ait detaylar.

Şirketin Michigan'da NMC kapasitesini kullanan bir üretim tesisi olmakla birlikte, sonuncusu 2025 yılında bitmesi hedeflenen toplamda 245 GW-sa yatırım hedefi açıklanmıştır. Tennessee, Ohio ve Michigan'da General Motors ile planlanan yatırımların kimya olarak NCMA kimyasını ve kese tipi hücreleri kullanacağı açıklanmıştır. Ayrıca Arizona'da 21700/4680 tipi silindirik hücre üretimine 2024 yılında başlayacağını da beyan etmiştir. Şirket Michigan'da kapasite artırımına gideceğini de açıklamıştır. Şirketin hücreden modüle kadar batarya yönetim sistemlerini de içeren çözümleri mevcuttur. Şirketin 24 OEM ile 79 projesi bulunmakla birlikte şimdiye kadar çeşitli türlerden toplam 7.370.000 araçta sistemlerinin kullanıldığını beyan etmektedirler. Ayrıca şirket ticari Grafit+SiOx hücre üretimine de başlamıştır. Şirket Kuzey Amerika'da yatırımları ile dikkat çekmektedir.

8.5. CALB

Çin menşeli CALB firması 2022 yılı çeyrek verilerine göre globalde ilk 10 şirket arasına girmiştir. 17 Kasım 2022 tarihinde yaptıkları açıklama ile kapasitelerini 2025 yılına kadar 500 GW-sa'e çıkarmayı hedeflediklerini duyurmuşlardır (Int. Kyn. 28). Şekil 45'de görüleceği üzere hali hazırda CALB firmasına ait bataryaları Honda, Smart, Geely gibi şirketler araçlarında kullanılmaktadır.



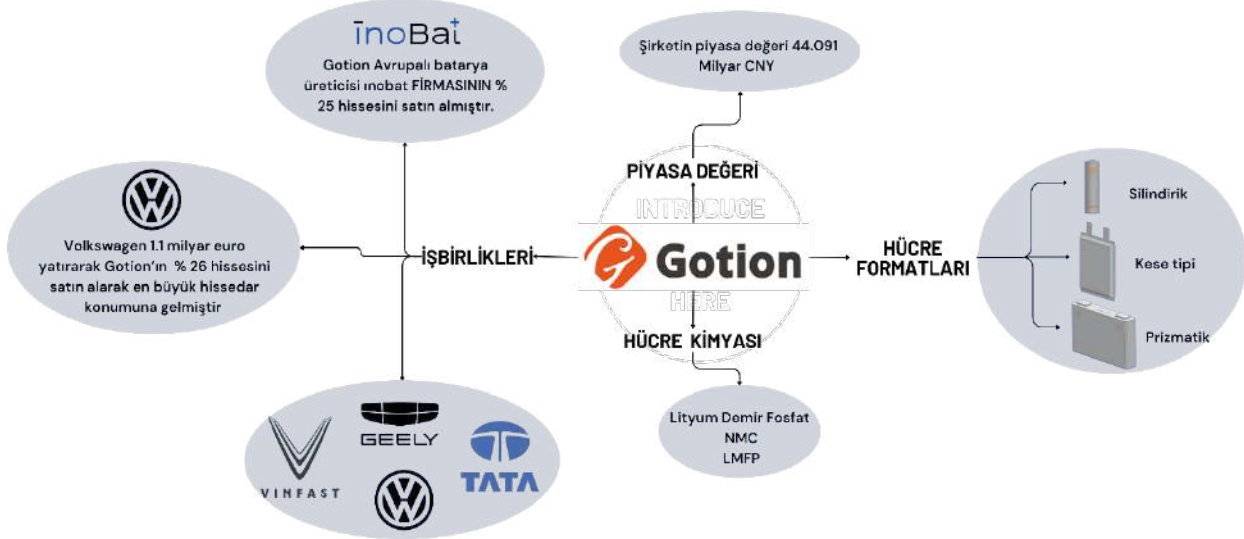
Şekil 45. CALB firmasının iş birlikleri hücre formatları ve piyasa değeri.

CALB, 2021'in başından bu yana endüstriyel genişlemesini hızlandırmıştır, halihazırda Çin'de Changzhou, Luoyang, Xiamen, Chengdu, Wuhan ve Hefei'de 7 endüstriyel yerleşkesi bulunmaktadır. Bunun yanında CALB, 2 Kasım 2022'de Portekiz hükümetiyle ülkede Avrupa endüstri üssünü başlatmak için bir mutabakat zaptı imzalamıştır; bu, CALB'nin küresel endüstriyel yayılımında önemli bir adım olmuştur. Açıklamalara göre kurulacak tesisin 2025 yılında 45 GW-sa kapasiteye ulaşması hedeflenmektedir (Int. Kyn. 29).

8.6. GOTION

Şekil 46'da Gotion firmasının başlıca iş ortakları hücre formatı, kimyası verilmiştir. Gotion global ölçekte 14,1 GW-sa kurulu gücü ile 2022 yılında ilk 10 şirket arasında yer almıştır. Gotion'ın Çin'de 10 üretim tesisi bulunmaktadır. Ayrıca Gotion, Hefei / Çin, Şanghay, Silikon Vadisi, Cleveland, Tsukuba / Japonya, Singapur, Almanya ve Hindistan'da 8 Ar-Ge merkezi inşa etmiştir.

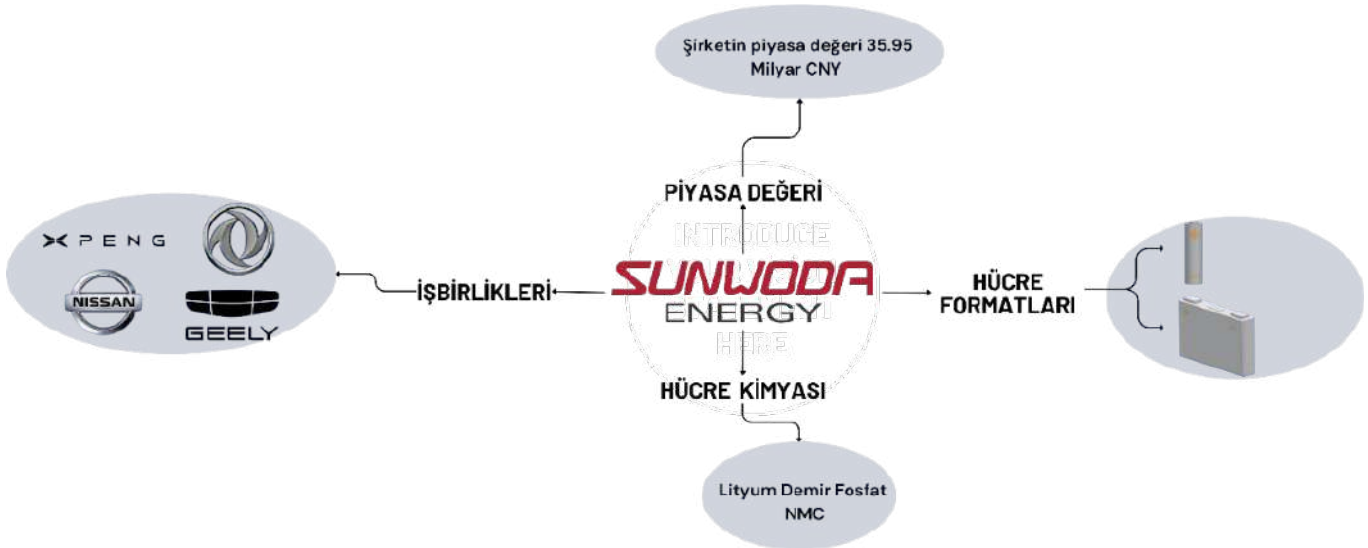
Gotion 2025 yılına kadar deniz aşırı ülkelerde 100 GW-sa kapasiteli tesis kurulumu yapmayı planlamaktadır. Bunun 40 GW. sa'i ise Avrupalı partneri Inobat firması ile yapılacak ortak girişimin bir parçası olacağı belirtilmiştir (Int. Kyn. 30). Gotion ayrıca Michigan'da 2,36 milyar \$'lık bir pil fabrikası ve Illinois'de 2 milyar \$'lık bir fabrika inşa etmektedir (Int. Kyn. 31, 32 ve 33)



Şekil 46. Gotion firmasının iş birlikleri hücre formatları ve piyasa değeri.

8.7. SUNWODA

SNE araştırma şirketinin verilerine göre 2022 yılında Sunwoda 9,2 GW-sa'lik kurulu gücüyle ilk 10 şirkete arasına girmeyi başarmıştır. Şekil 47'de şirkete ait bilgiler paylaşılmıştır.

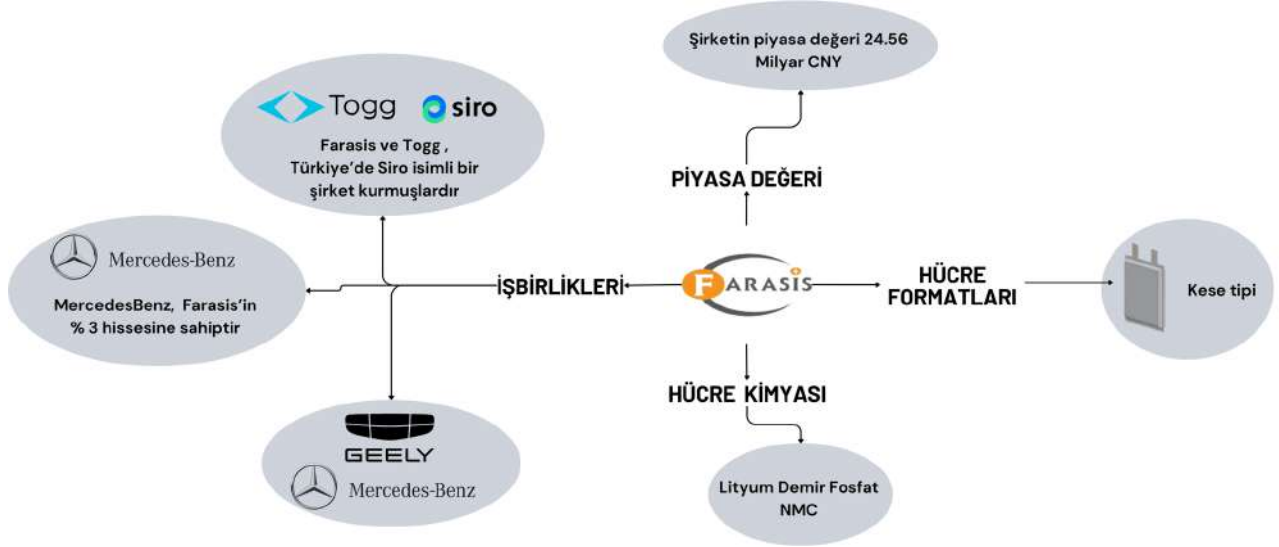


Şekil 47. Sunwoda firmasının iş birlikleri hücre formatları ve piyasa değeri.

Şirket Macaristan'da 3. Deniz aşırı tesisini inşa etmek için 1,9 milyar Yuan değerinde yatırım yapmıştır (Int. Kyn. 34, 35). Sunwoda, Çin'in Guangdong, Jiangsu, Zhejiang, Shandong, Jiangxi, Sichuan, Hubei eyaletleri ve Hindistan'ın Yeni Delhi kentinde çeşitli üretim üslerine sahiptir (Int. Kyn. 36).

8.8. FARASIS

Farasis 2022 verilerine göre 7,4 GW-sa kapasite ile global ölçekte ilk 10 şirket arasında yerini almıştır. Şekil 48'de Farasis için stratejik ortaklar ve diğer bilgiler paylaşılmaktadır. Farasis 2025 yılına kadar toplam kapasitesini 170 GW-sa'e çıkarma hedeflerini açıklamıştır (Int. Kyn. 37).

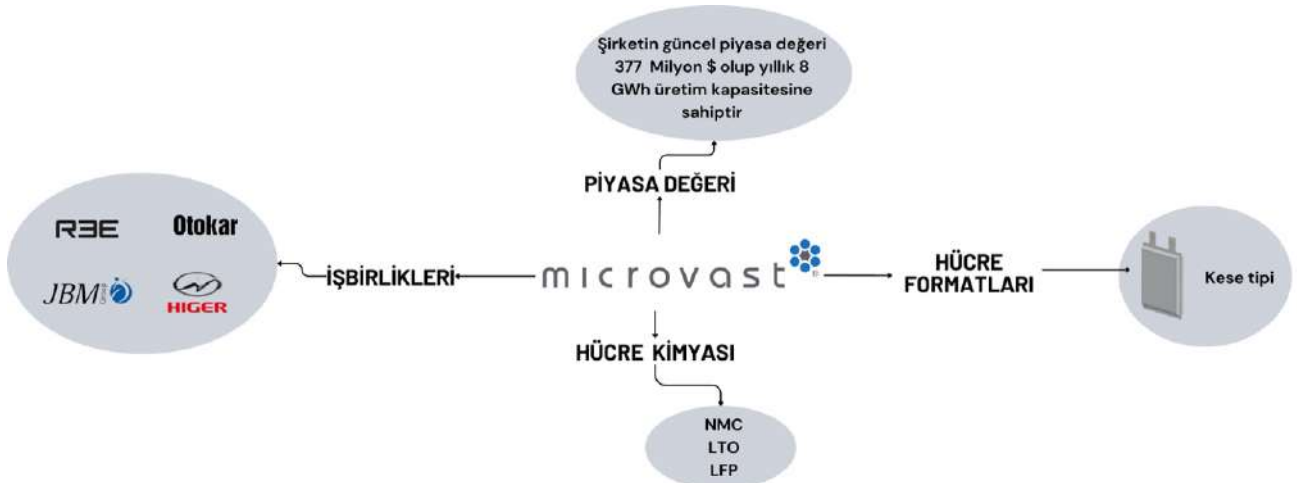


Şekil 48. Farasis firmasının iş birlikleri hücre formatları ve piyasa değeri.

Şekil 42'de görüldüğü üzere şirketin stratejik ortaklarından bazıları Geely ve Mercedes Benz dir. Bitterfeld'de Mercedes ile bir tesis kurulmasını planlamaktadırlar. Geely ve Farasis'in şu anda Ganzhou ve Zhenjiang'da toplam 21 GW-sa kapasiteli iki üretim tesisi bulunmaktadır (Int. Kyn. 38). Diğer yandan Farasis, TOGG elektrikli araçlarının bataryalarını üretmektedir ve Türkiye'de Siro enerji adında ortak bir şirket kurmuşlardır. Şirkete ait yerleşke hizmete başlamış olup kapasitenin 2031'e kadar 20 GW-sa'e ulaşması hedeflenmektedir.

8.9. MICROVAST

Microvast firması, yıllık 8 GW-sa kapasite ile Amerika'daki güçlü oyuncuların bir tanesidir. Winsdor-Colorado ve Clarksville-Tennessee'de üretim tesisi ve Orlando'da bir Ar-Ge birimi olmak üzere şirketin Amerika genelinde 5 yerleşkesi bulunmaktadır (Bknz. Şekil 49).



Şekil 49. Microvast firmasına ait, iş birlikleri ve ürün detayları.



Microvast dikey entegre bir pil üreticisi olup, katot, anot, elektrolit ve ayırıcı gibi bileşenleri de üretmektedir. Microvast, lityum titanat oksit (LTO), lityum demir fosfat (LFP), nikel manganez kobalt versiyon 1 (NMC-1) ve nikel manganez kobalt versiyon 2 (NMC-2) gibi geniş bir hücre kimyası yelpazesi sunmaktadır.

8.10. Diğerleri

Çin pazarında faaliyet gösteren diğer şirketler Tablo 9'da verilmiştir. Görüleceği gibi Çin batarya üretimi noktasında irili ufaklı pek çok şirkete ve ürün çeşitliliğine sahiptir. Tablo 10'da ise Kuzey Amerika kıtasında faaliyet göstermekte olan diğer firmalar verilmiştir.

Tablo 9. Çin'de faaliyet gösteren firmalar ve bilgileri.

Firma Adı	Hücre Kimyası	Hücre Formatı	Müşterileri ya da ortakları	Lokasyon detayları	Kaynak
Grepow	LFP, NMC	Silindirik, Prizmatik, özel şekilli batarya	Asya, Avrupa, Amerika, Avustralya, Afrika ülkelerinde ortaklıkları mevcut	Çin	(Int. Kyn. 39)
JB Battery	LFP	Silindirik, Prizmatik		Çin	(Int. Kyn. 40)
Goes Battery	LFP	Silindirik, Prizmatik		Çin	(Int. Kyn. 41)
Tenpower	NMC	Silindirik	Hello Bike, Dayi M&E Tools	Çin	(Int. Kyn. 42)
SAFD	LFP	Silindirik		Çin	(Int. Kyn. 43)
RITAR	LFP	Prizmatik	Hengyang Rich Power Co.	Vietnam, Çin	(Int. Kyn. 44)
Microvast	LFP, NMC		IVECO, CRRC, Foton, VDL, Zhongtong Bus, JBM	Çin, İngiltere, Almanya, Rusya, Hollanda, Hindistan, İsveç	(Int. Kyn. 45)
KIJO	LFP	Silindirik, Prizmatik, Özel tasarım		Çin	(Int. Kyn. 46)
SVOLT	LFP, NMC, NMX	Prizmatik, Silindirik, Kесе tipi	BASF, Lion Group, Stellantis	Çin, Almanya	(Int. Kyn. 47)
BATTSYS		Silindirik, Prizmatik	Fullriver	Çin	(Int. Kyn. 48)
TERRAE	LFP, NMC	Silindirik	BMZ Group	Çin	(Int. Kyn. 49)

Tablo 10. Kuzey Amerika kıtasında faaliyet göstermekte olan diğer firmalar.

İştirak	Adres	Ürün tipi	Ürün kodu	Hücre kimyası	Üretim kapasitesi (GW-sa)
Enerdel	Indiana, A.B.D.	Prizmatik	NA	NMC	-
Lithion Battery	Nevada, A.B.D.	Silindir tip ve 12/24V Akü	1865/2665 ve U-Charge U27	LPF	-
Electrovaya	Ontario, Kanada	Kесе tipi	infinity	NMC, Seramik ayırıcılı	-
Clarios	Michigan, A.B.D.	Prizmatik	Lithium-ion	LTO	-
Envision AESC	Tennessee, A.B.D.	-	-	-	3
iM3NY	New York, A.B.D.	Prizmatik, kесе, silindir	P-Series	LFP varyantı	1,8

-: veri yok



Tablo 11 ile gelecek dönem yatırımlarda kapasiteler ile bölgeler ve iştirakler verilmektedir. Çin'in yakaladığı üretim kapasitesini yakalama gayreti gelecek yatırımlarda onlarca kata çıkarılan üretim kapasitelerine yansımaktadır. Nitekim, planlanan kapasite halen Çin'in mevcut ve planladığı kapasitelere yaklaşmamaktadır. Gelecek yatırımların halen NMC ağırlıklı seyretmesi, Çin'in LPF kimyasına dayalı pozisyonuna göre farklı bir segmenti hedeflemektedir. Kore ve Japon firmaların ağırlıkta olduğu yatırım iştiraklerinde bazı otomotiv üreticilerinin de paydaş olarak rol aldığı dikkate değerdir. Tüm planlanan kapasitelerin 5 seneden erken devreye alınması planlanmaktadır.

Tablo 11. Kuzey Amerika kıtası gelecek yatırım planları ve detayları.

İştirak	Adres	Ürün Tipi	Hücre kimyası	Üretim Kapasitesi (GW-sa)	Üretim Yılı
[SK On / Ford JV] BlueOvalSK	Tennessee, A.B.D.	-	NMC	43	2025
[SK On / Ford JV] BlueOvalSK	Kentucky, A.B.D.	-	NMC	86	2025
SK Battery America	Georgia, A.B.D.	-	NMC	21,5	2023
Panasonic	Kansas, A.B.D.	-	NCA	---	2029
[LGES / GM JV] Ultium Cells	Tennessee, A.B.D.	Kese tip	NCMA	50	2024
[LGES / GM JV] Ultium Cells	Ohio, A.B.D.	Kese tip	NCMA	35	2023
[LGES ile GM JV] Ultium Cells	Michigan, A.B.D.	Kese tip	NCMA	50	2025
LG Energy Solutions (kapasite artırımı)	Michigan, A.B.D.	Kese tip	NMC	25	2023
LG Energy Solutions	Arizona, A.B.D.	Silindir tip	-	-	2024
[LGES / Stellantis JV] NextStar Energy	Ontario, Kanada	Kese tip	-	45	2024
[LGES / Honda JV]	Ohio, A.B.D.	Kese tip	-	40	2025
Toyota Battery Manufacturing	North Carolina, A.B.D.	-	-	-	2025
Envision AESC	Kentucky, A.B.D.	-	-	30	2025
Envision AESC	South Carolina, A.B.D.	Silindir tip	-	30	NA
[Samsung SDI / Stellantis JV]	Indiana, A.B.D.	Silindir, prizmatik	-	23	2025
Electrovaya USA	New York, A.B.D.	Hücre ve batarya	-	---	2023
Kore Power Kore Plex	Arizona, A.B.D.	Kese tip	NMC/LFP	12	2023
[Hyundai / SK On JV]	Georgia, A.B.D.	Kese tip	-	20	2026
Rivian	Georgia, A.B.D.	-	-	50	2024
[Stromvolt Americas / Delta Electronics Taiwan JV]	Quebec, Kanada	-	-	10	2030
Lion Electric	Quebec, Kanada	-	-	5	2023
Saft	Florida, A.B.D.	-	-	2	2024
Solid Power	Colorado, A.B.D.	Kese tip	NMC, Katı-hal	---	2024

-: veri yok



9. ÖNERİLER

Alt Bileşen Yerileştirme İçin Öneriler:

Li iyon pillerde kullanılan tüm alt bileşenleri ve bu alt bileşenlerin hammaddelerinin yerli olarak üreten firmaların bir araya getirilerek dışa bağımlılığın azaltılması, ülkemizin kaynaklarının korunması, değerlendirilmesi ve geliştirilmesi önem arz etmektedir. Ülkemizde pil hammaddelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yürüten birçok firma bulunmaktadır. Genel olarak bu firmaların Li iyon piller ve kullanılan ticari hammaddeleri ile ilgili bilgileri kısıtlıdır. Dolayısı ile pil hammaddesi üretmeyi planlayan firmalara ürün geliştirmeleri konusunda destek verilmesi ülkemizdeki pil üreticilerine düşmektedir. Ürün prototipleri oluşturulması ve geliştirilen hammaddelerin optimizasyonu için ise üniversitelerden, ilgili laboratuvar ve merkezlerden destek alınmalıdır. Optimizasyonu tamamlanmış ürünlerin ticari olarak kullanımının incelenmesi için ise yine pil üreticileri ile iletişim kurulmalıdır. Pil üreticisinin pilot hattında deneyebileceği en düşük miktarda ürün hammadde üreticisi tarafından üretilebiliyor olmalıdır. Bu açıdan bakıldığında, pil hammaddelerinin geliştirilmesinde Üniversite-Sanayi-Mükemmeliyet Merkezi iş birliğinin kuvvetli olmasının ülkemizdeki Li iyon pil ekosistemine büyük katkılar sunacağı öngörülmektedir.

Türkiye’de üretilmekte olan ve üretilmesi planlanan Li iyon bataryalarda yerli hücrelerin dışında metalik bileşenler, batarya yönetim sistemleri, kablolar vb. bileşenler yerli olarak tedarik edilebilmektedir. Yerli Li iyon hücrelerde ise henüz yerli bir bileşen bulunmamakla birlikte bu konudaki çalışmalar hızla devam etmektedir. Geliştirilecek ve seri üretimi yapılacak hücre bileşenlerinin yurtiçi satış miktarı düşük olsa bile bu ürünlerin yüksek ihracat potansiyeli bulunduğu göz önüne alınmalıdır.

Türkiye’de batarya paketi ve hücre üretimi yapan firmaların ithal ettiği birçok hammadde stratejik olsa da bunlardan bazıları yerli firmalarımızı zora sokacak hammaddelerdir. Batarya paketi tarafında entegreler; hücre tarafında ise küresel grafit, yüksek kalitedeki katot aktif malzemeleri stratejik öneme sahip ham maddelerdir. Bu hammaddelerin yerli olarak geliştirilmesi için nasıl yapılır bilgisinin edinilmesi ve ithal edilemediğinde yerli üreticilerin ihtiyacını karşılayacak miktarda üretimi için tesisler kurulması gerekmektedir.

Batarya Yol Haritası İçin Politika Önerileri:

Dünyada olgunlaşmış olup büyük oyuncularını bulunan batarya sektörünün ülkemizde de girişimleri bulunmaktadır. Fakat bu girişimleri doğru yönlendirip global ölçekte markette pay elde edebilmek için uygulanacak stratejilerin ve politikaların rolü büyüktür. Bu stratejiler belirlenirken dikkate alınması gereken bazı hususlar şu şekildedir;

- İnovasyon ve yaygınlaştırmayı hızlandırmak için mali politikalar ve teşvikler uygulanması,
- Elektrikli araçların kullanımını teşvik edip yaygınlaştırmak için ÖTV/KDV/karbon vergisi gibi farklı teşvik politika stratejilerinin izlenmesi,
- Bataryaların kullanılacağı farklı marketlerin oluşturulması ve teşviklerle desteklenmesi,
- Farklı ülkelerle ve birliklerle Ar-Ge, standart ve sertifikasyon, tedarik zinciri gibi konularda iş birliklerinin yapılması,
- Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji sistemlerinin payının artırılması ve batarya sistemlerinin entegrasyonu için gerekli olan altyapının desteklenmesi,
- Şebeke istasyon ağlarının artırılması ve bu konuda yatırımların teşvik kapsamına alınması,
- Çeşitli burs ve desteklerle batarya konusunun öncelikli alanlar kapsamında desteklenip yetişmiş insan kaynağını artırılması,
- Yerli ve milli hammadde üretiminin ve batarya ara ürünlerinin üretiminin desteklenmesi,
- Bataryaların ikincil kullanımının ve geri dönüşümlerinin teşvik edilmesi.



KAYNAKLAR

- APC – Advanced Propulsion Centre UK, 2023. Automotive battery value chains
- Ciez R., Whitacre J., 2017, “Comparison between cylindrical and prismatic lithium-ion cell costs using a process based cost model”, ScienceDirect, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.11.054>, 2017.
- Ding, Y.; Cano, Z. P.; Yu, A.; Lu, J.; Chen, Z. (2019): Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. In: Electrochemical Energy Reviews, 2 (1), pp. 1–28.
- Dominko R., Gaberscek M., Drofenik J., Bele M., Pejovnik S., and Jamnik J., 2003, The role of carbon black distribution in cathodes for Li ion batteries, Journal of Power Sources, 770–773
- Harper G., Sommerville R., Kendrick E., Driscoll L., Slater P., Stolkin R., Walton A., Christensen P., Heidrich O., Lambert S., Abbott A., Ryder K., Gaines L., Anderson P., 2019, Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles, Vol 575, 75-86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>
- Heimes H.H., Kampker A., Wessel S., Kehler M., Michaelis S., Rahimzei E., 2018, Battery Module and Pack Assembly Process, VDMA – RWTH Aachen Üniversitesi, ISBN: 978-3-947920-05-1
- Hensley, R., Laczowski, K., Möller, T., Schwedhelm, D., 2022. Can the automotive industry scale fast enough?, McKinsey Quarterly.
- Johannisson A., Outlook of EV battery pack design trends: Assessment of trend impact from a recycling perspective, Lisans tezi, 2023. KTH Royal Institute of Technology, School of Industrial Engineering and Management (ITM), Stockholm, Sweden.
- Lain M.J.; Brandon J.; Kendrick E., (2019): Design Strategies for High Power vs. High Energy Lithium Ion Cells. In: Batteries, 5 (4), p. 64. <https://doi.org/10.3390/batteries5040064>
- Mei, W.; Chen, H.; Sun, J.; Wang, Q. (2019): The effect of electrode design parameters on battery performance and optimization of electrode thickness based on the electrochemical–thermal coupling model. In: Sustainable Energy & Fuels, 3 (1), pp. 148–165.
- Park J.P., Chung G.C., Jeong W.S., Ko Y.H., EU patent: EP3,540,840-B1, 2022, Pouch type secondary battery having structure for changing bi-directional cell into unidirectional cell.
- Rauscher S., 2014. Dissertation: Einfluss von Material- und Beschichtungsparametern auf die Elektrodenmorphologie und die Leistungsparameter von Lithiumionen-Zellen. Universität Ulm.
- Renard F., 2023. The rechargeable battery market and main trends 2022-2030, Avicenna Energy, 20.
- Schlick T., Hertel G., Hagemann B., Maiser E., Kramer M., 2021. E-Mobility – a promising field for the future, Roland Berger Study, 16.
- Zhang, J., Zuo, D., Pei, X., Mu, C., Chen, K., Chen, Q., Hou, G., Tang, Y., 2022, Effects of Electrolytic Copper Foil Roughness on Lithium-Ion Battery Performance. Metals, 12, 2110

İnternet Kaynakları

- [1] <https://www.goit.com.br/power-battery-vs-energy-battery-k.html>
- [2] <https://digitalassets.tesla.com/tesla-contents/image/upload/IR/2020-battery-day-presentation-deck>
- [3] <https://www.batterydesign.net/vda-prismatic-cells/>, <https://gwl-power.tumblr.com/post/134188905726/what-is-vda-size-cell-vda-stands-for-verband-der>
- [4] <https://www.dnkpower.com/what-is-blade-battery/>
- [5] <https://www.xerotech.com/news/pros-cons-of-battery-cell-types/>
- [6] <https://www.electronicdesign.com/technologies/power/article/21806525/whats-the-better-battery-for-your-portablesli-ion-or-li-poly>
- [7] <https://www.linkedin.com/pulse/best-way-cool-4680-cylindrical-battery-link-sun/>
- [8] <https://www.batterydesign.net/cell-to-body/>
- [9] <https://www.electrive.com/2022/04/26/leapmotor-to-install-batteries-directly-in-chassis/>
- [10] <https://skinnonews.com/global/archives/12306>
- [11] <https://www.samsungsdi.com/sdi-news/3522.html?idx=3522#:~:text=Another%20eye%2Dcatching%20concept%20is,density%20and%20remarkable%20cost%20reduction.>
- [12] <https://schulergroup.wordpress.com/2015/04/23/test-mit-bild/>



- [13] <http://www.manufacturing-journal.net/press-release/3810-producing-prismatic-cell-cases-and-lids-efficiently>
- [14] <https://www.mseshop.com/products/25-pcs-of-4680-cylinder-cell-case-with-anti-explosive-cap?variant=40060814491706>
- [15] <https://www.schott.com/en-hr/products/battery-and-capacitor-lids-p1000270>
- [16] <https://www.iea.org/reports/global-supply-chains-of-ev-batteries> (15.10.2023)
- [17] https://www.sneresearch.com/en/insight/release_view/238/page/0?s_cat=|&s_keyword=#ac_id (31.03.2024)
- [18] <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/lithium-ion-battery-manufacturing-capacity-2022-2030>, IEA. Licence: CC BY 4.0,
- [19] <https://www.volta.foundation/annual-battery-report>
- [20] <https://www.silanano.com/insights/futureofenergystorage> (15.10.2023)
- [21] <https://www.iea.org/reports/global-supply-chains-of-ev-batteries> (15.10.2023)
- [22] <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/power-spike-how-battery-makers-can-respond-to-surg-ing-demand-from-evs> (20.10.2023)
- [23] <https://www.catl.com/en/news/983.html> (25.09.2023)
- [24] <https://www.catl.com/en/news/921.html> (28.09.2023)
- [25] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/byd-kg-mobility-talks-battery-joint-venture-south-korea-source-2023-08-23/> (24.09.2023)
- [26] <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/30565932.html>(29.09.2023)
- [27] <https://en.byd.com/page/5/?s=blade+battery>(26.09.2023)
- [28] <https://www.changzhou.gov.cn/nsnews/165163780452770-> (24.09.2023)
- [29] <https://batteriesnews.com/chinas-battery-maker-calb-build-europe-industry-base-portugal/>(29.09.2023)
- [30] <https://www.inobat.eu/newsroom/inobat-and-gotion-sign-mou-to-develop-joint-venture-ev-battery-cells-and-packs-in-cee/>(23.09.2023)
- [31] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/gotion-inobat-build-20-gwh-battery-plant-europe-by-2026-2023-09-18/>(23.09.2023)
- [32] <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/volkswagen-group-and-gotion-high-tech-team-up-to-industrialize-battery-cell-production-in-germany-7316>(28.09.2023)
- [33] <https://www.inobat.eu/newsroom/gotion-high-tech-acquires-a-25-stake-in-inobat-a-european-battery-company/> (29.09.2023)
- [34] <https://en.sunwoda.com/article/575/9.html>(28.09.2023)
- [35] <https://en.sunwoda.com/upload/portal/20230426/e06ff4170d29545bc3159fd6497408db.pdf>(29.09.2023)
- [36] <https://en.sunwoda.com/about.html> (29.09.2023)
- [37] <https://www.farasis-energy.com/en/start-of-production/>(22.09.2023)
- [38] <https://www.farasis-energy.com/en/farasis-plans-30-gwh-cell-factory-in-ganzhou/> (29.09.2023)
- [39] <https://www.grepow.com> (29.09.2023)
- [40] <https://www.jbbatterychina.com/> (29.09.2023)
- [41] <https://www.goesbattery.com> (29.09.2023)
- [42] <https://www.tenpowercell.com/> (22.09.2023)
- [43] <https://www.safdbattery.com> (23.09.2023)
- [44] <https://www.ritarpower.com> (22.09.2023)
- [45] <https://microvast.com> (22.09.2023)
- [46] <https://www.kijo-battery.com> (22.09.2023)
- [47] <https://www.svolt.cn/> (23.09.2023)
- [48] <https://www.battsys.com/battery-finder> (24.09.2023)
- [49] <https://terrae.com/> (21.09.2023)



HÜCREDEN PAKETE: BATARYA ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

S. Altın¹, F. Şahin², K. C. Bayar³ [+]

ÖZET

Otomotiv sektörünün genel olarak elektrikli araçlara yönelmesiyle birlikte özellikle Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da bataryaya olan talep artmakta ve Asya'daki mevcut pazara ek olarak bu bölgelerde yeni batarya üretim fabrikaları kurulmaktadır. Elektrikli araç üretiminde sürdürülebilirliği sağlamak ancak doğru hücre, modül ve batarya paketi tasarlamak, bu tasarımlar için doğru malzeme ve proses seçimleri yapmak ve tüm süreçleri yüksek performans ve düşük emisyon hedefleyerek optimize etmekten geçmektedir. Dünyadaki batarya üretim tesisleri incelendiğinde kW-sa başına Çin 530 g-CO₂, Avrupa 200 g-CO₂ ve Amerika Birleşik Devletleri 370 g-CO₂ üretmektedir. Son yıllarda Asya kıtasındaki batarya üreticileri, üretim esnasında oluşan emisyonları azaltmak amacıyla yenilenebilir enerji kullanımının bu tesislere entegre edildiği birçok yatırım yapmaktadırlar. Buna ek olarak, Asya üreticileri yıllara dayanan üretim tecrübeleri ile gerçekleştirdikleri iyileştirmeler ve daha uzun çalışma süreleri nedeniyle Avrupalı ve Kuzey Amerikalı rakiplerine göre üretilen bataryalarda daha yüksek çevrim sürelerine, daha düşük hurda oranlarına ve daha iyi OEE (Overall Equipment Effectiveness) sağlayan üretim tesislerine sahiptirler.

Bununla birlikte Avrupalı ve Kuzey Amerikalı batarya üreticileri uzun süreli kurutma prosesini azaltmak ve işlem hızını arttırmak için lazerle kurutma prosesi gibi yeni yenilikçi ürün ve süreç teknolojilerini endüstriyel sistemlerine entegre etmektedirler. Yeni üretim teknolojilerinin geliştirilmesi, verimli, uygun maliyetli ve kaliteli batarya üretimi için önemli bir ön koşuldur.

Avrupa'daki batarya üreticilerinin pazardaki rekabette yer almak için uyguladıkları strateji, sürdürülebilirlik olup satış argümanlarında (USP; unique selling point) sürdürülebilirliği sera gazı emisyonları ile ilişkilendirerek ön plana çıkarmaktadırlar. Ancak, Avrupa'nın mevcut şebekelerindeki enerji karışımı, sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleşmesinin önünde büyük bir engeldir. Sürdürülebilirlik sera gazı emisyonları ile ilişkilendirildiğinde üretimde ortaya çıkan emisyon düşürme stratejilerinden bir diğeri de dev fabrikalardır.

Avrupa ve Kuzey Amerika'daki tesisler, bataryalara yönelik artan talebi karşılamak ve küresel rekabette sürdürülebilirliği sağlamak için yeni teknolojilerin ve yenilenebilir enerji kaynakların adapte edildiği (örneğin; Dijitalleşme ve 'Endüstri 4.0) verimli (daha az hurda, yüksek OEE) üretim süreçleri tasarlamak ve yönetmek zorundadırlar.

Makine ve ekipman maliyetlerinin düşürülmesi, uygun maliyetli çözümler arayan batarya üreticilerinin ilgisini çekmektedir. Avrupa'daki dev fabrikaların Çin'de üretilen makine ve ekipmanlar ile donatılması, kapasiteleri artırmak için ucuz çözümlere duyulan ihtiyacın sonucudur. Bu aynı zamanda Avrupalı anahtar teslimi çözüm sağlayıcılarının azlığı ile de bağlantılıdır. Makine ve ekipman pazarında Avrupa'da var olan bu fırsat ülkemizde varolan tecrübe ve yetkinlik kullanılarak yakalanabilir. Batarya üretim makine ve ekipmanlarının çoğu kimya, matbaa ve tekstil sektörlerinde de kullanılan kaplama, baskı ve kurutma proseslerindeki makine ve ekipmanlara benzer olup robot ve otomasyona dayalı seri üretim teknikleri içermektedir. Bugüne kadar talep gelmediği için gelişemeyen bu makine ekipman teknolojisi desteklendiğinde kolaylıkla Türkiye'de yeni üretici ve teknoloji geliştirici firmaların oluşması sağlanabilir.

[+] can.bayar@everinovasyon.com.tr

1 İnönü Üniversitesi, Fizik Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye

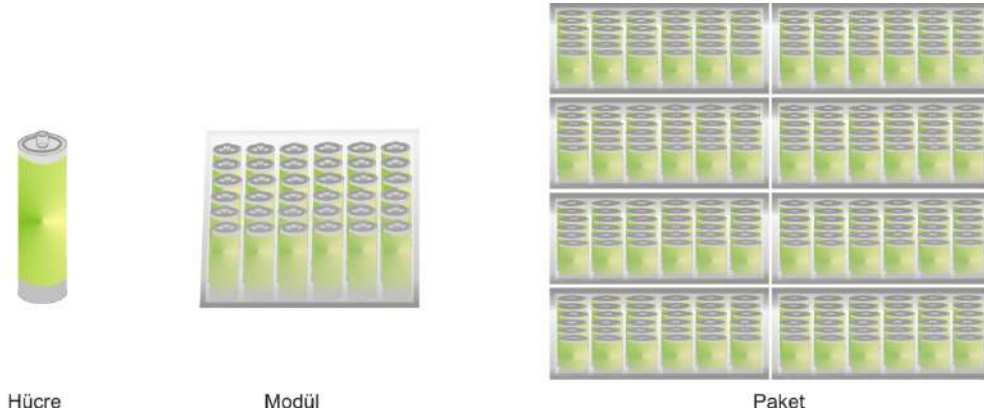
2 Altınay Elektromobilité ve Enerji Teknolojileri A.Ş., 41420 Kocaeli, Türkiye.

3 EVER İnovasyon ve Teknoloji AŞ, Sarıyer 34450, İstanbul, Türkiye

Çinli batarya üreticileri sermaye harcamalarında (CapEx) önemli bir avantaja sahip olduğu bilindiğinden Avrupa ve Kuzey Amerika'daki politikacılar batarya sektöründeki rekabette yer almak adına oyun alanını eşitleyecek tedbirleri gündemlerine almışlardır. Bu çerçevede Kuzey Amerika'dan ithal edilen hücrelere uygulanan %25'lik vergi tarifesine benzer tarifelere yönelik politikalar oluşturulmaktadır. Yerel üretimi teşvik etmek ve uluslararası rekabet edebilirliği sağlamak arasında doğru dengeyi kurmak hassas ve önemli bir iştir. Avrupa Birliği'nde, batarya üretimi ve sürdürülebilirliğe yönelik ortak bir yaklaşım sağlamak için üye ülkeler arasında işbirliği teşvik edilmektedir. Yerli batarya üretimini korumanın yanı sıra yerel Orijinal Ekipman Üreticileri'nin (OEM'ler) rekabetten mahrum bırakılmaması gereklidir. Bu hızlı ve dinamik rekabetçi ortamda sürdürülebilir batarya endüstrisinin gelişimine destek için Avrupalı politikacılar koordineli stratejik planlarla sermaye harcamaları açığının azaltılmasına yardımcı olacak aksiyonlar almaktadırlar. Ülkemizin, hücre, modül ve batarya paketi pazarında yer alabilmesi ve rekabetçi olabilmesi için etkin stratejilerle oluşturulmuş uzun süreli planlarla kolektif aklın etkin kullanımı zorunlu kılınarak tüm süreçlerde oluşmuş entelektüel sermayenin teknolojiye dönüşümü sağlanmalıdır.

1. HÜCRE, MODÜL ve BATARYA PAKET ÜRETİMİ

Li iyon batarya paketi üretim zincirinin ilk ticari çıktısı pil hücreleridir. Hücreden, modül ve paket tasarımına giden faaliyetlerde katma değer artmakla birlikte, hücre üretici firmalar genelde modül ve batarya paket üretim faaliyetlerinde yer almazlar. Şekil 1 ve 2'de hücre, modül ve batarya paket tasarımlarına şematik örnekler verilmiştir. Hücre üretiminde genel olarak üç farklı geometri standart olarak kullanılmaktadır. Bu durum kullanılacak cihaz seçimine en uygun geometri eşleştirilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Batarya paketleri ihtiyaç duyulan akım, voltaj ve kapasite değerleri göz önüne alınarak modüller aracılığı ile oluşturulmaktadır.



Şekil 1. Hücre, modül ve batarya paket tasarımlarının şematik gösterimi.

	Hücre	Modül	Paket
Silindirik Hücre			
Prizmatik Hücre			
Kese Tipi Hücre			

Şekil 2. Hücre, modül ve batarya paketlerinin farklı geometrik tasarımlarına ait şematik gösterimi.

1.1. Lityum iyon hücre üretim süreci

Her ne kadar Li iyon hücre üretim süreci değer zinciri boyunca incelendiğinde hammadde (katot ve anot aktif malzemelerin, elektrolit, bağlayıcı, solvent ve seperatör) ve yardımcı malzemeleri (alüminyum folyo, bakır folyo, çelik ve alüminyum kılıf vb) içerse de genel olarak Li iyon hücre üreticilerinde hammadde ve yardımcı malzemelerin tedarik edilip hücre üretiminin gerçekleşmesi ve test edilmesine kadar devam eden süreci kapsamaktadır.

Li iyon hücre üretim proseslerinin alt süreçleri, elektrot üretimi, hücre montajı ve hücre sonlandırma işlemlerinden oluşmaktadır. Li iyon üretim sürecinde unutulmaması gerekli bir husus lityumun oksijene ve neme olan yüksek afinitesi sebebiyle bütün üretimin kuru odada gerçekleştirilmesi zorunluluğudur. Hangi geometri olursa olsun Li iyon hücre üretiminin olmazsa olmaz ekipmanı kuru ve temiz odalardır.

Kuru oda, ortam sıcaklığı, nem ve partikül miktarı belirli standartlarda olan özel kapalı alanlardır. Hücre üretimi esnasında ortaya çıkabilecek veya ortamda bulunması muhtemel partiküller batarya hücreleri için tehlikedir. Özellikle metalik partiküller kısa devre oluşumuna sebep olurken metalik olmayanlar da hücre direncinin artmasına sebep olabilir. İstenmeyen metalik partiküllere bağlı kısa devre oluşması durumunda elektrolitin ve hücredeki lityumun alev alması söz konusu olabilir. Bu durumda oluşan reaksiyon sonucu gaz çıkışı ve sıcaklık artışı hücre basıncını arttırarak, şişmelere, sızıntılara ve sonunda yangın ve patlamalara sebep olabilir.

Pilot ve seri üretimlerde kuru oda ihtiyacı bir zorunluluk iken Ar-Ge çalışmalarında laboratuvar seviyesindeki üretimlerde kontrollü atmosfer (nem ve oksijen içermeyen) yani hücrelerin üretimi eldivenli kabinlerde (Glove Box) yapılır. Tablo 1’de kuru oda için gerekli sınır koşulları standartlara bağlı olarak verilmiştir.

Tablo 1. Temiz ve kuru oda sınıflandırmaları ve standartlara göre belirlenmiş sınır koşulları (Heimes vd. 2023).

	Temiz Oda	Kuru Oda (°C) (Yoğuşma Noktası)	Sıcaklık (°C)
Malzeme Hazırlık	ISO 8	-	
Kaplama	ISO 7	5°C -5°C	
Kurutma	ISO 7	-	
Sıkıştırma	ISO 7-8	-	
Dilme	ISO 7-8	-	20°C 24°C
Vakumda Kurutma	ISO 7-8	0°C -30°C	
Ayırma	ISO 7 veya daha iyi	-25 °C -35 °C	
İstifleme/Sarma	ISO 7 veya daha iyi	-40°C -50°C	
Paketleme	ISO 7 veya daha iyi	-40°C 50 °C	
Elektrolit Doldurma	ISO 7 veya daha iyi	-50°C -80°C	
Formasyon (Koşullandırma)	-	-	19°C 25°C
Gaz Alma	-	-	19°C 25°C
Yaşlandırma	Yüksek	-	30°C 50°C
	Düşük	-	20°C 24°C
Yaşam Sonu Testi (EoT)	-	-	20°C 24°C

Kuru odalar hava değişim hızı (HDH) olarak ifade edilen saat başına ortalama hava değişimi miktarı ve nem içeriğine bağlı olarak sınıflandırılırlar. HDH değeri ne kadar yüksek olursa oda o kadar temiz olur. ISO 7 sınıf bir kuru odada HDH oranı 30-60 defa iken ISO 8 sınıf için ise bu değişim 10-25 defadır.

Genel olarak hücre üretimi esnasında sıcaklık 22 ± 2 °C olmalıdır. Hücrede kullanılan anot ve katot aktif malzemelerin ve elektrolitin kimyasına bağlı olarak yoğuşma noktaları farklı aşamalarda -40°C ile -80°C arasında değişebilir. Nem seviyeleri son derece düşük değerlerde, genellikle %1 bağıl nemin altında tutulur ki bunun için yüksek verimli nem gidericilere ihtiyaç vardır. Bu durum üretim maliyetlerini artıran bir etkidir ve bu cihazlardaki ısı pompalarının enerji ihtiyacının üretim tesisindeki atık ısının geri kazanımı ile yapılması maliyetleri düşürür.

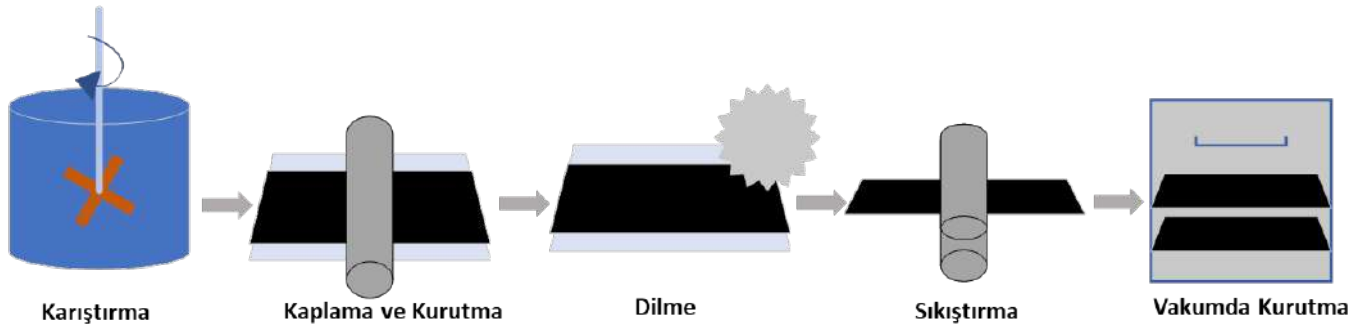
ISO 7 sınıf bir oda, metre küp başına maksimum 352.000 ($\geq 0,5$ µm) parçacık sayısına sahip olması beklenir ve hava temizliği seviyelerini korumak için HEPA filtreleme sistemlerini kullanılır. Filtreleme sistemleri toplam sistem üzerinde

%15-25 oranında filtre kapsama alanı sağlamalı ve standart hava akış hızı metrekare başına 15,3-10,2 m³·sa⁻¹ olmalıdır (Heimes vd. 2023).

ISO 8 sınıf odalar, modüler veya yumuşak duvarlıdır ve oda içerisinde metreküp başına ISO 7 sınıf odalarda olduğu gibi maksimum 3.520.000 (≥0,5 µm) parçacık sayısına sahip olmalıdır. Alanın %4-5'i üzerinde HEPA filtreleme kapsamına sahip olmaları ve metrekare başına 6,8-13,6 m³·sa⁻¹ hava akış hızlarını sağlamaları gerekmektedir (Heimes vd. 2023). Temiz ve Kuru oda standartları hakkındaki daha detaylı bilgiler uluslararası standart olarak yayınlanan ISO-14644 Temiz Oda Standardı incelenerek elde edilebilir.

1.1.1. Elektrot Üretimi

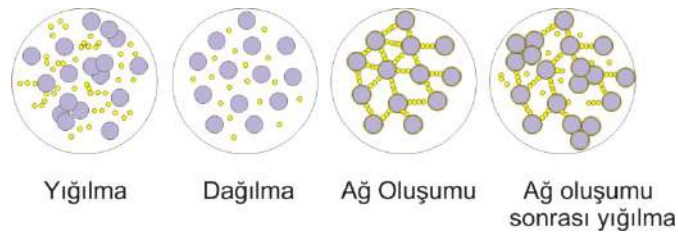
Elektrot üretimi, anot veya katot aktif malzemelerin, bağlayıcı, viskozite ayarlayan solvent ve iletken toz katkılardan oluşan karışımların anot ve katot elektrotlar için ayrı ayrı hazırlanıp karıştırılması sonucu homojen bir çamur (bulamaç) eldesi ile başlar. Anot çamuru bakır (Cu) folyo, katot çamuru alüminyum (Al) folyo üzerine kaplanır ve kurutulur. Sonrasında oluşan anot veya katot elektrot değişik geometrilere hücre boyutlarına göre dilimlenir, haddelenir/sıkıştırılır, vakum altında kurutulur rulo halinde depolanır (Bknz Şekil 3).



Şekil 3. Elektrot üretim süreci adımları

Karıştırma işlemi katot ve anot malzemeleri için ayrı ayrı yapılır. Bu işlem adımının hedefi, çamurda istenilen homojenlik ve viskozitenin elde edilmesidir. Karıştırma sürecinde hammaddelerin özellikleri, karışım formülasyonu, karıştırma proses parametreleri (süre ve dönüş hızı) ve karıştırıcı tasarımı sürecin geliştirilmesi ve ürün performansı açısından çok önemlidir.

Karıştırma süreci kuru ve ıslak olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle katı girdiler karıştırılır sonra karışımın çamur haline gelmesinde etkili bağlayıcı ve çözücüler karışıma ilave edilir. Bazı durumlarda bağlayıcı ve çözücü ayrı bir yerde karıştırıldıktan sonra da çamura ilave edilebilir. Bu işlemin temel amacı karışım sonrası istenilen ağ oluşumunun homojen olarak sağlanmasıdır (Şekil 4).



Şekil 4. Karıştırma sürecinde çamurda ağ yapısının oluşum süreci.

Karıştırma süreci, hücre imalatındaki en önemli süreç olarak kabul edilir ve kaliteyi etkileyen temel parametreler; karışım viskozitesi, yoğunluğu, katı içeriği, karıştırma sırası, hava kalitesi, nem ve karıştırma şeklidir. Bu adım nihai hücre kalitesinin >%30'unu doğrudan etkiler. Nispeten düşük maliyetli bir süreçtir ancak çok fazla zaman gerektirir, bu da üretim süreci ve ürün maliyeti açısından önemlidir.

Anot çamuru üretiminde çözücü olarak su kullanımı yaygınken katot üretiminde NMP (N-Metil-2-Pirrolidon) kullanılmaktadır. Burada belirtmek gerekir ki katot malzemeleri neme duyarlı olduğu için su bazlı çamur üretim teknikleri yerine NMP gibi organik çözücüler tercih edilmektedir. Bununla birlikte NMP'nin toksik olması, suyun kaynama noktasının (100 °C) NMP'nin buharlaşma noktasından (203 °C) düşük olması ve maliyeti düşünüldüğünde (su 0,02 \$·l⁻¹ ve NMP 1-3 \$·l⁻¹) çözücü olarak su kullanımının ticari olarak tercih edilir olması su bazlı elektrot üretimi konusunda yapılan çalışmaların önünü açmaktadır. Karıştırma prosesinin süreye bağlı olarak aşamaları Şekil 5'de

verilmiştir. Proses bir çok farklı adımdan oluşmakta ve her aşamasının kontrollü bir şekilde yapılması gerekmektedir. Özellikle kaplama prosesi öncesi çamurun viskozitesinin optimizasyonu her elektrot malzemesi için yapılmalı ve optimum değerlerin belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 5. Karıştırma sürecinin detaylı ve süreli aşamalarının şematik gösterimi.

Karıştırıcı tanklar genellikle paslanmaz çelik malzemelerden ve farklı hacimlerde üretilmektedirler (Bknz Şekil 6.a-c). Tank tasarım parametreleri tank geometrisi, tank dozaj girişlerinin geometrisi, bıçak geometrileri ve sayıları yanı sıra proses parametreleri örneğin; karıştırma sıcaklığı, süresi ve dozajlama sırası ve dozajlama debisi elektrot çamurunun özelliklerine etki eder. Ticari olarak kullanılan karıştırıcı ve depolama sistemlerinin bir arada bulunduğu farklı entegre sistemler Şekil 6.d'de verilmiştir. Batarya üretecek tesisin büyüklüğü karıştırıcı sistemin dizaynını direk olarak etkilemektedir.



Laboratuvar tipi Karıştırıcı
Etkin hacim 18 litre

(a)



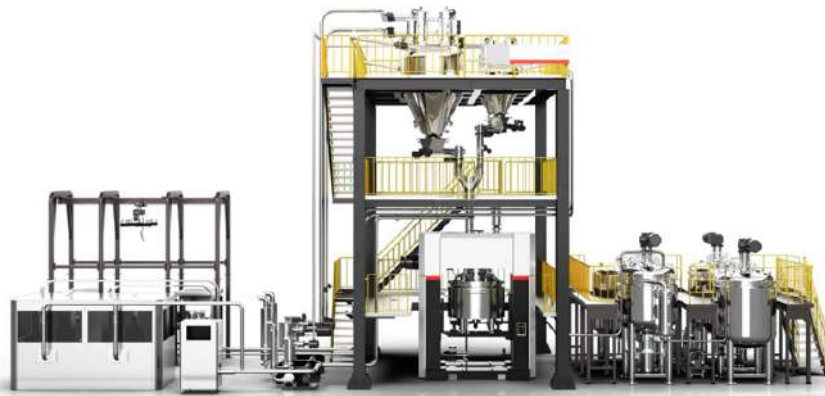
Küçük/Orta ölçekli Test tipi Karıştırıcı
Etkin hacim 100 litre

(b)



Seri Üretim tipi Karıştırıcı
Etkin hacim 300 - 1.500 litre

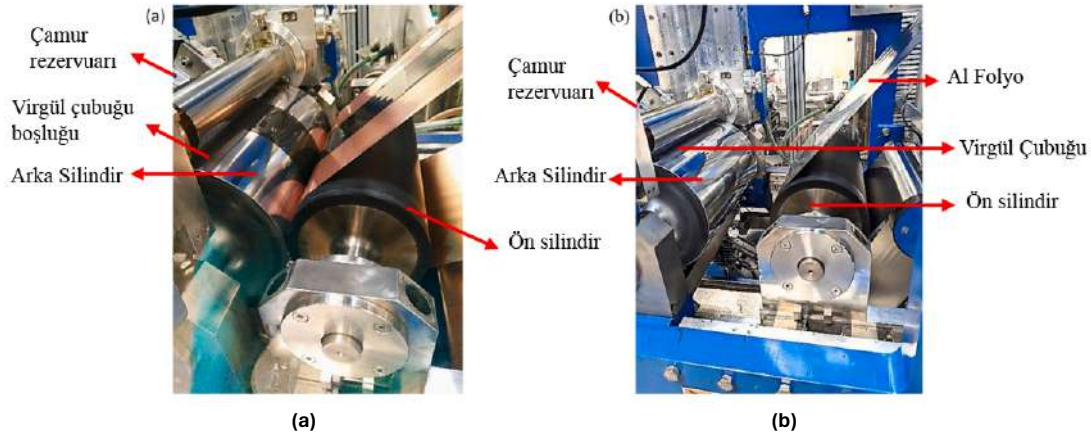
(c)



(d)

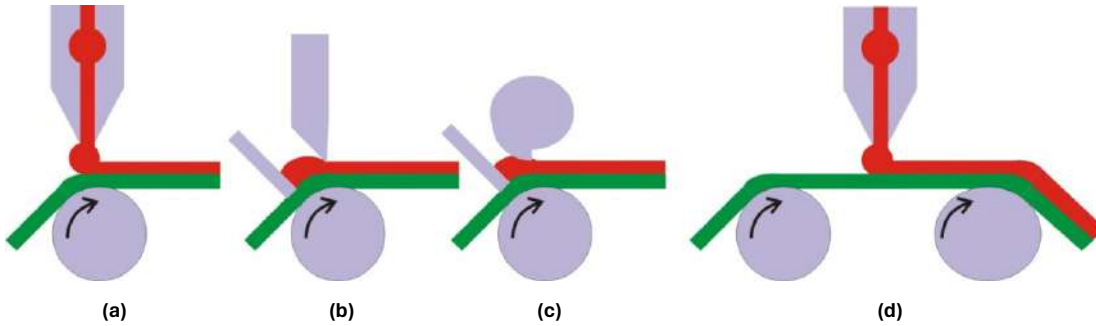
Şekil 6. Değişik hacimlerde karıştırma odası; (a) laboratuvar tipi, (b) küçük/orta ölçekli, (c) seri üretim tipi karıştırıcılar ve (d) komple karıştırıcı ve depolama sistemleri (Shangshui firmasının ürün görselleridir).

Elektrot kaplama prosesi; kurutma ve solvent geri kazanım süreçlerinden oluşur. Kaplama ve kurutma işlemlerinin kalitesi, üretilen hücrelerin tutarlılığını, güvenliğini ve çevrim ömrünü doğrudan etkiler.



Elektrot çamurunun katot için alüminyum ve anot için bakır folyolara eşit kalınlıkta ve homojen olarak kaplanması gereklidir (Bknz. Şekil 7). İstenen kaplama kalınlığını sağlamak için çamur homojenliği ve viskozitesi oldukça önemlidir.

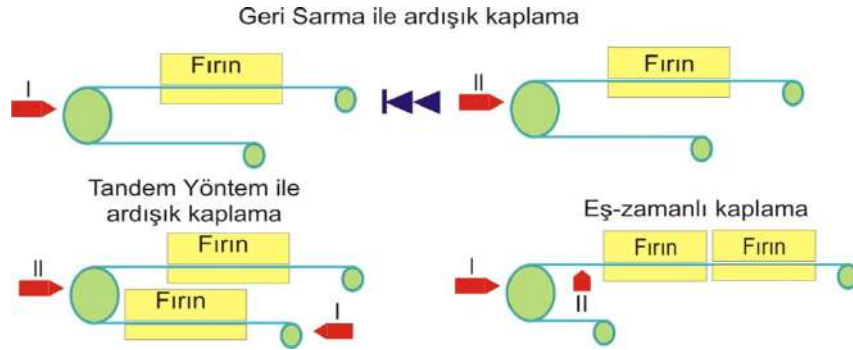
Kaplama prosesinde çamurun folyo yüzeylerine kaplanması Şekil 8’de şematik olarak gösterildiği gibi yarık kalıp (Slot-die), sıyırma bıçağı (doctor blade), virgül çubuğu (comma bar) ve gerilmiş ağ (tensioned web) kullanılır. Günümüzde, maliyeti düşürmek için otomatik, sürekli ve entegre yarıklı kalıplar kullanılmaktadır.



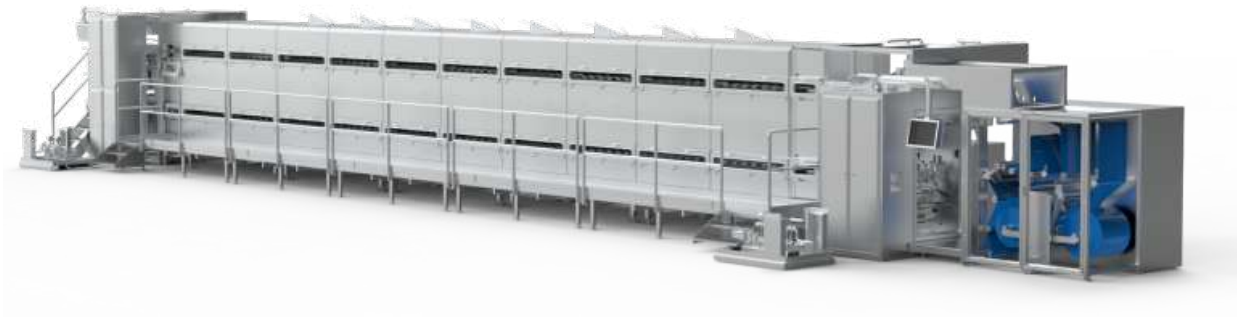
Bu yöntemde, kalıp ile arka rulo üzerindeki alt tabaka arasına yerleştirilen bir boşluk kullanılarak bir film oluşturulur. Orta kalınlıkta kaplama üretmek için orta - yüksek viskozite gereklidir. Seri üretim ve yüksek hassasiyetli kaplama, aralıklı desenli kaplamaya, yüksek kaplama kalitesine ve sistemin stabilitesine bağlıdır. Genel olarak kaplama hızı, viskozitesi ve kaplama kalınlıkları üretilen batarya türüne göre değişmekte olup aşağıda standardize olarak sunulmuştur.

- Kaplama hızı : 1 ~ 200 m·dk⁻¹
- Viskozite : 100 ~ 50.000 mPa·s
- Kaplama kalınlığı : 10 ~ 1.000 µm (ıslak)

Taşıyıcı folyoların (bakır veya alüminyum) kaplanması müşteri isteğine göre folyonun sadece bir yüzüne veya her iki yüzüne yapılabilir. Her iki yüzeye kaplama yapılacak ise; geri sarma ile ardışık kaplama, tandem yöntemi ile ardışık kaplama ve eş zamanlı kaplama yapılabilir. Geri sarma ve ardışık kaplamada önce üst yüzey kaplanır, fırınlanır sonra geri sarak alt yüzey kaplanır ve fırınlanır. Tandem yönteminde ise rulo bir yerden açılır ve sırayla ön yüz bir merdane ile kaplanır, fırınlanır ve sonra arka yüz başka bir merdane ile kaplanır, fırınlanır ve sarılır. Eş zamanlı kaplamada ise folyo açılır ön ve arka yüzey kaplandıktan sonra tek fırınlama prosesi ile her iki yüzey kurutulur (Bknz. Şekil 9).



Hassas yarı kalıp kaplama teknolojisi, 10 nm ila 100 µm kalınlığında yüksek kaliteli ultra ince katmanların üretilmesine olanak tanır. Çamur, laminasyon genişliği boyunca yarı kalıptan geçer ve yüzey boyunca eşit şekilde yayılır. Bağlayıcı solvent (NMP) daha sonra kaplamadan buharlaştırılarak uzaklaştırılır.



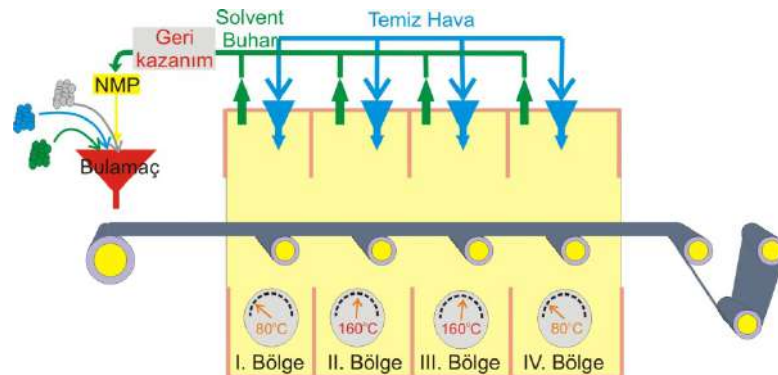
Şekil 10. Hem kaplama hem de kurutma işlemini gerçekleştiren bir makine (Aumann Lauchheim firmasının BlueLine ürün görselidir).

Kurutma ve solvent geri kazanım işlemleri, genelde kaplama makinesine Şekil 10'da gösterildiği gibi entegre formdadır ve kurutma prosesi çoğunlukla sıcak hava üfleme uygulaması yoluyla yapılmaktadır. Kızılötesi kurutma da verimliliği artırmak ve maliyetleri düşürmek için kullanılan diğer yöntemlerdendir.

Kurutma sırasında birbiriyle yarışan üç fiziksel süreç Şekil 11'de şematik olarak gösterilmektedir ve bu süreçler;

- Solventin (çözücünün) buharlaşması,
- Polimerik bağlayıcının difüzyonu,
- Partiküllerin çökmesi (sedimentasyonu)

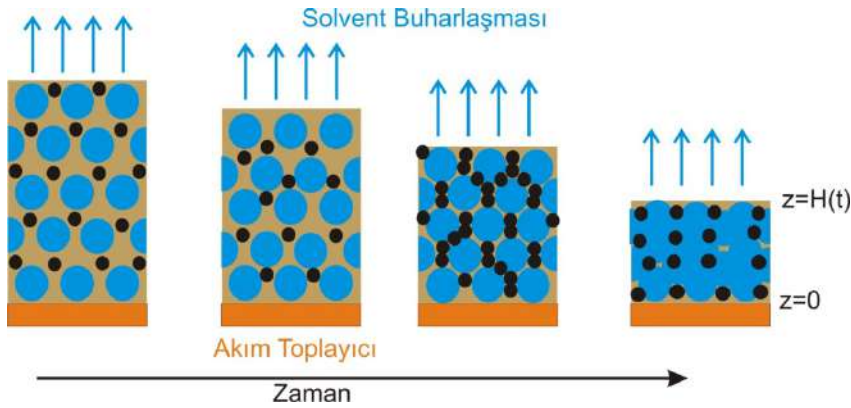
şeklinde verilebilir. Bu üç süreç ard arda gerçekleşir ve elektrot bulamacı, akan sıcak hava ile tipik bir dört aşamalı endüstriyel konveksiyon fırınından geçirilerek katot için alüminyum folyo üzerine uygulanır ve buharlaşan NMP geri kazanılır (Bryntesen vd. 2021). Burada süreç içerisinde sıcaklıkların ve hava akış oranlarının optimizasyonu elektrot verimliliği için önemlidir.



Şekil 11. Kurutma ve solvent geri kazanım süreçleri.

Su/nem içeriğinin hücre performansı üzerinde önemli bir negatif etkisi vardır ve üretim süreci sırasında sıkı bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Pil hücrelerinde suyun bulunması, elektrolitin bozulmasına ve zararlı gazların (HF vb.) oluşmasına neden olur. Bu durum hücre iç basıncının artmasına, şişmesine ve deformasyona neden olur. Hücrelerdeki su içeriği belirli bir değerden yüksek olduğunda, yüksek iç dirence, hızlı kendi kendine deşarja, düşük kapasiteye, zayıf döngü performansına ve hatta sızıntıya neden olarak hücre performansını büyük ölçüde düşürebilir. Ayrıca, karıştırma esnasında çamurun viskozitesini kontrol etmek ve karıştırmanın homojen olmasını sağlamak üzerine çamura eklenen solventin kaplamadan uzaklaştırılması gereklidir. Bu nedenle hücre üretiminde kurutma işlemi şarttır. Şekil 12’de elektrot çamurunun kuruma süreci şematize edilmiştir. Bu proses özetleyecek olursak:

- Kurutma sırasında filmin kalınlığı azalır, kaplamada boşluklar (porozite) oluşur ve kaplama morfolojisi değişir.
- Kurutma hatları 70 m uzunluğa kadar olabilir ve 160 °C’ye kadar ısıtılabilir.
- Kurutma işlemi sırasında toksik solvent buharlaşır. Buharlaştıran gazlar geri kazanılır.



Şekil 12. Bir akım toplayicinin üstüne kaplanan (Al veya Cu folyo) elektrot çamurunun kuruma süreci. Mavi arka plan, (filmin üst yüzeyinden buharlaşan) solventi, siyah ve gri parçacıklar sırasıyla polimer bağlayıcıyı ve aktif malzeme parçacıklarını temsil etmektedir.

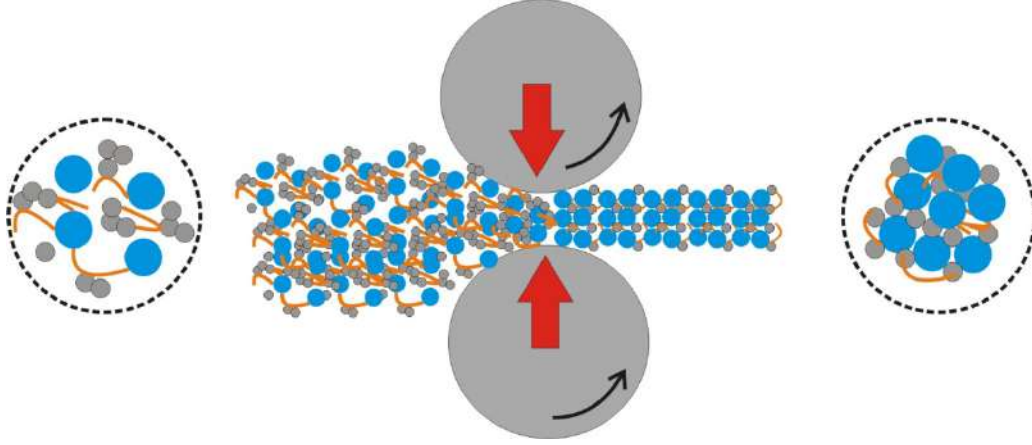
Kaplama işlemi; folyonun tek yüzüne veya her iki yüzüne uygulanabilir. Her iki yüzeyine kaplama yapılan folyoların kurutma işleminde yüzdürmeli kurutma sistemleri tercih edilmektedir. Kurutma ekipmanları, nemin buharlaştırılması ve uzaklaştırılması için gerekli ısı enerjisini sağlarlar. Endüstride çok sayıda kurutma ekipmanı seçeneği bulunmaktadır. Çalışma moduna bağlı olarak kurutma ekipmanı, sürekli kurutma ekipmanı ve toplu (aralıklı) kurutma ekipmanı olarak sınıflandırılabilir. Çalışma basıncına göre atmosferik kurutma ekipmanı ve vakumlu kurutma ekipmanı olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca, ısı transfer yöntemine dayalı olarak kurutma ekipmanı, diğerlerinin yanı sıra, iletimli kurutma ekipmanı, konveksiyonlu kurutma ekipmanı, radyasyonlu kurutma ekipmanı ve dielektrik kurutma ekipmanı olarak da sınıflandırılabilir.

Kaplama ve kurutma işlemlerinin kalitesi, elektrotlardaki kaplamaların kalitesini doğrudan etkilediğinden kaplamada meydana gelen düzensizlik veya kusurlar, hücrenin elektrokimyasal performansının zayıflamasına ve ciddi güvenlik sorunlarına neden olabilir.

Sıkıştırma (calendering) bir çeşit haddeme işlemi olup kaplanmış ve kısmen kurutulmuş elektrot tabakalarının Şekil 13’de gösterildiği gibi merdaneler arasında sıkıştırılarak gerçekleştirilir. Sıkıştırma, elektrot gözenekliliğini ve düzgünlüğünü kontrol ederek hücre performansını etkileyen önemli bir işlemdir. Elektrota uygulanan daha yüksek haddeme basıncı, aktif katmanın kalınlığını azaltır ve böylece hacim enerji yoğunluğunu artırır. Güçlü bir sıkıştırma aynı zamanda elektrotun düzgünlüğünü de artıracak ve elektrotun elektrokimyasal performansını etkileyecektir.

- Kurutma işleminden çıkan kaplama filminin gözenekliliği yaklaşık %60’tır. Enerji yoğunluğunu arttırmak için folyolar yüksek yük altında haddelenerek, aktif katmanın kalınlığı ve gözenekliliği %30-35’e düşürülür. Bu işlem sonucunda elde edilen özellikler aşağıda belirtilmiştir:
- Haddeme kaplamanın folyoya yapışmasını artırır.
- Elektrot katmanına uygulanan yüksek hadde basıncı, aktif katmanın kalınlığını azaltarak hacimsel enerji yoğunluğunu artırır.
- Sıkıştırma işleminden önce ve sonra kaplanmış rulo germe prosesine tabi tutulmalıdır.

- Sıkıştırma işleminden önce rulolarının temizliği şarttır. Hasarsız kalite-kontrol (örneğin; X-ışını, EDS vb.) cihazı ile kaplamadaki yabancı madde vb. kusurlar kontrol edilmelidir.
- Sıkıştırma sırasında kaplamanın soyulmasını önlemek için haddeme öncesi kaplanmış elektrotların belirli bir dereceye kadar kurutulması (hatta ısıtılması) gerekir.
- İşlem sırasında sıkıştırma seviyesinin kontrol edilmesi de önemlidir. Aşırı sıkıştırma, akım toplayıcının yakınındaki elektrot malzemelerini etkileyerek Li iyonlarının uygun şekilde yerleştirilmesini ve çıkarılmasını engelleyebilir ve aktif malzemelerin birbirine sıkı bir şekilde yapışmasına neden olarak akım toplayıcıdan kolayca ayrılmasına neden olabilir. Yüksek sıkıştırma proseslerinde elektrot tabakalarının aşırı plastisitesi bozulmaya neden olur ve sıkıştırma sonrasında sarma işleminin istenilen şekilde yapılmasına engel olur.



Şekil 13. Sıkıştırma prosesinin şematik gösterimi.

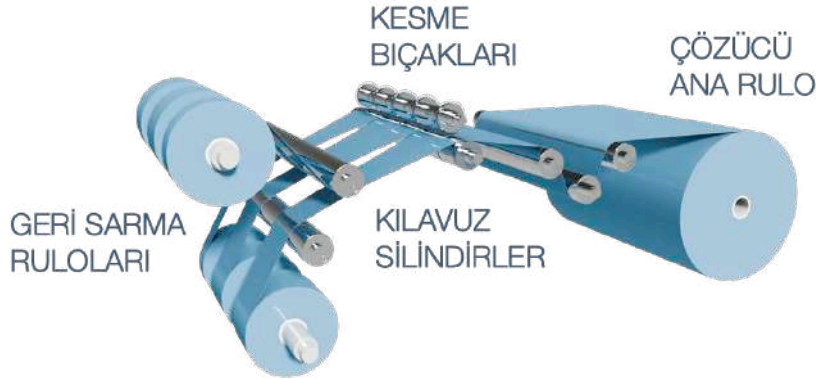
- Elektrot tabakalarının haddelenmesi enerji yoğunluğunu artırır ve elektrot malzemelerinin akım toplayıcıya sıkı bir şekilde bağlanmasını sağlayarak şarj/deşarj çevrimi sırasında ayrılma nedeniyle oluşan enerji kaybını önler.
- Sıkıştırmanın amaçları arasında, seperatörü delen çıkıntılar (çapaklanma) neden olduğu potansiyel kısa devreleri önlemek için elektrot tabakalarının pürüzsüz ve düz bir yüzeyinin oluşturulması ve hücrelerin enerji yoğunluğunun iyileştirilmesi yer alır (Abdollahifar vd. 2023). Şekil 14’de bir sıkıştırma makinesi görseli verilmiştir.



Şekil 14. Elektrot sıkıştırma (haddeme) makinası (Saueressig firmasının ürün görselidir).

Dilme işlemi (slittering), kaplanmış elektrotun istenilen genişlikte dar dilimler halinde uzunlamasına kesilmesidir. Dilme işleminin amacı, elektrotun yan taraflarını bir kesici ile keserek belirlenen hücre boyutuna sığmasını sağlamaktır. Dilim genişlikleri, hücrenin enine göre belirlenir. Bu aşamada ortaya çıkan herhangi bir çapaklanma veya düzgünlük dahili kısa devre oluşmasına neden olarak ciddi güvenlik sorunları ortaya çıkarır. Dilme işleminden sonra ölçülmesi gereken temel proses parametreleri elektrot genişliği, elektrot pürüzsüzlüğü ve çapakların varlığının tespittir.

Dilme makinesi, çözücü (açıcı), bıçaklar ve geri sarıcıdan oluşur (Bknz. Şekil 15). Dilme prosesinde öncelikle kaplanmış elektrot folyosundan oluşan rulo açılır, belirli genişlikte şeritler halinde dilme bıçakları ile kesilir ve sürekli olarak diğer tarafta sarılır. Dilme prosesinde çözücü ve sarıcı hızı folyoya uygulanan gergiyi belirler, ve optimum dilme koşulları kaplanmış folyonun özelliklerine bağlıdır.



Şekil 15. Dilme prosesinin ana bileşenleri (Nishimura Seisakusho firmasının dilme makinalarının çalışma prensibinden alınmıştır).

Dilme bıçakları esas olarak, dilme makinesinin bıçak miline monte edilen üst ve alt dairesel disk veya düz şeklindeki bıçaklardan oluşur. Alüminyum ve bakır folyo üzerinde belirli bir kalınlıktaki pozitif ve negatif elektrot tabakaları kesmek için döner kesme prensibi kullanılır. 0,01-0,1 mm dilme bıçaklarının kalitesi, bıçak açısı ve rulo gerginliği dilme işlemi etkileyen başlıca faktörlerdir. Ayrıca dilme işlemi esnasında açılan rulonun temas ettiği kılavuz merdanelerin düzgünlüğü ve yüzey pürüzlülüğü de elektrot yüzeyinin kalitesinde önemlidir. Kesildikten sonra elektrot folyolarda kırışıklık veya kaplama dökülmesi olmamalıdır. Dilme işlemi öncesi ve sonrasında elektrot folyoların kenarlarındaki çapakların minimum düzeyde olması gerekir. Aksi takdirde çapaklar nedeniyle hücre içinde kısa devre olabilir.

Şekil 16'da bir dilme makinesi örneği verilmiştir. Elektrotun kesilen kenarlarında kaplama ve folyo ayrışmamalı veya folyoda kırışıklık olmamalıdır. Bu özellik, esas olarak bıçak milinin ve dilme bıçaklarının boyut toleransı ve salgısının yanı sıra eş eksenliliğiyle ilgilidir.



Şekil 16. Dilme makinesi (Kampf firmasının ürün görselidir).

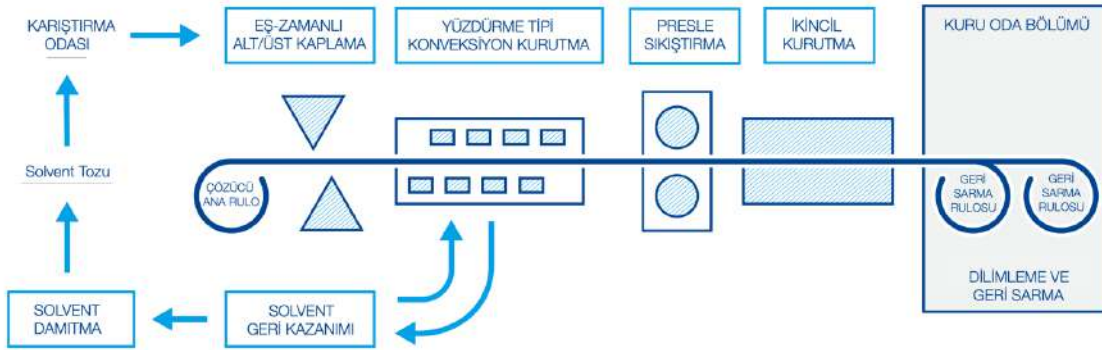
Çentik açma (notching) işlemi, dilme işlemi sonrasında katot ve anot aktif malzemelerinin olmadığı kaplamasız kısımların kesilerek terminal uçlarının (tab) topraklandığı köşelerin bırakıldığı proseslerdir. Çentikleme işlemi için genellikle bıçaklı mekanik kesme makinesi veya bir lazer kesme makinesi kullanılır. Bıçaklı kesimde kör bıçaklar düzensiz ve çapaklı kesim oluşturduğundan kaliteyi düşürme olasılığı yüksektir. Buna karşılık, lazer kesim makinesi daha düzgün ve çapaksız kesim sağlar ve bıçak değişimi gerektirmediği için daha hızlıdır ve az bakım maliyeti gerektirir. Çentik açma makinesine örnek Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 17. Çentik açma makinası (Sonplas firmasının ürün görselidir).

Vakumlu kurutma işlemi, hücrelerdeki nem içeriğinin ortadan kaldırılması için gerekli bir işlemdir. Hücrelerdeki su içeriği öncelikle pozitif ve negatif elektrot kaplamaları, seperatör, elektrolit ve diğer metal bileşenler olmak üzere hücrenin alt bileşenlerinde bulunan nemden ve ayrıca fabrika ortamındaki nemden kaynaklanabilir. Çevresel nemi gidermek için, hücre montajına başlamadan önce anot ve katot folyo ve seperatör rulolarının ortamdaki nemin ortadan kaldırıldığı bir kuru oda içinde bekletilmesi önemlidir. Hücrenin iç nemi için, gerekli yüksek kurutma standartları nedeniyle, suyu uzaklaştırmak için genellikle vakumlu kurutma odası ekipmanı kullanılır. Vakumlu kurutma işlemi tamamlandığında elektrot üretimi de tamamlanır. Daha sonra batarya üretiminin ikinci adımı olan katot, anot ve ayırıcının birleştirildiği hücre montajı işlemine sıra gelir.

Son yıllarda, kaplama, kurutma ve solvent geri kazanımı proseslerini ve ardından gelen haddeleme/sıkıştırma ve dilme aşamalarını bir arada gerçekleştiren sürekli entegre çözümler (roll-to-roll) yüksek kapasite ve kalite sağlamak için geliştirilmişlerdir (Bknz. Şekil 18). Optimize edilmiş üretim tesislerinde rulodan ruluya üretim 25-100 m-dk⁻¹ hızlara ulaşmış durumdadır.



(a)

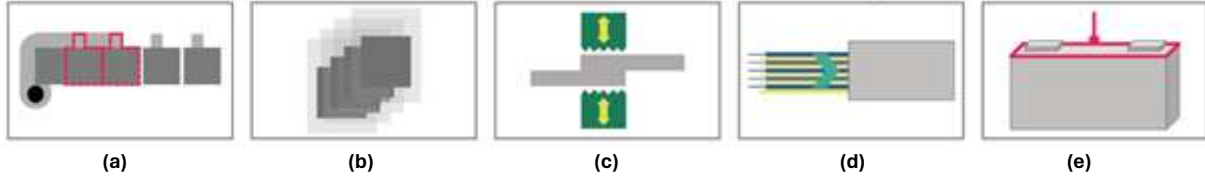


(b)

Şekil 18. Entegre elektrot (roll-to-roll) üretim tesisi (a) Şematik gösterim. (b) Dürr Megtec firmasının ürün görseli.

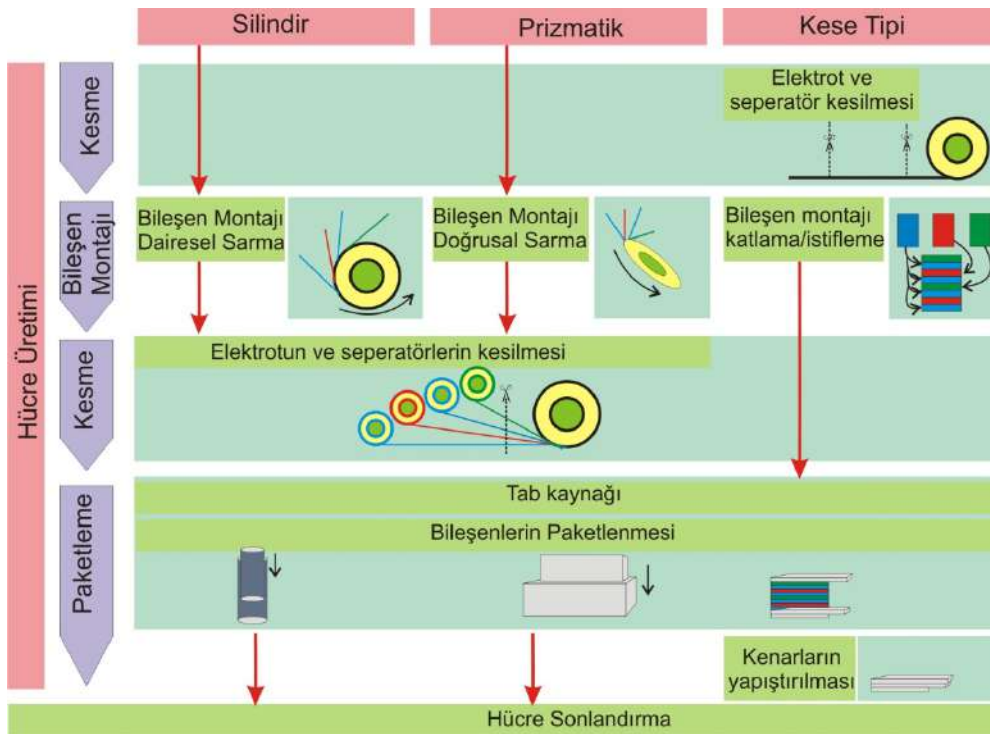
1.1.2. Hücre Montajı

Hücre montajı, hücrenin şekline göre anot elektrotu, seperatör ve katot elektrodunun bir araya getirilmesi, elektrik bağlantılarının yapılması, muhafaza içine yerleştirilmesi, hücrenin kapatılması ve hücre sonlandırma adımlarını içerir (Bknz Şekil 19).



Şekil 19. Hücre montajı akışı. (a) Elektrot şekillendirme, (b) istifleme, (c) elektrik bağlantısı, (d) yerleştirme, (e) Kapama ve hücre sonlandırma.

Değişik geometrilere sahip hücrelerin üretimi Şekil 19'da şematik olarak görselleştirilmiştir. Silindirik ve prizmatik hücrelerde ana bileşenler sırasıyla anot elektrotu, seperatör ve katot elektrotu birlikte sarılır. Elektrik bağlantıları yapılır sonrasında bir araya getirilmiş bileşenler çelik veya alüminyum muhafaza içine yerleştirilir, pozitif ve negatif terminal uçlar (tab) oluşturulur ve muhafaza kapatılır. Kese tipi hücrelerde ise anot elektrotu, seperatör ve katot elektrotu istiflenir, elektrik bağlantıları yapılır ve alüminyum lamine folyodan oluşan kese içerisine yerleştirilir ve uçlar kaynaklandıktan sonra kese kısmi olarak kapatılır.



Şekil 20. Değişik geometrideki hücrelerin montaj aşamaları.

Sarma / İstifleme işlemi, silindirik ve prizmatik hücrelerin bileşenleri (anot, katot ve seperatör), sarılmış şerit rulolardan oluşurken, kese tipi hücrenin bileşenleri, tek tek tabakalarından oluşur. Silindirik ve prizmatik hücre bileşenleri birlikte sarılırken; kese tipi hücrenin bileşenleri olan anot elektrotu,-seperatör ve katot elektrotu birbirinin üzerine istiflenir. İstenilen kapasite değerlerinde sarım veya istifleme sonlandırılır ve kesim yapılır. Ruloların kalan kısımlarından tekrar istenilen kapasiteye göre sarım yapılmaya devam edilir.

Sarma teknolojisinde amaç katot elektrot rulosunu, seperatörü ve anot elektrot rulolarını açılıp doğru gergi ile kaydırmadan sarmak ve sarılan kısma silindirik veya kare şekil vermek ve kare veya silindirik bir metal muhafazanın içine yerleştirilecek hale getirmektir.

Kese tipi hücrenin üretimi için anot elektrotu, seperatör ve katot elektrotu ayrı ayrı istenilen boyutlarda kesilir ve birbiri üstüne istiflenir veya Z-katlı zikzak seperatör istiflenmesinde aralara / ceplere seperatör gelecek şekilde anot ve katot elektrotları yerleştirilir. Şekil 21 a'da sarılmış ve Şekil 21 b'de ise istiflenmiş prizmatik kesit hücresi verilmiştir. Sarma işlemi sonunda prizmatik şekil verilip dış muhafazaya yerleştirilen hücrede oluşan köşe boşlukların çok az olduğu

görülmektedir. Sarım yapılmış prizmatik hücrede sarım köşesindeki dairesellik nedeniyle hacim kullanım oranı daha düşüktür. İstiflenmiş hücrede ise hacim tam olarak kullanılmış olduğundan bu tasarım geometrisi ile daha yüksek enerji yoğunluğu sağlanmış olacaktır.



Şekil 21. (a) Sarılmış ve **(b)** istiflenmiş prizmatik hücre kesiti (Görsel temsili çizilmiştir).

Pilin kullanımı yani hücrenin şarj ve deşarjı esnasında yer değiştiren Li iyonları nedeniyle anot ve katot elektrotlarda hacimsel genişleme ve büzüşmeler yaşandığı bilinmektedir. Şekil 21’de verilen tasarımlardan sarılmış olan hücrede köşelerdeki dairesel geometrideki boşluklar genişleme ve büzüşmelere bağlı şekil değişiminin bu bölgelerde diğer bölgelere göre farklı olacağını habercisidir. Bu sarım şekli nedeniyle katmanlar ve bölgeler arasında kararsız genişleme ve büzüşmeler hücrenin akım dağılım eşitsizliğine sebep olacağından pil performansını olumsuz etkileyecektir. İstiflenmiş hücre de ise sarım şekline bağlı kararsız genişleme daha az olacak, bu durum akım dağılımının da diğer sarım şekline göre daha kararlı olmasını sağlayacaktır. Kullanım esnasındaki genişleme ve büzüşmelere bağlı deformasyon ve akım dağılım kararsızlığı iç direnci de etkilediğinden ısı dağılımı konusunda da tehlikeler oluşabilecek, hücre güvenliği ve ömrü de tehdit oluşturacaktır.

Sonuç olarak, seçilen hücre geometrisine bağlı olarak doğru üretim metodunun (sarım/istifleme) seçilmesi hücrede daha yüksek enerji yoğunluğu, daha kararlı bir iç yapı, daha yüksek güvenlik düzeyi ve daha uzun bir ömrü beraberinde getirecektir. Katlama, istifleme ve sarım makinaları ve bu makinalarda üretilen hücrelerin kullanıldığı elektrikli araç (EA) modelleri Şekil 22’de gösterilmektedir. Dolayısı ile endüstriyel olarak üç farklı tip sarım ve hücre üretimi elektrikli araçlarda tercih edilmektedir. Her firma kendine özgü hücre geometrisi kullanarak EA üretimlerini gerçekleştirmektedir.



Audi e-Tron



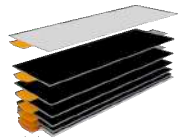
Tesla Model Y



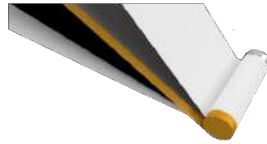
Jaguar i-Pace



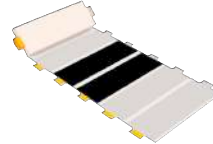
BMW iX1



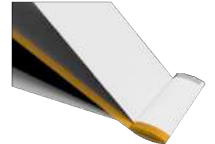
İstiflenmiş kese tipi hücre



Silindirik Hücre



Katlanmış kese tipi hücre



Prizmatik Hücre

Şekil 22. Katlanmış, istiflenmiş veya sarılmış hücreler kullanan elektrikli araç modelleri (Araç görselleri ilgili firmaların web sitelerinden alınmıştır.)

Elektrik bağlantısı oluşturma işlemi, ultrasonik veya lazer kaynak teknolojilerini kullanarak sarılmış veya istiflenmiş anot ve katot elektrotlarının terminal uçlarını (tab) elektriksel olarak bağlama işlemidir. Tüm hücre şekilleri ve kimyaları için bu işlem gereklidir. Birleştirme işlemi olmadan hücre çalışamaz, şarj veya deşarj olamaz. Genel olarak katot elektrotu için alüminyum ve anot elektrotu için nikel şeritler terminal uçlar olarak kullanılırlar.

Kese hücrelerde terminal ucu, kaynağı esnasında termal gerilimi azaltmak için PTC termistör kullanılır. Termal stres yönetimi, kese poşet muhafazasının içine uygun istif şekli (kısa devreyi önlemek için), yapıştırma sıcaklığı, basınç ve süre seçilerek yapılır. Kaynak işlemi sırasında düşük temas direnci, düşük mekanik stres, sızdırmazlık, bağlantı noktalarındaki yüksek yorulma mukavemeti ve sıklıkla dikkat edilmesi gereken kalite parametreleridir. Kese hücrelerde terminal pozisyonlarının yeri ile ilgili değişik tasarımlar mevcuttur. Negatif ve pozitif uçlar aynı kenar üzerinde yer alabildiği gibi, karşılıklı kenarlar üzerinde de yer alabilmektedir.

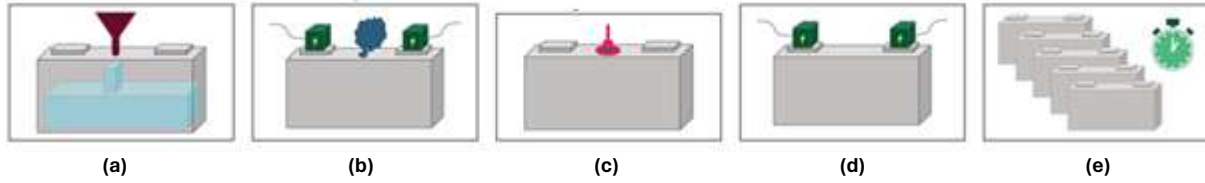
Yerleştirme ve kapama işlemi, istiflenen veya sarılan elektrotlar ve seperatörün seçilen muhafaza içine alınarak kapatılması aşamalarından oluşur. Silindirik hücrelerin dış gövde muhafazası genelde çelikten (paslanmaz çelik),

prizmatik hücrenin muhafazası ise haddelenmiş ve daha sonra kaynak yapılmış ya da derin çekilmiş bir alüminyum levhadan üretilmektedir. Kese tipi hücrenin muhafazası ise, alüminyum-polimer lamine folyonun poşet şekline getirilmiş halidir.

Silindirik ve prizmatik hücrelerin dış gövdesi şekillenmiş ve bir ucu açıktır. Sarılı veya istiflenmiş bileşenler (anot seperatör ve katot) muhafazanın açık kenarından içeriye dikkatlice yerleştirilir. Kese hücrenin istiflenmiş veya katlanmış bileşenleri ise, üç kenarı açık lamine folyo içine konulduktan sonra üç kenarı kaynaklanarak kapatılır. Burada dikkat edilmesi gerekli bir nokta bu kapatma esnasında folyonun bir kenarında içerdeki havayı boşaltmak ve elektrolit doldurmak için belirlenmiş bir büyüklükte açıklık bırakılmasıdır.

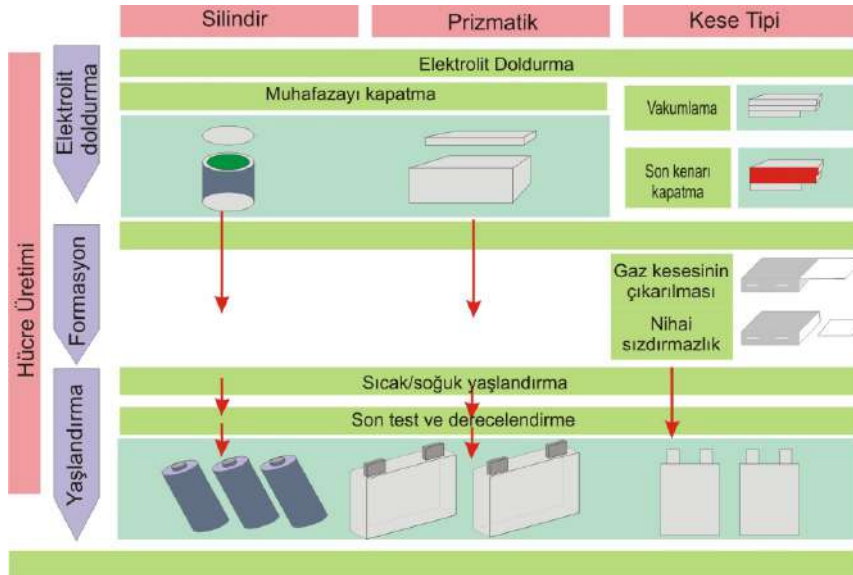
1.1.3. Hücre sonlandırma prosesi

Bu proses, elektrolit dolumu, ön şarj, doldurma deliğinin kapatılması, formasyon ve yaşlandırma adımlarını içerir (Bknz. Şekil 23). Önce muhafazalarında istiflenmiş anot elektrotu, seperatör ve katot elektrotu arasına elektrokimyasal reaksiyonun başlatılmasında gerekli olan sıvı elektrolit doldurulur, ön-şarj gerçekleştirilir ve elektrolit doldurmak için açık olan delikten hücre içindeki hava alınarak kapatılır. Daha sonra hücredeki elektrokimyasal reaksiyonun sağlıklı olması için gerekli formasyon işlemi gerçekleştirilir. Formasyon işlemi esnasında hücreye düşük akım verilerek uzun sürelerde ilk şarj ve deşarj döngüsünün gerçekleştirilmesi sağlanır. Son olarak hücreler yaşlandırma testlerine maruz bırakılarak performansları göre gruplanır. Şekil 24'de değişik hücre şekillerine göre hücre sonlandırma aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 23. Hücre sonlandırma prosesi adımları. (a) Elektrolit dolurma, (b) ön şarj, (c) doldurma deliğinin kapatılması, (d) formasyon, (e) Yaşlandırma.

Elektrolit dolum işlemi, elektrolitin doğru miktarda hücreye ilave edilmesini sağlamak için yüksek hassasiyetli bir enjeksiyon iğnesi aracılığıyla gerçekleştirilir. Hücreye elektrolitin enjekte edilmesi sonrasında anot, seperatör ve katot yüzeylerinin tam olarak ıslatılması için hücreye basınç profili uygulanabilir. Silindirik ve prizmatik hücrenin muhafazaları daha önceden kaynakla kapatılmış ve elektrolit dolumu bu iş için ayrılmış bir delikten gerçekleştirilir. Bu delikler, elektrolit doldurma işleminin ardından nihai olarak kapatılır. Kese tipi hücreye istifler yerleştirildikten sonra kenarda bırakılmış açıklıktan önce elektrolit doldurulur, sonra katlanmış katmanlar boyunca süzülmesini sağlamak için vakumlanır ve son olarak açıklık kaynaklanarak kapatılır. Şekil 25' de örnek bir elektrolit dolum makinesi verilmiştir.



Şekil 24. Değişik geometrideki hücrelerin sonlandırma aşamaları.

Elektrolitler ve katkıları oldukça korozif kimyasallardır. Daha önce de belirtildiği gibi Li iyon hücreler hem katotta var olan Li hem de elektrolit tuzunda var olan Li nedeniyle su ile hızla reaksiyona girip yanma, patlama gibi istenmeyen durumların oluşmasına sebep olabilir. Bu nedenle tüm hücre üretim işlemleri malzemelerin depolanmasından başlayarak kontrollü atmosferde kuru odalarda gerçekleştirilir. Elektrolit saklama veya dolun işlemi esnasında az miktarda da olsa (yanma, patlama olmayacak miktar, ppm seviyeleri) elektrolit nem ile reaksiyona girerse hücre içinde hidroflorik asit oluşturur ve zehirli gazlar açığa çıkar, çıkan gaz nedeniyle hücre şişer, performans düşer ve hatta muhafaza bu şişme ile oluşan deformasyona karşı direnç gösteremez ise hücre patlar ve yanar.



Şekil 25. Elektrolit doldurma makinası (IP PowerSystems firmasının ürün görselidir).

Formasyon (koşullandırma), hücre için ilk şarj ve deşarj işlemidir. Silindirik, prizmatik ve kese tipi hücre için oldukça benzerdir. Formasyon sırasında Li iyonları anot elektrotundaki aktif malzeme olan grafitin kristal yapısına girer. Bu reaksiyon esnasında anot elektrot yüzeyi elektrolit ile ıslatılır ve katı elektrolit katmanı (SEI, Solid Electrolyte Interface) oluşur. Bu katman her ne kadar hücre direncini artırsa da aynı zamanda elektrot yüzeyinin ve kaplamasının stabil kalmasını sağlar, parçalanmasını, dağılmasını veya tozlaşmasını (pulverizasyon) da önler ve hücrenin kullanım ömrü boyunca performansı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Burada belirtmek gerekir ki SEI tabakasının kalınlığı ve homojenizasyonu batarya performansını doğrudan olarak etkilemektedir. İstenilen şekilde SEI oluşumu sağlanmaz ise batarya hızlı bir şekilde performans kaybeder.

Formasyon prosesinin tasarımında hücre kimyasının (LFP, NMC, NCA vb.) önemi büyüktür. Formasyon için hücre, terminalleri arasından akım geçirmek üzere galvano-statik test cihazları kullanılır. Formasyon sırasında çok düşük akım yüklerinde devreden akım geçirilir ve çekilir (şarj ve deşarj işlemi). 0,1 C (C hücre kapasitesidir) hız ile formasyon yapıldığında hücrenin tam şarjı için 10, tam deşarjı için 10 olmak üzere toplam 20 saate ihtiyaç vardır. Formasyon işlemi hücre üretim süreçleri arasında en uzun süreçtir ve toplam hücre maliyetinin %20 - %30'unu oluşturur.

Formasyon işleminin sonraki aşamalarında hücre üreticileri farklı C-hızları (0,5 C, 1 C vb.) kullanabilir. Bu durumda 1 C için 1 saat şarj ve 1 saat deşarj için toplam 2 saat, 0,5 C hızda ise toplam 4 saate ihtiyaç vardır. Tipik bir formasyon test dizisi birkaç çevrim gerektirir. Hücre testlerinde ortam sıcaklığı ve uygulanan akım değerleri çok hassas ve stabil olmalıdır.

Gaz çıkarma işlemi, formasyon sürecinde hücre içerisinde oluşan gazı çıkarmak ve gaz birikmelerini önlemek için yapılır. Silindirik ve prizmatik hücre muhafazalarında basınç valfi gaz basıncını tahliye etmek için kullanılır. Kese tipi hücrelerde, gaz oluşumunu absorbe etmek üzere tasarlanmış ek bir kese torbası bulunur. Gazla doldurulmuş kese torbası, gaz oluşumunun ardından vakum odasında delinir ve dışarı çıkan gazlar emilir. Hücre daha sonra vakum altında kapatılır. Eksilen elektrolit miktarı tespit edilerek tamamlanır ve vakumlu mühürleme sistemi ile tüm fazladan gaz çekilerek son mühürleme işlemi yapılır. Gaz torbası ayrıştırılarak tehlikeli atık olarak imha edilir. Torba hücrenin dış boyutlarını azaltmak için son katlama ve gerekirse conta kenarlarının yapıştırılması bir seçenek olarak gerçekleştirilebilir.

Yaşlandırma işlemi, hücre içlerindeki kısa devreleri tespit etmek, hücrelerinin performansını ve özelliklerini ölçmek için yapılır. Bu işlem sonunda, hücreler performanslarına ve özelliklerine göre derecelendirilir. Hücrelerin olgunlaşması olarak da adlandırılan yaşlandırma, hücre özellikleri, hücre performansı, hücrenin açık devre voltajının dört haftaya

kadar geçen süre (30 gün) boyunca düzenli olarak farklı sıcaklıklarda ölçülmesi ile gerçekleşir ve hücre üretiminin son işlem adımlarından biridir.

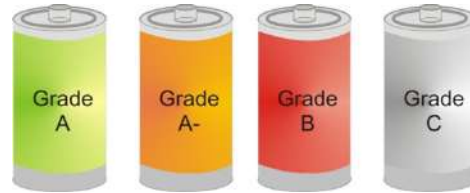
Bu işlemlerin yapılaş şekline göre; yaşlandırma işleminde “raf” ve “hazne” olmak üzere iki farklı yöntem kullanılır. Hücreler bir ürün taşıyıcısında taşınır ve raf bölmesinde veya hazne bölmesinde elektrikle temas ettirilir. Raflar açık bir düzene sahiptir ve hücreler taşıma arabaları tarafından otomatik olarak depolanır ve alınır. Yüksek düzeyde ölçeklenebilirlik nedeniyle bu tasarım, özellikle çok fazla alan gerektiren hücrelerin yaşlanması için uygundur. Şekil 26’da raf tipi ve hazne tipi yaşlandırma sistemlerine örnekler verilmiştir. Formasyon ve yaşlandırma işlemi sırasındaki bir hatadan dolayı yangın çıkma ihtimali yüksektir. Hazne tasarımı robotlu kapalı bir odaya sahiptir ve bu nedende yangından korunma açısından yüksek derecede güvenlik sunar.



Şekil 26. (a) Hücre tipi robotlu yaşlandırma sistemi. (b) Raf tipi yaşlandırma sistemi (Int. Kyn. 1).

Sınıflandırma ve Derecelendirme (Sorting, Grading) işlemi, yaşlandırma işlemi sonrasında alınan sonuçlara göre gerçekleştirilen bir derecelendirme işlemidir. Hücre kapasitesi, gerilim, iç direnç, deşarj eğrisi ve çevrim ömrüne göre derecelendirme yapılır (Şekil 27).

Hücre teknik veri dosyası gerekliliklerini karşılayan en kaliteli hücreler; A sınıfı olarak tanımlanır. A sınıfı hücreler uzun süre saklandığında -A sınıfına dönüşürler. Hücre teknik veri dosyası gerekliliklerini karşılamayan hücreler ise B sınıfı olarak tanımlanır. Bu tip hücrelerin kendi kendine deşarjı çok yüksektir, kapasitesi düşüktür, iç direnci çok yüksektir. Hücre boyutlarında ve ağırlıklarındaki farklılıklar standartta istenilenden fazladır. Önde gelen hücre üreticileri müşterilerine B sınıfı hücreleri satmamaktadır; çoğunlukla B tipi hücreler marka etiketi olmadan ve garantisiz olarak satılmaktadır. Aktif olmayan veya şekil sorunları olan ve ayrıca B sınıfı, uzun depolamadan sonra satılan hücreler ise C sınıfı olarak tanımlanır. Bunlar garantisi olmayan, deneme amaçlı ürünler olarak görülmektedir (Int. Kyn. 2). Şekil 28’de örnek bir batarya sınıflandırma makinesi verilmiştir.

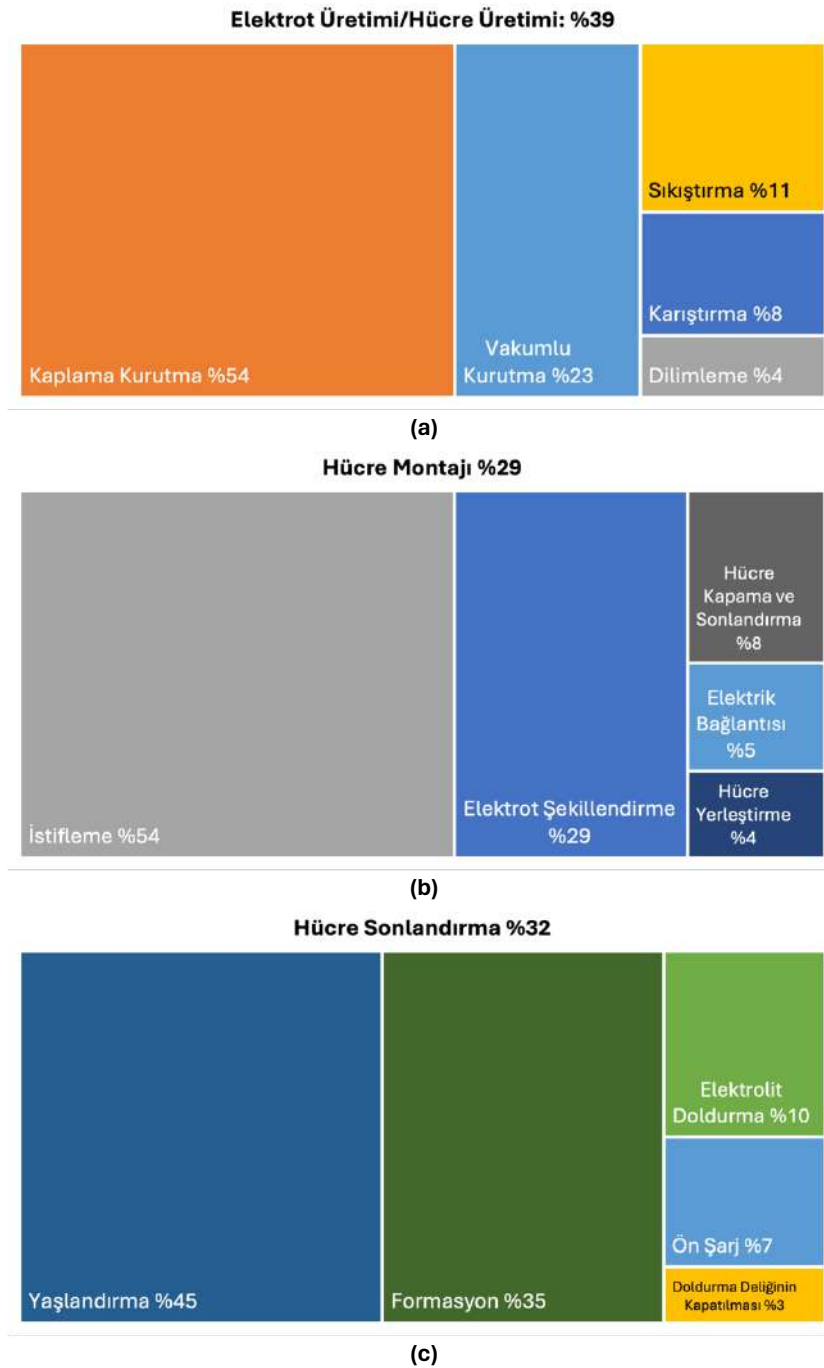


Şekil 27. Batarya hücresinin derecelendirme kategorileri



Şekil 28. Batarya sınıflandırma (sorting, grading) makinesi (Chipbest Dongguan Group firmasının ürün görselidir).

Genel olarak hücre üretimi değerlendirildiğinde elektrot üretimi tüm üretim maliyetinin %39, hücre montajı %29 ve hücre sonlandırma %41'ini almaktadır (Küpper vd. 2018). Şekil 29'da hücre üretim sürecinin alt süreçlerinin maliyete etkisi verilmiştir.















Şekil 29. Hücre üretim süreçlerinin maliyete etkisi (a) Elektrot üretimi /Hücre üretimi, (b) Hücre montajı, (c) Hücre sonlandırma (Küpper vd. 2018 raporundan alınmış rakamlara göre görselleştirilmiştir).

Ülkemizde sadece Aspilsan hücre seri üretim faaliyetlerine geçmiş olup, genel olarak silindirik 18650 boyutta hücreler üretmektedir. Pomega ve Siro Enerji şirketleri ise pilot ölçekten seri üretim ölçeğine geçmek için gerekli adımları atmaktadır. Hücre üreticilerinin azlığı nedeniyle, henüz ülkemizde hücre üretimine yönelik olarak imal edilmiş bir makine mevcut değildir. Tablo 3'de dünyada var olan hücre üretim makinelerine sahip bazı kuruluşların isimleri ve üretmiş oldukları makine türleri verilmiştir. Ülkemizin başka sektörlerdeki makine üretimine yönelik, teknik bilgi ve tecrübe alt yapısı değerlendirildiğinde dünya ile rekabet edebilir makineler üretme yeteneğinin olduğu söylenebilir. Aslında batarya üretiminde kullanılan çoğu makine, ekipman cihazın benzeri farklı üretim endüstrilerinde farklı alanlarında kullanılmakta olup ülkemiz özelinde gerekli teknoloji ve tecrübe mevcuttur. Burada özellikle batarya

sistemlerine var olan makine-teçhizat altyapısının batarya üretim teknolojilerine göre uyarlanması gerekmektedir. Elektrikli araçların yaygınlaşması ile birlikte bazı firmaların var olan cihazlarını batarya sistemlerine entegrasyonu ile ilgili çalışmaları yapmaya başladığı görülmektedir. Süreç içerisinde hızlı gelişmenin en önemli eksikliği yatırımcılar tarafından batarya sektöründeki bilgi birikiminin yetersiz olması şeklinde değerlendirilebilir. Yapılan bu çalışmanın temel amaçlarından bir tanesi de eksik olan teknolojik bilginin sağlanarak batarya sektöründe ülkemiz açısından katma değeri yüksek ürünler geliştirilmesidir.

Tablo 2. Dünyada var olan hücre üretim makine üreticileri ve üretilen makine türleri (Int. Kyn. 3).

Firma Adı	Ülkesi	Makine Türü
Areconn Precision	 Çin	Kaplama, Sıkıştırma, Dilme, Sarma
Autowell Technology	 Çin	Hücre montaj
Bühler Grup	 Almanya	Malzeme hazırlık
CKD Corp	 Japonya	Sarma
Colibri Technologies	 Çin	Anahtar teslimi hücre üretim hatları
Dürr Megtec	 Almanya	Kaplama, kurutma, Sıkıştırma, Dilme
Geesun Intelligence	 Çin	İstifleme, Sarma, Elektrolit doldurma, Formasyon
Hangke Technology	 Çin	Formasyon, Hat sonu testleri
Hanwha Grup	 G. Kore	Formasyon
Hioki Corp	 Japonya	Test ve kontrol
Hitachi Chemical	 Japonya	Kaplama, Hücre montajı
Hohsen Corp	 Japonya	
Jonas & Redmann	 Almanya	İstifleme, Hücre montajı, Elektrolit doldurma
Kaido	 Japonya	Sarma
KanHoo	 Çin	Kaplama
Katop Automation	 Çin	Kaplama
Koem	 G. Kore	Sarma, Hücre montajı
Korea USA Battery	 G. Kore	Anahtar teslimi hücre üretim hatları
Lyric Robot	 Çin	
Manz Automation	 Almanya	Hücre montajı
mPlus	 G. Kore	Hücre yerleştirme, Terminal kaynak
Nagano Automation	 Japonya	Malzeme hazırlık, Kaplama, Sıkıştırma, Dilme, İstifleme, Sarma, Hücre montajı, Elektrolit doldurma, Formasyon
Naura New Technology	 Çin	Malzeme hazırlık, Kaplama, Sıkıştırma, Dilme

Tablo 2 (devamı). Dünyada varolan hücre üretim makine üreticileri ve üretilen makine türleri (Int. Kyn. 3).

Firma Adı	Ülkesi	Makine Türü
PNE Solution	G. Kore	Hücre montajı, Test ve control sistemleri
Putailai	Çin	Kaplama
Saueressig Grup	Almanya	Sıkıştırma
Sevenstar Electronics	Çin	Malzeme hazırlık, Kaplama, Sıkıştırma, Elektrolit doldurma
Sovema Group	İtalya	Formasyon, Hat sonu testleri
Toptec Battery	G. Kore	Terminal kaynak
Toray Engineering	Japonya	Kaplama, Dilme, İstifleme, Hücre yerleştirme
Wuxi Lead Intelligence	Çin	Malzeme hazırlık, Kaplama, Sıkıştırma, Dilme, İstifleme, Sarma, Terminal kaynak, Elektrolit doldurma
Yinghe Technology	Çin	Kaplama, Dilme, İstifleme, Sarma, Hücre montajı, Formasyon
Zhiyun Automation	Çin	Sıkıştırma, İstifleme, Sarma

1.2. Lityum İyon Batarya Modülü Üretimi

Hücre üretim süreçleri elektrokimya odaklı makine ekipmanı üzerine yoğunlaşırken, batarya modülü ve paketi üretim süreçleri elektromekanik odaklı otomasyona ve robotlara yoğunlaşmaktadır. Bu da, hem yerli üretim hem de yerinde üretim açısından ülkelere ve son kullanıcılara pazarda yer açmaktadır. Modül üretiminin aşamalarını açıklamak için RWTH Aachen Üniversitesi'nde Heimes ve arkadaşlarının hazırladıkları çalışmadan yararlanılmıştır (Heimes vd. 2018).

Modül üretim aşamaları;

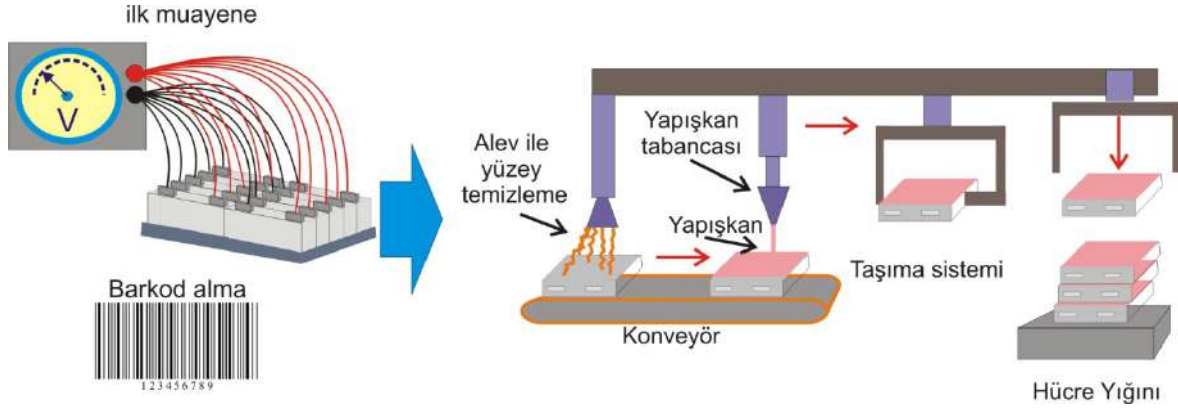
- Hücrelerin Ön Montajı,
- Yalıtım ve Germe işlemi,
- Elektrik Bağlantı işlemi,
- Yardımcı (Slave) Devre Kartının Montajı işlemi ve
- Muhafaza kapağının montajı işlemlerinden oluşur.

1.2.1. Modül Üretiminde Hücrelerin Ön Montaj İşlemi

Sürecin hızı, büyük ölçüde otomasyon derecesine bağlıdır. Ön montaj istasyonunda yapılan işlemler aşağıda sıralanmış ve Şekil 30'da görselleştirilmiştir

- Malzeme girişi ürün etiketlerinin oluşturulması, taranması ve performans verilerine göre sıralanması.
- Giriş kalite kontrol testleri ile elektrokimyasal (empedans analizi, voltaj ölçümü, kapasite analizi vb.) arızalı hücrelerin ayıklanması işlemi [**Not:** Güç, şarj süresi ve servis ömrü, sistemin içindeki en zayıf hücreye bağlıdır ve hücreler arasındaki fark ne kadar az olursa sistemin tekrarlanabilirliği daha yüksek olacaktır].
- Hücrelerin birbirine göre tam hizalanarak konumlandırılması ve güvenli bir şekilde sabitlenmesi. **Not:** Bu aşamada robot kullanmak hücrelerin her seferinde hassas bir şekilde konumlandırılmasını kolaylaştıracaktır.

- Kısa devreleri önlemek için hücrelerin yalıtkan yapıştırıcılar kullanılarak birleştirilmesi.
 - Hücrelerin tanımlanmış bir şekilde istiflenmesi.
 - Birleştirme ortamına bağlı olarak solvent buharlarının emilmesi.

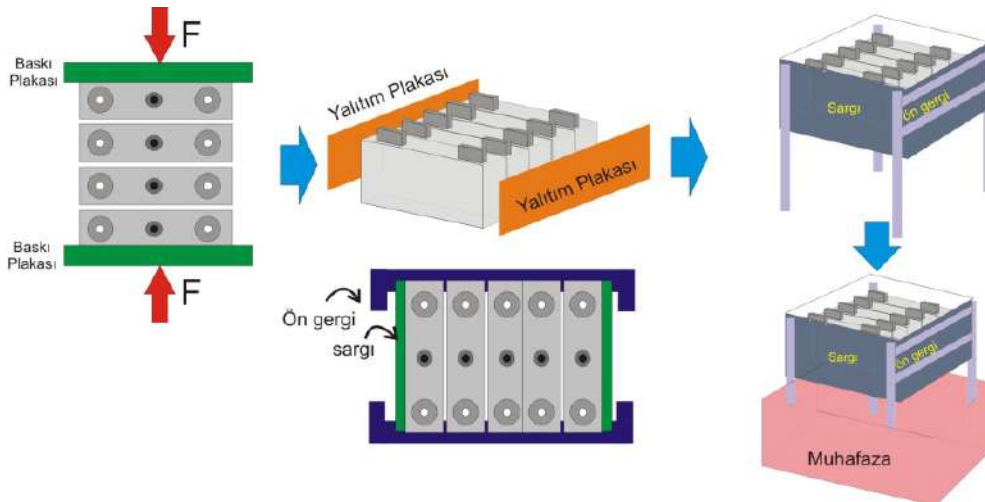


Şekil 30. Modül üretiminde hücrelerin ön montaj işlemi için proses adımları.

1.2.2. Yalıtım ve Germe İşlemi

Yalıtım ve germe istasyonunda yapılan işlemler aşağıda sıralanmış ve Şekil 31'de görselleştirilmiştir;

- İstiflenmiş hücrelerin, önceden belirlenmiş yığın geometrisinin oluşturulması ve şarj-deşarj sırasında şişmeyi en aza indirmek için preslenmesi. [**Not:** *Bu aşamada hücre tipine ve spesifikasyonlara bağlı olarak N ve $N \cdot cm^{-2}$ cinsinden sıkıştırma kuvvetleri ölçülmelidir. Basınç, bir kelepçeleme cihazı, bir bandaj veya modül gövdesinin kendisi tarafından hücre istifinin üzerine uygulanabilir*].
- Isı ve elektrik yalıtımı için hücreler arası ısı ve akım geçişini engelleyen plastik plaka veya folyolar yerleştirilerek hücre arızası durumunda zincirleme reaksiyonu durdurulması. [**Not:** *Yalıtım plakası ile modül arasında $N \cdot cm^{-2}$ cinsinden eşit temas basıncı kontrol edilmelidir*].
- Bileşenlerin modül üzerinde birbirlerine göre tam olarak konumlandırılması ve ardından yapıştırılması ve/veya vidalanması ve muhafazaya yerleştirilmesi olarak sıralanabilir. [**Not:** *Kese hücreler yapıştırılmak yerine, çerçeve veya çekmece sistemlerine yerleştirmek ve ardından desteklemek daha çok tercih edilmektedir*].

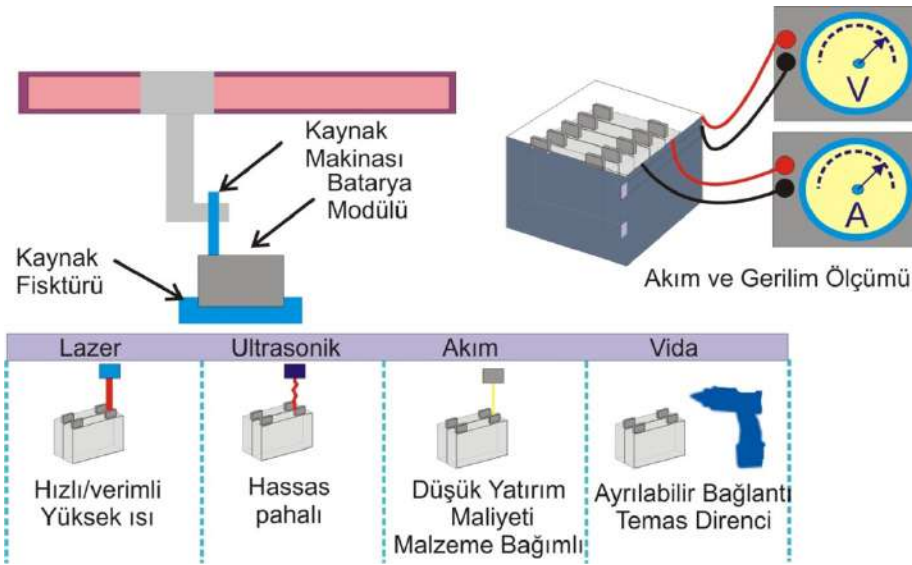


Şekil 31. Yalıtım ve germe proses adımları.

1.2.3. Elektrik Bağlantı Prosesi

Elektrik bağlantı istasyonunda yapılan işlemler aşağıda sıralanmış ve Şekil 32’de görselleştirilmiştir;

- Hücre kontak terminallerinin/akım toplayıcılarının elektrik bağlantılarıyla birbirine kablolanması. **[Not: Bu aşamada istenen modül voltajına bağlı olarak hücreler bir veya daha fazla paralel dizi oluşturacak şekilde birleştirilir. Birleştirme yöntemleri olarak ultrasonik kaynak (düşük ısı girişi), lazer kaynağı (yüksek hassasiyet) veya vidalı bağlantılar (temas dirençlerinden dolayı elektrik kayıpları) kullanılabilir. Kaynakla birleştirme sırasında dikişler tozdan ve yağdan arındırılmış olması gereklidir. Genel olarak ultrasonik kaynak için frekans: 20-40 kHz, genlik: 10-50 μ m, basınç: 1-10 MPa arasında olabilir. Lazer kaynağı için ise ışık kaynağının tipine göre güç 1.000-4.000 W arasında olmalıdır. Kaynak esnasında hücrelere ısı girişinin olmaması veya minimum düzeyde olması istenir].**
- Direnç ölçümleri ile bağlantıların iletkenlik açısından kontrol edilmesi.
- Yüksek otomasyon derecesi ile kaynak dikişleri, kaynak işlemi sırasında hasarsız ve optik kontrollerin yapılması.



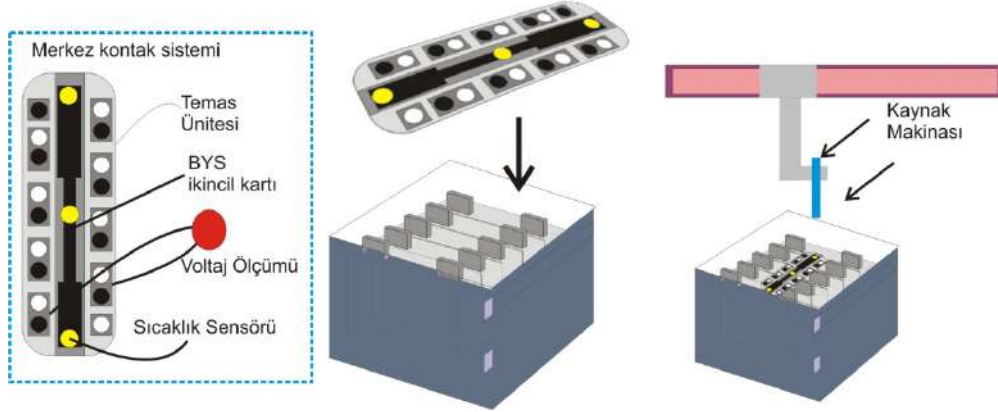
Şekil 32. Elektrik bağlantı proses adımları.

Lazer ve ultrasonik kaynak dahil olmak üzere en son kaynak ve birleştirme teknolojileri, Li iyon batarya modülü üretiminde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bu stratejik kullanım sadece hücrelerin modüllere güvenli ve verimli bir şekilde birleştirilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda monte edilen bataryaya yapısal bütünlük ve iyi bir ısı yönetim kazandırır.

1.2.4. Yardımcı (Slave) Devre Kartının Montajı

Yardımcı devre kartının montajına yönelik işlemler aşağıda sıralanmış ve Şekil 33’de görselleştirilmiştir;

- Verileri işlemek ve sensörleri kontrol etmek için batarya yönetim sisteminin (BYS) (Battery Management System, BMS) yardımcı devre kartlarının ve haberleşme kablolarının konumlandırılması,
- Devre kartının modüle kaynak ve/veya vidalama yoluyla hasarsız birleştirilmesi,
- Gerilim ölçüm kablolarının vidalı veya kaynaklı bağlantılarla montajı ve hassas sıcaklık sensörlerinin yapıştırılması,
- Sensör sisteminin fiş bağlantıları aracılığıyla devre kartına bağlanması,
- Sinyal testi ve kaynak dikişlerinin X-ışını veya ultrasonik ölçümle rastgele test edilerek işlevselliğinin test edilmesi.

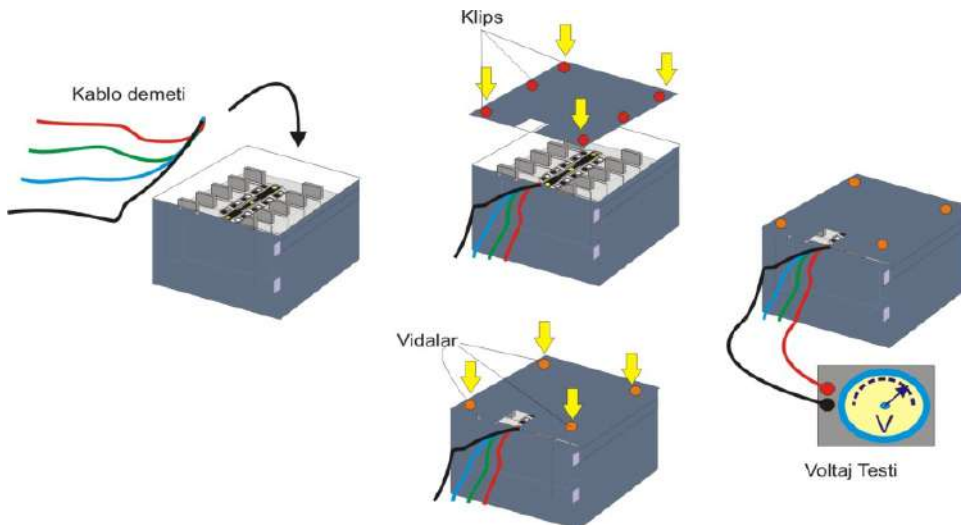


Şekil 33. Yardımcı devre kartının montaj adımları.

1.2.5. Modül Muhafaza Kapağının Montajı

Muhafaza kapağının montajına yönelik işlemler aşağıda sıralanmış ve Şekil 34’de görselleştirilmiştir;

- Kabloları (güç ve haberleşme kabloları) yerleştirme ve takma işlemi.
- BYS ana kartına bağlantı için denetleyicinin ve gerekirse soğutma sisteminin kablolarının bağlanması.
- Üst kapağın montajı, vida veya klipslerle sabitlenmesi.
- Modülün test edilmesi:
 - Dış düzensizlikler (gözle kontrol).
 - İletişimin ve sensörlerin işlevselliği (yazılım testi).
 - Hücre voltajı, hücre farkı (dengeleme).
 - Modülün Şarj Durumu (SoC, State of Charge) kontrolü.
 - Yüksek gerilim testi (direnç ölçümü).
 - Gerekirse soğutma devresinin ve modülün sızdırmazlığı (örn. gaz sızıntı testi, aşırı basınç testi, vakum testi) kontrolleri.
- Koruyucu başlıkların takılması, etiket uygulaması ve nakliye hazırlık.



Şekil 34. Muhafaza kapağının montaj adımları

1.3. Lityum İyon Batarya Paketi Üretim ve Kontrol Süreci

Modüllerden oluşan batarya paketi, istenilen voltaj ve kapasite değerine göre birden fazla hücrenin veya modülün bir araya getirilerek izole bir paketin içinde yerleştirilmesi ile oluşur. Bu hücre grupları batarya paketi içerisinde seri ve paralel olarak bağlanırlar. Burada seri bağlantılar gerilimi, paralel bağlantılar ise çekilebilecek akımı ve kapasiteyi belirler. Bu seri ve paralel bağlı grupların eşgüdümlü çalışabilmesi için Batarya Yönetim Sistemi (BYS) kartları ve bu kartlara bağlı yazılımları kullanılır. BYS kartları bataryanın şarj durumu, sıcaklığı, gerilimi, akımı gibi bilgiler doğrultusunda hücrelerin sağlığını (SoH, State of Health), şarj durumunu (SoC, State of Charge) yönetir ve koruma sağlar.

Batarya paketi genel olarak 4 ana alt gruptan oluşmaktadır ve bunlar ana gövde (Housing), batarya hücre veya modülleri, soğutma grubu ve güç kutusu (Power Junction Box) olarak isimlendirilir (Bknz. Şekil 35).



Şekil 35. Batarya paketinin bileşenlerinin gösterimi (Audi firmasının Q8 e-tron modelinin görselidir)

Ana gövde tasarımı elektrikli araç sektöründe uzun sürelere kadar üzerinde çalışılan bir konudur. Batarya paketinin dışarıdan gelecek etkilerden korunması için tasarlanan en önemli yapıdır. Bu nedenle ana gövdeden beklentiler; darbe dayanımı, sağlamlık, uygun maliyet, kolay üretim ve hafiftir. Öncelikli olarak ana gövdenin spesifik mukavemetinin yüksek olması yani hem hafif hem de mukavemetli bir yapıda olması beklenmektedir. Alüminyum, çelik ve polimer kompozit ana gövde tasarımları mevcut olup değişik üretim teknolojileri (döküm, ekstrüzyon, haddeleme, derin çekme, bükme, lazer kesim, TIG, MIG/MAG gazaltı, lazer kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı, kompozit kalıplama ve yapıştırma vb) kullanılmaktadır.

Modül ve paket üretim süreci, hücre üretim süreci kadar standart hale gelmemiştir. Ticari ürün olarak batarya hücresi, pazar tarafından belirli boyut ve teknik değerlerde sınıflandırılmış olmasına rağmen, batarya modülü ve paketi, enerji depolama veya elektrikli araç uygulamalarının ihtiyacına göre değişiklik göstermektedir.

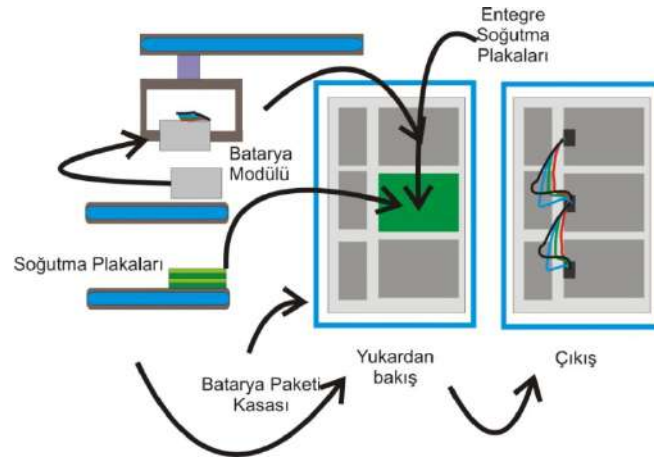
Batarya teknolojilerine bağlı olarak hücreden, modüle ve pakete olan yolculukta son durak paketin oluşumudur. Bu süreç aşağıdaki adımlardan oluşur:

- Batarya paketine hücre/modüllerinin yerleştirilmesi.
- Modüllerin birbirine bağlanması.
- Elektrik ve termal entegrasyon.
- Sızdırmazlık ve sızıntı testi.
- Şarj kontrolü.
- Hat sonu işlemleri.

1.3.1. Batarya Paketine Hücre/Modüllerinin Yerleştirilmesi

Batarya paketlerinin yapısı ve kabloları, tasarım kriterlerine bağlı olarak yapılır. Tam elektrikli araçlarda (EA) yüksek enerji hücreleri, fişli hibrit elektrikli araçlarda (FHEA, Plug-in hybrid electrical vehicle) yüksek güç hücreleri bulunur. Buna göre buradaki anlatım 4 adet seri, 3 adet paralel (4S 3P) modüller içerirken ihtiyaca göre farklı paralel ve seri tasarımlar yapılabilir (Ör.: 6S 3P, 12S 1P vb. S=Seri, P=Paralel).

- Batarya paketlemesine başlamadan önce çalışanların mutlaka yüksek gerilim güvenliği eğitimi alması ve koruyucu ekipmanları tanıması gereklidir.
- Koruyucu tüm ekipmanlar kullanılmadan montaj işlemi kesinlikle yapılmamalıdır.
- Modül bağlantıları güvenli bir şekilde konumlandırılmalı ve montaj işlemini engellememelidir.
- Modül ve batarya paketlerinin taşınmasında iş sağlığı ve güvenliğine dikkat edilmeli hem montaj hem de taşıma esnasında mümkünse robotik uygulamalardan faydalanılmalıdır.
- Çalışma sırasında modülleri soğutmak için gerekli soğutma plakalarının batarya paketi tabanına yerleştirilmelidir. Bu işlem mekanik veya ısı yardımıyla yapılabilir.
- Batarya modüllerinin, paketin alt kısmındaki uygun tutucular aracılığıyla paket muhafazasına yerleştirilmesi gereklidir.
- Tüm modüllerin yerleştirilmesi işlemi Şekil 36'da gösterilmektedir. Her seferinde 3 modül yerleştirilen bir sistem için örnek verilmiştir

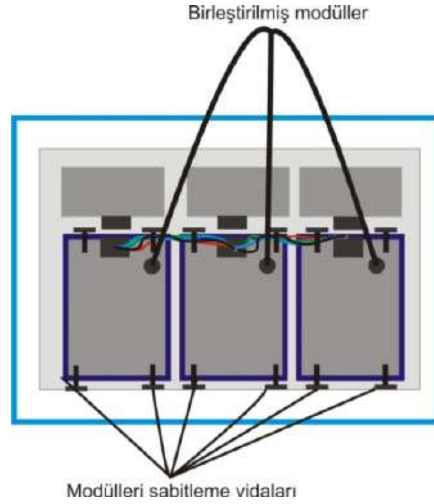


Şekil 36. Üç modüllü batarya paketinin yerleştirme adımları.

1.3.2. Batarya Paketlerinde Modüllerin Birbirine Bağlanması

Bu prosesinde yapılan işlemler aşağıda sıralanmış ve Şekil 37'de görselleştirilmiştir;

- Batarya modüllerinin, örneğin vidalı bağlantılar aracılığıyla batarya paketi muhafazasında öngörülen yerlere hasarsız olarak sabitlenmesi. [**Not:** Bu aşamada ilave vidalı bağlantısı ile rijitlik artırılabilir ve ayrıca çalışma sırasında titreşimlere karşı koruma sağlanabilir].
- Uygun ekipman ve sistemlerin (örn. kamera, montaj yardımcıları, merkezleme pimleri vb.) kullanımı ile doğru ve hasarsız kurulumun sağlanması.
- Vidaları sıkarken dönmenin ve oynaklığın engellenmesi, sıkma işleminin tork kontrollü aletler ile gerçekleştirilmesi. [**Not:** Yapıya bağlı olarak tipik vida boyutları M6 ile M12 arasında değişebilir].

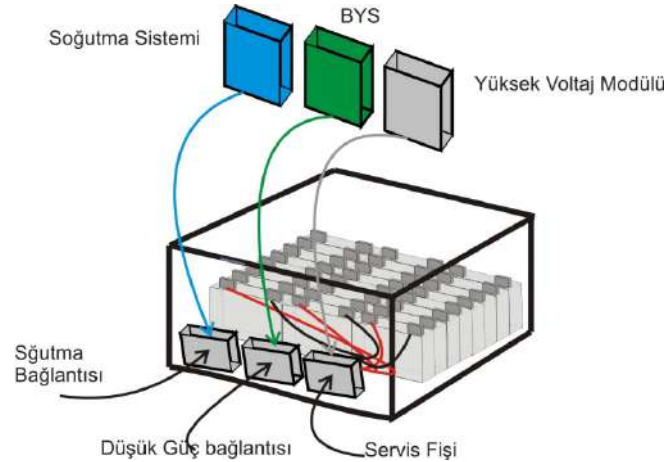


Şekil 37. Modüllerin bağlanma prosesinin adımları.

1.3.3. Batarya Paketi Elektrik ve Termal Sisteminin Entegrasyon Prosesi

Bu prosesde yapılan işlemler aşağıda sıralanmış ve Şekil 38’de görselleştirilmiştir;

- Soğutma sistemi, batarya yönetim sistemi, yüksek gerilim modülü genellikle önceden monte edilmiş parçalar halinde getirilmesi,
- Soğutma sisteminin sağlanan tutucuya konumlandırılması ve paket muhafazasındaki soğutma elemanlarına bağlanması,
- Röle, sigortalar, ön şarj akımı ölçüm sistemi, izolasyon izleme vb. bileşenlerden oluşan yüksek gerilim (HV) modülünün montajı,
- HV ve düşük gerilim (LV) kablo demetinin modüllere ve çevre birimlerine bağlanması,
- Soğutma sistemini, modülleri, yardımcı devre kartlarını ve yüksek gerilim modülünü kontrol etmek için batarya yönetim sisteminin (BYS) kurulumu ve kablolanması,
- Gerilim 60 V'un üzerindeyse özel eğitilmiş çalışanlar tarafından kurulum işleminin yapılması (gerilim altında çalışma ve batarya riskine karşı montaj teknisyenlerinin duyarlı hale getirilmesi),
- Araç entegrasyonuna hazırlık olarak bağlantıların, valflerin ve fişlerin dış muhafazaya bağlanması.

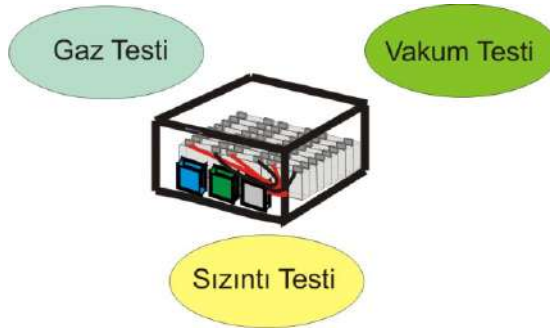


Şekil 38. Batarya paketi elektrik ve termal sisteminin entegrasyon adımları.

1.3.4. Batarya Paketi Sızdırmazlık ve Sızıntı Testi

Bu prosede yapılan işlemler aşağıda sıralanmış ve Şekil 39'da görselleştirilmiştir;

- Sıcaklık değişimlerinden etkilenmeyen contaların seçilerek (örn. lastik conta, püskürtmeli veya yapıştırılmış contalar) muhafazanın veya kapağın kenarına yerleştirilmesi
- Muhafazanın üst kısmını veya kapağının yerleştirilip ve (örn. vidalayarak) batarya paketi muhafazasına bağlanması
- Batarya paketinin olası iç basınç oluşumu durumunda koruması ve çalışma sırasında güvenliği için batarya paketi muhafazasına basınç emniyet diskisi takılması
- Basınç emniyet valfini açarak veya bir sızıntı test cihazı kullanarak muhafazada sızıntı olup olmadığını kontrol edilmesi. **[Not: Bu durumda en uygun gaz, düşük atom çapı ve inert olması sebebiyle helyum olup kaçak testi helyum gazı kullanılarak yapılmalıdır. Ayrıca, kaçak dedektörleri kullanarak soğutma devresinin sızdırmazlığı da kontrol edilmelidir].**

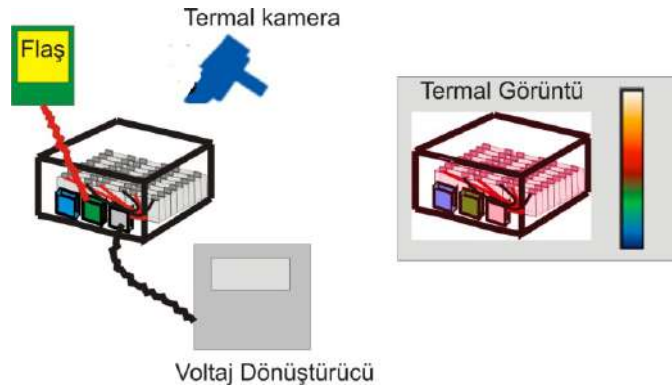


Şekil 39. Batarya Paketi sızdırmazlık testi

1.3.5. Batarya Paketi Şarj Kontrolü

Bu prosede yapılan işlemler aşağıda sıralanmış ve Şekil 40'da görselleştirilmiştir;

- BYS'in bir bilgisayara bağlanması ve bir sistem analiz programı aracılığıyla en son yazılımın yüklenmesi,
- Analiz programını kullanarak tüm sistemlerin doğru çalışıp çalışmadığını kontrol edilmesi,
- Tüm hücrelerin istenen tutarlı şarj durumunu oluşturması,
- Batarya paketinin çalışma sırasında dışarıdan termografik ölçüm sistemi aracılığıyla izlenmesi,
- Basınç oluşumunun izlenmesi.

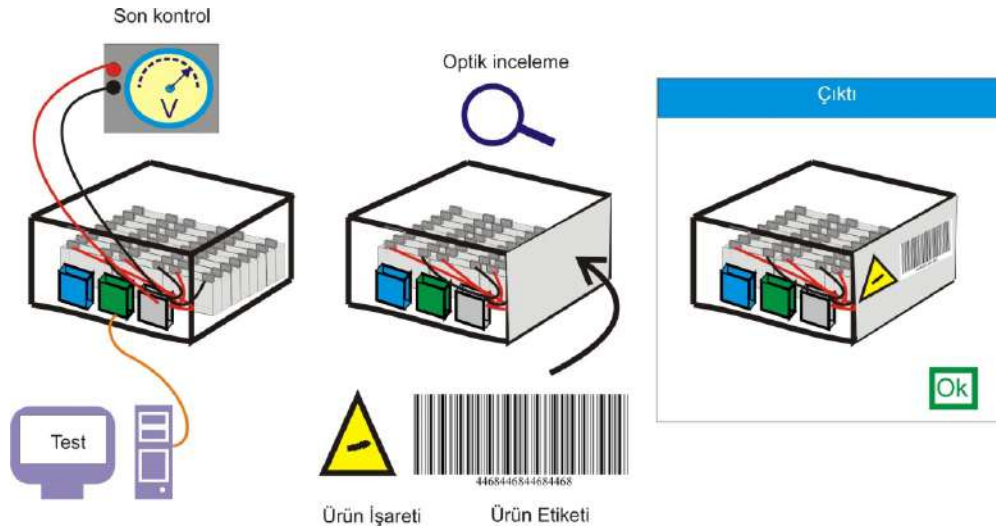


Şekil 40. Batarya paketi şarj kontrol testi şematik gösterimi.

1.3.6. Batarya Paketi Hat Sonu İşlemleri

Hat sonu istasyonunda yapılan işlemler aşağıda sıralanmış ve Şekil 41’de görselleştirilmiştir;

- Test cihazlarının ilgili kablo giriş/çıkışlara bağlanması,
- Tüm elektronik aksamın test yazılımıyla incelenmesi,
- Tüm aksamın gözle kontrolü,
- BYS'nin ve alt bileşenlerinin (sıcaklık sensörleri, yardımcı devre kartı vb.) işlevselliğinin test edilmesi,
- Tanımlanmış bir performans profiline göre bataryayı şarj etme/deşarj etme ve istenen şarj durumunu oluşturma (depolama veya araç montajı için),
- Etiketleri ve uyarıları yapıştırma, "Test Edildi", "OK" gibi işaretlemelerin yapılması ve kalite kontrol raporunun onaylanması,
- Batarya paketinin paketlenmesi ve taşınması.



Şekil 41. Batarya paketi hat sonu işlemlerinin şematik gösterimi

Ülkemizde modül ve batarya paketleme konusunda deneyimli pek çok firma bulunmaktadır. Son yıllarda modül ve batarya paketleme için gerekli makine üretimi konusunda da ülkemizde makine üreticilerinin oluştuğu gözlenmektedir. Tablo 3’de dünyadaki anathar teslim modül ve paket üretim makinelerinin üreticileri yer almaktadır.

Tablo 3. Batarya modül ve paket üretim ekipmanları üreticilerinin bazıları (Int. Kyn. 3).

Firma Adı		Ülkesi
Aumann AG		Almanya
Autowell Technology		Çin
BBS Automation		Almanya
Canline		
COMAU Robotics		İtalya
Digatron Group		
DÜRR Group		Almanya
Dürr Megtec		
Fanuc		Japonya
Fom Technologies		
Han's Laser		Çin
Intecro Robotik		Türkiye
Jorgensen Engineering		Danimarka
Jonnas&Redmann		
JOT Automation		Finlandiya
Grob		Almanya
KUKA Systems		Almanya
Lyric Robot		Çin
Manz Automation		Almanya
Mathews International		
NPB		
PNE Solution		G. Kore
Sew Eurodrive		Almanya
Schuler		Almanya
SK Automation Technology		Çin
Sovema Group		İtalya
Ross		
Team Technik		Almanya

2. ÜRETİMDE KALİTE GÜVENCE SÜREÇLERİ

Bir ürünün kalitesi için malzeme, proses, makine, insan ve çevreye bağlı kontrol edilebilen parametrelerinin istenilen seviyelerde olması, kontrolü ve kontrol edilemeyen parametrelerinde bilincinde olmak oldukça önemlidir. Buna ek olarak özellikle seri üretim yapıldığı durumlarda pratik, ucuz ve en etkin kontrol yönteminin seçilmesi gereklidir.

Elektrikli araçlarda kullanılan hücrelerin performansı araç performansına doğrudan etki eder. Hücre üretim süreci daha öncede belirtildiği gibi genel olarak kimya seçimi, çamur/bulamaç hazırlığı, elektrot üretimi ve hücre montajı olarak sıralanabilir. Her aşamada yönetilmesi gerekli pek çok girdi parametreleri ve kalite karakteristiği (çıkı parametreleri) mevcuttur. Her sürecin sıkı yönetimi, Ar-Ge aşamasında süreç değişiklikleri ve iyileştirmelerin, imalat aşamasında ise kaliteli, yüksek verimli, istikrarlı üretimin temelini oluşturur.

2.1. Hücre kalite kontrol süreçleri

Li iyon hücre elektrotları, aktif malzeme, iletken katkı malzemeleri, polimer bağlayıcı ve organik çözücülerden oluşan elektrot çamurundan üretilir. Bağlayıcı, aktif malzeme, iletken malzeme, çözücü türleri, miktarları, kimyaları ve kullanılan katı malzemelerinin morfolojileri çamurun viskozitesini kontrol için gereklidir. Hücre kapasitesini artırmak için iletken katkı maddelerinin oranını azaltmak ve aktif malzeme oranını artırmak basit bir stratejidir. Öte yandan, pilin iç direncini düşürmek için yeterli miktarda elektrik iletkenliğine sahip olmak önemlidir, bu da uygun miktarda iletken katkı malzemesinin çamur içerisine katılmasını gerektirir.

Seçilen malzemelerin elektrot çamuru içinde düzgün bir şekilde dağılması önemlidir. Aktif malzeme partikülleri ile elektrolit arasındaki yüzey teması reaksiyon alanını artırır ve hücre performansını olumlu etkiler. Ayrıca elektron iletim yolunu sağlayan iletken katkı malzemelerinin homojen dağılımı da önemlidir. Çamuru karıştırmak için uygulanan kesme kuvveti, karıştırma şekli, karıştırma hız, süre ve sıcaklığı kontrol edilmesi gerekli proses parametreleridir. Çamur içerisindeki malzemelerin segregasyonu, kaplamanın homojen olmaması ve şarj/deşarj sırasında ortaya çıkan lokal yük veya reaksiyon yoğunlaşmalarına sebep olacaktır.

Kalite karakteristiği olarak elde edilen çamurun viskozitesi, homojenliği ve reolojisi bir sonraki kaplama adımı için önemlidir. Çamur viskozitesi, reolojisinin ve direncinin ölçülmesi ve burada her üreticinin kendi malzeme karışımına yönelik bir yöntem geliştirmesi gereklidir.

Elektrot üretiminde ilk adım, metal folyo üzerine hazırlanan çamurun ince bir tabaka olarak lamine edilmesi/sıvanmasıdır. Folyo üzerindeki sıvanmış çamur daha sonra kurutulur ve çamur içerisindeki solvent uçurulup bağlayıcının kürlenmesi sağlanır. Son olarak lamine elektrot folyosu haddelenerek sıkıştırılır.

Çamur uygulama prosesinin girdileri folyolar ve hazırlanan çamur olup, proses parametresi ise çamurun folyo yüzeyine sıvanma/lamine edilme hızı ve sıcaklığıdır. Proseste kullanılan kalıp/makine seçimine bağlı olarak hız ve sıcaklık belirlenecektir. Kalite karakteristikleri ise, uygulanacak laminasyonun kalınlığı ve homojenliğidir. Çamurun reolojik ve elektrik özelliklerini etkileyen kontrol edilmesi zor olan bir parametre de çamur içerisinde olası safsızlıklar ve hava kabarcıklarıdır. Bir önceki proseste oluşan aşınmalara veya ortam kirliliğine bağlı olarak çamur içine metalik veya metalik olmayan safsızlıklar girebilir veya karıştırma sırasında bağlı olarak hava molekülleri elektrot içerisinde hapsolabilir. Bu durumda hapsolan hava laminasyon esnasında veya sonrasında kabarcıklanma veya kabarcıkların patlamasına neden olarak laminasyonda heterojenliğe sebep olur. Safsızlıklar ise bu aşamada folyoda yırtılmalara kaplamadan bölgesel kimyasal ve kalınlık heterojenliklerine neden olacaktır. Sonrasında hücrenin çalışması esnasında ise hücredeki reaksiyonları olumsuz etkileyerek kısa devre ve ısınma problemlerine sebep olabilecektir

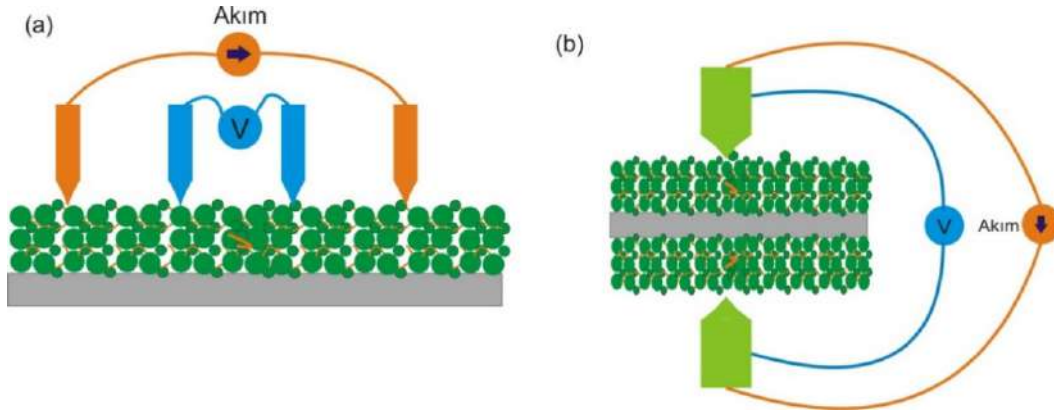
Islak laminasyonun kurutulması aşamasında kullanılan teknik, vakum altında veya hava ile kurutma önemli olduğu gibi kullanılan sıcaklık, süre, vakum miktarı, hava miktarı ve kalitesi de önemlidir. Kuruma esnasında çamurdaki solvent yapıdan uzaklaşacak, bağlayıcı kürlenecek ve poroziteler oluşacaktır.

İkinci husus ise, çamurdaki partiküllerin yeterince homojen ve topaklanma vb. olmadan dağılıp dağılmadığının belirlenmesidir. Dağılım heterojen olursa ağ yapısı kurulmadığından reaksiyonlar kaplama üzerinde homojen olarak gerçekleşmeyecek, kurutma ve sıkıştırma sonrası bölgesel şişme ve büzülmeyle ilgili olarak dökülme veya folyodan ayrılma gibi istenmeyen durumlar söz konusu olabilecektir.

Kaplanan elektrotun metal merdane ile bastırılarak mekanik mukavemetinin artırılması gerekmektedir. Bu işlem elektrot yüzeyini düzleştirmek, kaplamayı sıkılaştırmak ve mekanik olarak bağlanmasını sağlayarak kaplamanın kendi içinde dökülmesinin önüne geçmek ve folyo ile ara yüzeyinde yapışma mukavemetini artırmak için yapılır. Böylece

toplamda elektrotun elektrokimyasal performansı iyileştirilir. Kullanılacak yöntemle ilgili olarak (haddeleme veya aksel sıkıştırma) birim alana uygulanan kuvvet (basınç), süre ve sıcaklık proses parametreleri arasındadır. Burada beklenti elektrot yüzeyinin düzgünlüğü ve elektrolitin kaplanan yüzeyi ıslatması ve elektrot içerisine difüzyonuna izin verecek kadar sıkı bir yapının elde edilmesidir.

Kaliteyi kontrol etmek ve anomallikleri tespit etmek için kaplamanın kalınlığındaki değişiklikleri hem enine hem de boyuna ölçmek gerekir. Kalınlık ve porozite dağılımı yüzeyden ve kesitten optik olarak görüntü olarak yapılabilir. Ayrıca, fiziksel olarak komparatörlerle veya elektrik direnci ölçülerek de gerçekleştirilebilir. 4 probu ölçüm (Şekil 42.a) yönteminde 4 prob elektrotun bir tarafına temas edecek şekilde yerleştirilerek 4 terminalli direnç ölçümü gerçekleştirilir. Geçiş direnci ölçümünde elektrot, plaka elektrotları arasına sıkıştırılır ve elektrik direnci, 2 terminalli direnç ölçümü kullanılarak ölçülür. Bu ölçüm yöntemleri temas direncini (arayüz direncini) veya kaplama direncini aynı anda ölçemez. Ölçümün genel olarak düşük tekrarlanabilirliğinin olduğu bilinmeli ve ölçüm koşullarının dikkatli bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir.



Şekil 42 (a). 4 probu yöntemi kullanarak direnç ölçümü, (b). (2 probu) Geçiş direnci ölçümü

Elektrot üretimi esnasında temizliğin önemi daha önce detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Temizliğin gereklerinin sağlandığı durum kabul edilse de kaplamaların metal veya metalik olmayan tozlarla kirlenmesi olasılığı mevcuttur. Bu olasılık durumu sadece pil performansının düşmesi değil insan ve çevre sağlığını tehdit eden patlamalara kadar gidebilir. Bu nedenle mutlaka kirliliklerin tespitinin elektrot üretim aşamasında sarım öncesi gerçekleşmesi gereklidir.

Demir, bakır, alüminyum vb. gibi metal kirleticiler şarj sırasında elektrolit içinde çözünebilir ve negatif elektrot üzerinde oldukça dallanmış veya dendritik birikintilere neden olabilir. Bu durum kapasite azalmasına ek olarak, pozitif ve negatif elektrotlar arasında bir kısa devre oluşmasına neden olarak patlamaya veya başka bir kazaya neden olabilir. Elektrotların yüzeyindeki safsızlıkların demir esaslı olması durumunda hasarsız manyetik ayırma yöntemi kullanılarak veya malzeme özelliği farketmeksizin X ışınları kullanılarak yapılabilir. Eğer kirlilikler elektrot üretiminin formasyon veya yaşlandırma aşamalarına kadar tespit edilmezse her ne kadar maliyetler artmış olsa da olası yanma veya patlama riskini bertaraf için BYS sisteminde sıcaklık anomaliliklerinde termal kameralar ile veya sensörler ile de durum tespiti yapılmakta ve hücrenin sağlığı incelenmektedir.

Terminal ucu (tab) kaynaklarının kalitesi, hücrelerin tam performansını göstermesinde önemli bir rol oynar. EA uygulamalarında çıkış kaybını ve ısı üretimini en aza indirmek özellikle önemlidir. Bu amaçla, kaynakların 0Ω 'a yaklaşan süper düşük dirence sahip olması istenmektedir. Genel olarak kusurlu ve kusurlu olmayan ürünler, $0,1 \text{ m}\Omega$ veya daha düşük düzeydeki kaynak direncine göre sınıflandırılır. Mühendisler, $1 \mu\Omega$ veya daha düşük çözünürlükte direnç ölçümü için ideal olan bir direnç-ölçer seçmelidir.

Hücrenin yalıtılması gereken ana parçaları arasında elektrotlar ve muhafaza bulunur. Yalıtılması gereken bileşenlerin yalıtımının yetersiz olması durumunda, hücrenin ömrünün kısılmasına veya yangınla sonuçlanan bir kazaya neden olabilir. Yalıtım direncinin eksikliğinin başlıca nedenleri metalik malzeme ile kirlenme ve ayırıcı yırtıklarıdır. Negatif elektrot ile muhafaza arasında izolasyon kusurları olan hücrelerin arızalı olarak tanımlanması özellikle önemlidir.



Şekil 43. Pil hücrelerinin yalıtım direncini ölçmek için kullanılan “Yalıtım Test Cihazı” (Hioki firmasının ürün görselidir.)

Yeterli izolasyon direncini sağlamak için, elektrolit dolumundan önce hücrelerinin izolasyon direnç testinin yapılması önemlidir. Yalıtım direnci ölçüm cihazları, yalıtım direnci testini gerçekleştirmek için kullanılır. Yalıtım direnci ölçerler, yüksek direnç değerlerini ölçmek için özel olarak tasarlanmış bir tür direnç ölçerdir (Bknz. Şekil 43). Yalıtım direnci ölçerler yalıtkanlara yüksek voltaj uygular, akan akımı ölçer ve karşılık gelen direnç değerini hesaplar. Bu cihazlar, çok küçük pikoamper (pA) ve femtoamper (fA) akımlarını doğru bir şekilde tespit edebilen son derece hassas ampermetrelerle donatılmıştır. Yalıtım direnci ölçümünde ölçüm sinyalleri çok küçük olduğundan, ölçülen değerler harici gürültüye veya kaçak akımlara karşı oldukça hassastır. Bu süreçte uygun ölçüm ortamının hazırlanması ve ölçülen değerlerin kararlılığı önemlidir.

Elektrolit dolumundan önce izolasyonun uygun olduğu doğrulansa bile, elektrolit dolumundan sonra yeni elektrik yolları oluşursa yalıtım kusurları meydana gelebilir. Sonuç olarak, elektrolit doldurulduktan sonra izolasyon durumunun doğrulanması son derece önemlidir. Ancak elektrolit doldurulmadan önce olduğu gibi burada da yüksek voltajda izolasyon direnci ölçümü yapılırsa, yüksek voltaj elektrolitin ayrışmasına neden olabilir ve hücrenin performansını etkileyebilir.

Negatif elektrot ile muhafaza alüminyum arasında bir yalıtım kusuru ve alüminyum kılıfının lamine filminde bir çatlak oluştuğu durumda alüminyum negatif elektrottan daha yüksek potansiyele sahip olduğundan arayüzde bir indirgeme reaksiyonu meydana gelecek ve Li-Al alaşımının oluşmasına yol açacaktır. Bu Li-Al alaşımının son derece kırılğan yapısından dolayı muhafaza alüminyumunda küçük deliklerin oluşmasına neden olabilir. Bu deliklerinden hücre içerisine su moleküllerinin difüzye etmesi ile üretilen Li iyon pilin hizmet ömrü önemli ölçüde azalacaktır. Başka bir potansiyel sorun ise elektrolit ile muhafaza arasındaki reaksiyon sonucu alüminyumun daha düşük potansiyele sahip olması nedeniyle oksitlenmesidir.

Montajı bitmiş hücrelerde (hücre performans testi) negatif elektrotun toplayıcısının bozunmasını, tozlaşmasını/pulverizasyonunu önlemek için elektrolit dolumundan hemen sonra hücrenin ön şarjının yapılması gerekir. Negatif elektrotun yüzeyinde düzgün bir katı elektrolit ara yüzeyinin (SEI) oluşumunu kolaylaştırmak için ön şarj düşük akım uygulamaktır. SEI'nin kalınlığı, tekrarlanan ön şarj yoluyla kademeli olarak artırılabilir. Hücrenin ön şarjı için kullanılan şarj/deşarj sistemi, ön şarj için yeterli çıkış voltajına ve akım kapasitesine sahip olmalıdır. Elektrolit doldurulduktan sonra batarya voltajı negatif olabileceğinden, negatif voltajda şarj etme işlevselliği sağlayan bir şarj/deşarj sisteminin kullanılması tercih edilmelidir. Şarj/deşarj protokolünün, hücrenin özelliklerini değerlendirmek için uygulanması gerekecektir. En temel kapasite ölçümü, sabit akım/sabit gerilim (CC-CV) modunda şarj edilmesi ve sabit akım (CC) modunda boşaltılmasıyla yapılır. Darbeli şarj/deşarj modu, kısa bir süre içinde büyük miktarda akım gerektiren cihazlar için gerçek yükleri simüle etmek amacı ile kullanılır. Ayrıca, örneğin bir motorun invertör akımındaki yüksek frekanslı dalgalanmayı simüle etmek için gerçek yükleri daha ayrıntılı bir şekilde sağlayabilen şarj/deşarj sistemleri de vardır. Sabit dirençlideşarj modu ve sabit güç modu gibi diğer modlar, hücrenin kullanılacağı uygulamaya bağlı olarak kullanılır.

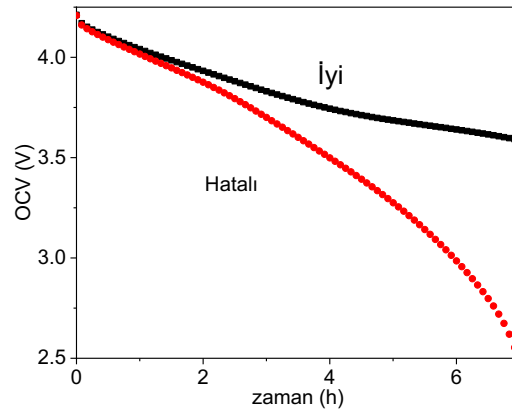
Hücre özellikleri sıcaklığa göre değiştiğinden, şarj/deşarj testi sırasında hücrenin sıcaklığının yönetilmesi önemlidir. Hücre performanslarının doğru bir şekilde araştırmak için klimatize oda gereklidir. Hücrenin iç kısmının eşit bir sıcaklığa ulaşmasını sağlamak için bu test odasında istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra bir süre bekletmek tipik bir uygulamadır. Bekleme süresinin hücrenin hacmine (ısı kapasitesi) göre belirlenmesi gerekir.

Bazı şarj/deşarj sistemleri,deşarj gücünün test cihazının devresi tarafından yakalanıp şarj akımı olarak kullanılabilmesi için güç rejenerasyon işlevine sahiptir. Şarj/deşarj sistemleri önemli miktarda güç kullandığından, bu özellik enerji tasarrufu yapılmasına ve ısı dağılımının sınırlandırılmasına yardımcı olur.

Şarj/deşarj sistemi için sağlanması gereken maksimum güç, hücrelerle mi yoksa modüller ve paketlerle mi kullanılacağına bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Cihaz, uygulama için gereken çıkış voltajına ve şarj/deşarj akımına göre seçilmelidir.

Bazı hücrelerde dendritlerin kademeli olarak büyümesi pozitif ve negatif elektrotlar arasında mikro kısa devrelere yol açacaktır. Bu tür hücreler gelecekte büyük ölçekli kısa devre riski taşıdığından, bunların üretim süreci sırasında güvenilir bir şekilde ortadan kaldırılması gerekir. Pozitif ve negatif elektrotlar arasındaki mikro kısa devreler açık devre voltajını (Open Circuit Voltage, OCV) düşürdüğünden, voltaj değerlerinin test edilmesi arızalı hücrelerin tespitinde etkili bir yöntemdir. Normalde bu tür testler, yaşlandırma süreci sırasında OCV'deki değişimin ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Elektrotların yüzeyine yapışan iletken malzemelerde mikro kısa devreleri oluştururlar ve önceki işlemler sırasında tam olarak tespit edilemez. Yaşlandırma süreci sırasında OCV ölçümü kullanılarak test yapılması gereklidir.

OCV'deki değişimin miktarı son derece küçüktür, bu da uzun bir yaşlandırma sürecini gerekli kılar. Başarılı/başarısız kararı vermek için en az 100 - 200 saat ve bazen birkaç hafta süren yaşlandırmadan önce ve sonra OCV'yi ölçmek tipik bir uygulamadır. Gerilimdeki küçük değişikliklerin tespit edilebilmesi için μV mertebesinde mükemmel doğruluk ve hassasiyet sunan bir voltmetre kullanılması gereklidir. Zaman geçtikçe kusurlu ve kusurlu olmayan hücrelerin OCV'sindeki fark artarak tespit daha kolay hale gelir. Ancak aşırı uzun süre yaşlandırma, iletkenliği zayıflatabilir (Bknz. Şekil 44). Kullanılan voltmetre yeterli hassasiyet ve doğruluk sağlıyorsa, kısa bir yaşlandırma süreci sonrasında da arızalı ve arızasız hücreleri ayırt etmek mümkün olacaktır. Hücre voltajının (4 V civarında ve en az milivolt hassasiyet seviyesinde) doğru ölçümlerini yapabilen bir dijital multimetre veya voltmetre seçmek özellikle önemlidir.



Şekil 44. Yaşlandırma sırasında batarya voltajındaki değişim

Bir hücrenin özellikleri, iç direnç değerine göre büyük ölçüde değişir. Yüksek iç direnç, enerji kaybının artmasına neden olarak performansın düşmesine neden olur. Ayrıca kullanım sırasında hücrede oluşan ısı, bozulma sürecini hızlandırır. Genel olarak, düşük iç dirence sahip hücreler olumlu özellikler gösterir. İç direnç değerleri, hücre özelliklerinin bir göstergesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.

Hücrenin iç direncini ölçmek için AC yöntemi ve DC yöntemi olmak üzere iki yöntem mevcuttur. DC yönteminde hücre sabit bir akımda deşarj edilir ve iç direnç, deşarj akımı değerinden ve belirli zamanlarda ölçülen voltaj düşüşünden hesaplanır. Yöntem öncelikle büyük akım özelliklerinin gerçek kullanımı öngörecekte test edilmesinde kullanılır.

Buna karşılık, iç direnci ölçmek için kullanılan AC yöntemi, hücreye çok küçük bir AC sinyali uygulayarak voltajın dirençli bileşenini ve reaktif bileşenini tespit etme prensibine göre yapılır. AC yöntemi, hücrelerin performansını ve kalitesini değerlendirmek amacıyla iç direnç ölçümünde yaygın olarak kullanılmaktadır; çünkü yüksek oranda tekrarlanabilir ölçümler küçük bir aletle kolaylıkla yapılabilir ve ölçümler hızlı bir şekilde tamamlanabilir. Ayrıca DC yönteminde hücrenin deşarj olması nedeniyle ölçüm işlemi hücrenin şarj durumunun değişmesine neden olur. Bu tür değişimlerin sorun yaratacağı uygulamalarda AC yöntemi seçilmelidir.

Sevkiyat ve kabul muayene hatlarında empedans belirli bir frekansta (genellikle 1 kHz) ölçülür. Dirençli ve reaktif bileşenler hesaplanır ve yalnızca dirençli bileşen etkin direnç değeri olarak görüntülenir. Bu yaklaşım, hızlı olması nedeniyle özellikle seri üretim testlerine ve kabul denetimlerine çok uygundur.

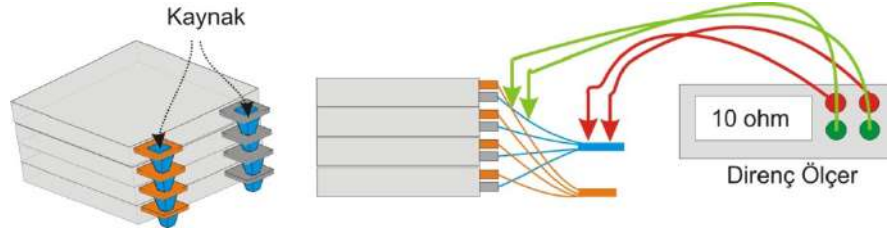
2.2. Batarya modül kalite güvence süreçleri

Elektrikli araçlar batarya paketlerinin toplam voltajı birkaç volttan yüzlerce (48 V, 72 V, 400 V ve 800 V) Volt'a kadar değişebilir. Birden fazla hücre bağlandığında aşağıdaki elektrik testleri gereklidir:

2.2.1. Modüldeki Terminaller (tab) Arasındaki Kaynak/ Bağlantılar İçin Kalite Kontrolü (direnç ölçümü)

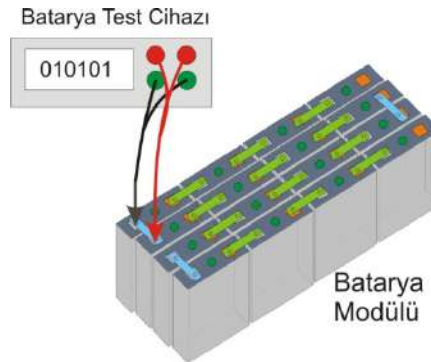
Alçak gerilim modüllerinin ölçümü: Modülerleştirme işlemi sırasında, çok sayıda hücrenin metal terminal uçları bir araya getirilip sabitlenerek veya kaynak yapılarak birbirine bağlanır. Hücrelerden yüksek akım geçtiğinde çok küçük direnç değerleri bile yüksek enerji kaybına yol açabilir. Hücreden maksimum fayda sağlamak için terminaller arasındaki bağlantıların kalitesi son derece önemlidir. Kaynakların son derece düşük dirence sahip olması arzu edilir. Standart 21700 tipi silindirik Li iyon hücre için iç direnç yaklaşık 20 m Ω 'dur ve bu değer büyük kese tipi Li iyon hücre için 1 m Ω 'dan azdır. Sonuç olarak, kaynak direncinin kalite kontrolü için ölçüm cihazının 0,1 m Ω veya daha düşük direnç değerlerini belirleyebilecek nitelikte ve en az 1 $\mu\Omega$ çözünürlükte olmasını gerektirir.

Kaynaklanan her iki terminal aynı potansiyeli paylaştığından, ölçümün doğru yapılması durumunda ölçüm terminalleri arasında bir gerilim olmaması gerekir. Bu koşullar altında kaynak direncini yüksek hassasiyetle ölçmek için bir DC direnç ölçer kullanmak en iyisidir. Şekil 45'de çoklu terminal kaynağı direnç ölçümü şematize edilmiştir.



Şekil 45. Çoklu hücrelerde terminal kaynağı direnci ölçümü

Yüksek gerilim modüllerinin ölçümü: Batarya modüllerinin kaynak direncini ölçerken DUT (Device Under Test) voltajına dikkat etmek gerekir. Örneğin, 20 hücrenin seri olarak bağlandığı bir modülün terminalleri boyunca maksimum voltajı yaklaşık 74 V olacaktır. Bara bağlantıları yanlışsa veya bir ölçüm probu yanlışlıkla bir terminalle temas edecek şekilde yerleştirilirse modül voltajı cihaza geçebilir. Normalde, DC direnç ölçerler bu tür voltaj girişini kaldıracak şekilde tasarlanmamıştır, bu nedenle aşırı büyük voltaj girişi cihaza zarar verebilir. Güvenlik açısından yüksek voltajdan kaynaklanan bu tür hasar ve kazaları önlemek için, yüksek voltaj direncini yüksek hassasiyetli direnç ölçüm kapasitesiyle birleştiren bir test cihazının (AC direnç ölçer) kullanılması önerilir. Bu tür bir kullanım son derece düşük direnç değerlerinin ölçülmesini gerektirdiğinden, cihazı kullanılırken sıfır ayarının doğru şekilde yapılması da ayrıca tavsiye edilir (bknz. Şekil 46).



Şekil 46. Batarya test cihazı güvenli direnç ölçümü şematik gösterimi

Modüllerin ve paketlerin toplam direnç testi: Son değerlendirme olarak montajı yapılan hücreler toplam direnç ölçümüne ve OCV ölçümüne tabi tutulur. Bu testler çoğunlukla, sevkiyat ve kabul muayeneleri sırasında gerçekleştirilir. Toplam direnç hücrenin iç direncini de içerdiğinden AC yöntemi kullanılarak yapılmalıdır. Hücre voltajı yaklaşık 4 V olmasına rağmen batarya modül ve paket voltajı değerleri 48 V, 350 V ve 1000 V'tur. DUT'un toplam voltajını ve terminal-toprak voltajını aşan nominal giriş voltajına sahip bir ölçüm cihazının seçilmesi gerekir.

2.2.2. BYS Kartlarının Test Edilmesi

Batarya paketleri, tek tek hücreleri izleyen ve kontrol eden batarya yönetim sistemi (BYS) kartlarını içerir. Batarya performansını en üst düzeye çıkarmak için BYS'nin batarya kontrolünü optimum şekilde gerçekleştirmesini sağlamak önemlidir. BMS kartları aşağıdaki rolleri oynar:

- **Hücre voltajının ölçülmesi:** BYS, hücrelerdeki aşırı voltaj ve düşük voltaj durumlarını tespit etmek (başka bir deyişle bataryanın aşırı şarj ve deşarjını tespit etmek) için hücre voltajlarını ölçer. Bu fonksiyon, batarya paketinin güvenli bir voltaj aralığında kullanılmasını mümkün kılar.
- **Hücre dengeleme kontrolü:** Özellikler her zaman hücreden hücreye değişmektedir. Değişim oldukça küçük olsa bile, bataryanın uzun süre kullanılmaması veya kullanım sırasında tekrarlanan şarj/deşarjlar hücrelerin kalan kapasitesinde önemli farklılıklara neden olabilir. Batarya paketlerini ve modüllerini bu koşullar altında, tek tek hücrelerin aynı artık kapasiteye sahip olmasını sağlayacak şekilde düzenleme işlevi, hücre dengeleme olarak bilinir. Dengeleme, pilin aşırı şarj/deşarj olması gibi anormal hücre durumlarını da önler. Hücre dengelemeyi gerçekleştirmek için **aktif hücre dengeleme** ve **pasif hücre dengeleme** olmak üzere iki teknik kullanılır.

Aktif hücre dengeleme, kalan enerji kapasitesi yüksek hücrelerden düşük kapasiteli hücrelere veya ana şarj devresine taşımak için bir transformatör kullanarak hücreleri dengelemeye yönelik bir tekniktir (böylece enerji geri kazanılır). Bunun aksine, pasif hücre dengeleme, kalan kapasitesi yüksek olan hücreleri boşaltmak ve kapasitelerini kalan kapasitesi düşük olan hücrelerle hizalamak için dirençlerin kullanılmasına yönelik bir tekniktir. Aktif hücre dengeleme, enerji verimliliği açısından üstündür. Ancak, maliyet ve arıza oranı (güvenilirlik) açısından aktif hücre dengelemede ihtiyaç duyulan çok sayıda bileşen, pasif hücre dengeleme ile yarışmasına engel olmaktadır. Pasif hücre dengeleme iki teknik arasında daha yaygın olanıdır.

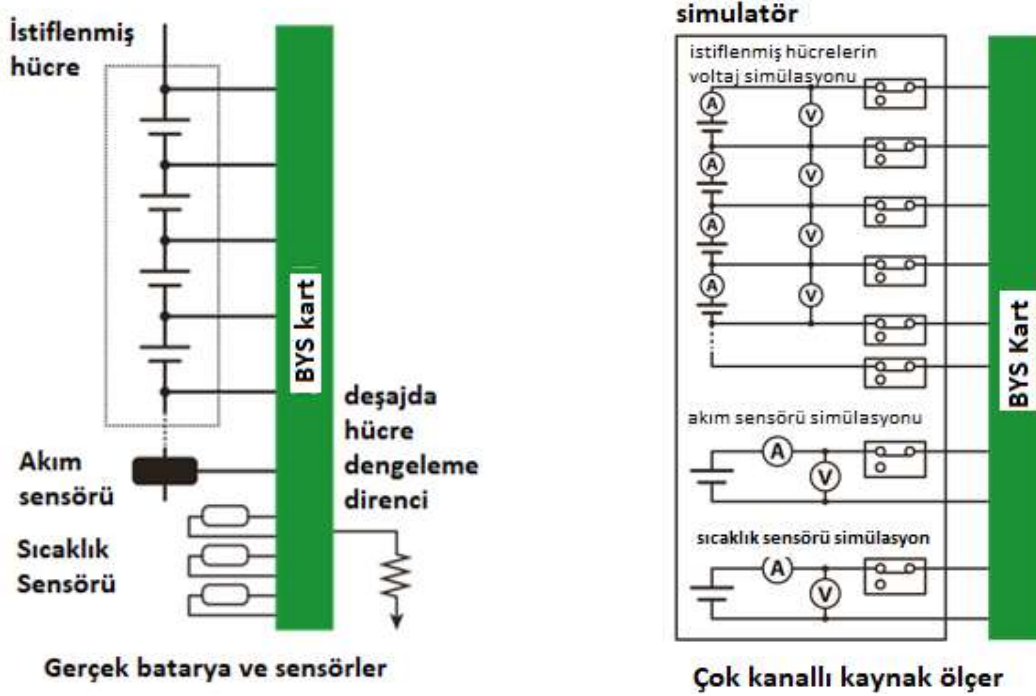
- **Batarya sıcaklığının ölçülmesi:** BYS kartları anormal ısınmayı tespit etmek için hücre yüzey sıcaklığını ölçer. Ayrıca hücre özellikleri sıcaklığa bağlı olduğundan hücrenin kalan kapasitesini tahmin etmek için de bu bilgi gereklidir.
- **Bataryanın şarj durumunu (SOC) ve sağlık durumunu (SOH) tahmin etme:** Bazı BYS kartları, daha güvenli kullanımı kolaylaştırmak amacıyla bataryanın kalan kapasitesini ve sağlığını tahmin etmeye yönelik tasarlanırlar. BYS kartları geniş bir yelpazede karmaşık ve önemli işlevler sağlar ve bu işlevselliğin test edilmesi son derece önemlidir. Üreticiler bu tür testleri BYS'nin geliştirilmesi ve üretimi sırasında gerçekleştirirler.

BYS'i test etmek için BYS'e bir batarya veya eşdeğer bir cihazın bağlanması gerekir. Doğal olarak bu tür testleri gerçekleştirmek için gerçek bir batarya kullanılabilir. Ancak batarya özellikleri bataryanın durumuna (şarj durumu, sıcaklık, sağlık vb.) göre büyük ölçüde farklılık gösterdiğinden testler aynı koşullar altında gerçekleştirilemez. Bu nedenle gerçek bataryalar kantitatif testlerde kullanıma pek uygun değildir. Ayrıca BYS fonksiyonlarının çalışmasının birçok koşulda kontrol edilmesi gerekli olmasına rağmen istenilen özelliklere sahip bataryaların üretilmesi mümkün olmamaktadır. Test yalnızca batarya voltajının değiştirilmesini içerse bile, pilin gerçekten şarj edilmesi ve boşaltılması ihtiyacı nedeniyle bu işlem zaman alacak ve bu da bataryayı verimsiz hale getirecektir. Kantitatif ve tekrarlanabilir testler yapılmak istendiğinde gerçek bataryaların kullanılmasından kaçınılmalıdır.

BYS'e bir güç kaynağı bağlanır. Güç kaynağından BYS'e bir hücrenin davranışını simüle eden bir voltaj girebilir ve BYS'nin hücrenin davranışını doğru şekilde değerlendirip değerlendirmedeği test edebilir. Ancak BYS kartının batarya voltajı izleme işlevini kontrol etmek için hücrelerinin her birine bir güç kaynağı bağlanması gereklidir. Akım ve sıcaklık ölçüm değerlerini simüle etmek için daha da fazla güç kaynağına ihtiyaç olacaktır. Bataryanın davranışını simüle etmek için tüm bu güç kaynaklarının karmaşık bir kontrole ihtiyacı olacak ve bu kontrolün uygulanması muhtemelen zaman ve para açısından önemli maliyetlere yol açacaktır.

Son yıllarda giderek daha hassas hale gelen BYS IC'lerini (IC: entegre devre) test etmek için yüksek voltaj çıkış hassasiyeti gerekli olsa da, bu düzeyde hassasiyet sağlayan ticari olarak temin edilebilen çok fazla güç kaynağı yoktur.

Çok kanallı, yüksek hassasiyetli voltaj jeneratörleri ticari olarak mevcut olup bu cihazlardan bazıları BYS testi için basitleştirilmiş kontrolün yanı sıra birim başına çok sayıda kanal sunarlar (Şekil 47).



Şekil 47. (a) Gerçek bir pil ve sensörler kullanan bir değerlendirme cihazı (b) Bir simülasyon sisteminin örnek mimarisi (Int. Kyn. 4).

BYS test sistemi ile ilgili olarak aşağıdaki önlemler alınmalıdır:

- **Doğruluk spesifikasyonları**

BYS IC'leri son yıllarda daha hassas hale gelmiş olup BYS test sistemlerinin yüksek hassasiyette voltaj üretimi ve ölçümü yapabilmesi sağlanabilmektedir. Bu tür sistemlerin en azından IC'nin voltaj ölçüm hassasiyetinden daha yüksek hassasiyete sahip olması istenir.

- **Maksimum çıkış akımı**

BYS test sistemleri, hücre dengeleme sırasında en azından BYS'ye akan akımın çıktısını almak için yeterli performansa sahip olmalıdır. Aktif hücre dengeleme nispeten büyük akımlar (birkaç amper düzeyinde) içerdiğinden, BYS test sistemlerinin büyük akımlar üretebilmesi arzu edilir. Ayrıca kalan kapasitesi düşük olan hücrelere, kalan kapasitesi yüksek olan hücrelerden akım sağlanması gerektiğinden, BYS test sistemleri çift yönlü güç kaynağı (sinyal fonksiyonlu) sağlamalıdır. Buna karşılık, pasif hücre dengeleme, aktif hücre dengelemeye kıyasla daha düşük akımlar kullandığından (birkaç yüz miliamper mertebesinde), bu yaklaşımla kullanılan BYS test sistemlerinin, aktif hücre dengelemede olduğu kadar büyük akımlar üretebilmesine gerek yoktur. Pasif hücre dengelemesi direnç yoluyla deşarja dayandığından kaynak işlevselliği tek başına yeterlidir.

- **Maksimum nominal terminal-toprak voltajı (maksimum bağlanabilir voltaj)**

BYS kartları iki tür mimari kullanır: birinde bir BYS kartı tüm hücre takımına bağlanır, diğeri ise her modüle bir BYS kartı bağlanır. Özellikle ilk mimaride, test sırasında batarya paketlerini simüle edebilen test sistemlerine yönelik artan bir ihtiyaç vardır. Büyük ölçekli batarya paketleri seri bağlı çok sayıda hücreye sahip olduğundan, birden fazla BYS test sisteminin seri olarak bağlanmasıyla test edilmeleri gerekir. Simüle edilebilecek maksimum voltaj, ürün spesifikasyonlarında tanımlandığı şekilde ya maksimum bağlanabilir voltajla ya da topraktan terminale voltajla sınırlandırılır ve bu voltajın paketin genel voltajından daha düşük olması gerekir.

- **Küçük akımların ölçümü**

Hücrelerin daha verimli kullanımını kolaylaştırmak amacıyla BYS panoları, hücre dengeleme devrelerindeki anahtarlardan gelen kaçak akımı, bekleme akımını (sistem açıldığında ancak çalışmadığında tüketilen akım) ve karanlık akımı (sistem açılmadığında tüketilen akım) azaltmak için geliştirilmektedir. Bazı durumlarda BYS'nin sadece çalışma sırasındaki akım tüketimi açısından değil, aynı zamanda bu küçük akımlar açısından da tasarımına uygun davranıp davranmadığını test etmek gerekir. Ancak bekleme akımı ve karanlık akım, hücre dengeleme sırasında akan akımlarla karşılaştırıldığında son derece küçük olduğundan, hücre dengeleme akımlarını ölçmek için

kullanılan akım aralığı kullanılarak kesin olarak ölçülemezler. Bu tür aralıkların maksimum çözünürlüğünde çok küçük bir akım neredeyse ayırt edilemez ve bu da onları çoğunlukla ölçülemez hale getirir. Çalışma akımlarını ölçmeye yönelik aralıklara ek olarak çok küçük akımları ölçmeye yönelik bir aralık sağlayan test sistemleri kullanılması gerekir.

• Tel kopma simülasyonu

Batarya ile BY5 IC arasındaki elektrik temasının kesilmesi durumunda, örneğin hücreyi BY5'ye bağlayan kablodaki tel kopması nedeniyle veya BY5 kartındaki bir bileşen arızası nedeniyle BY5 IC, hücre voltajlarını ölçme ve hücre dengeleme yapma yeteneğini kaybedecektir. Bu gibi durumlarda hücre aşırı şarj, aşırı deşarj olabileceğinden tehlikeli bir durum oluşabilir. Sonuç olarak, çoğu BY5 kartı bu tür kablo kopma durumlarını mümkün olduğu kadar çabuk tespit etmek için geliştirilmiştir. Tel kopma durumlarını simüle etmek için işlevselliği sağlayan bir test sistemi kullanılıyorsa tel kopma tespit testi mutlaka yapılmalıdır.

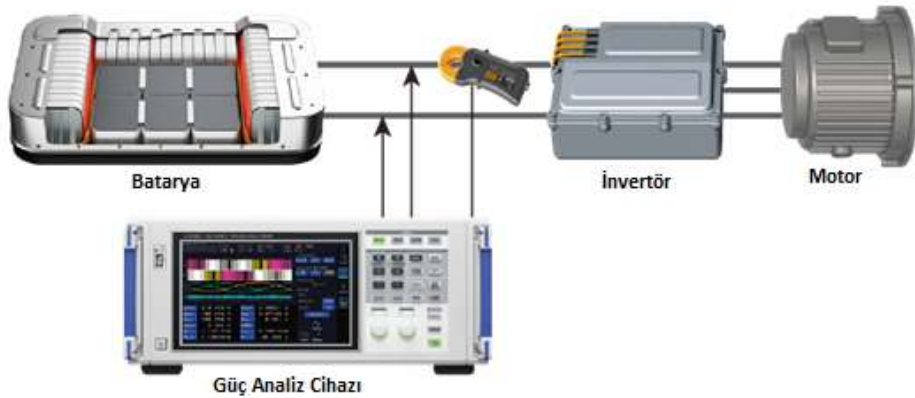
• Direnç oluşumu

Çoğu durumda termistörler, BY5 kartları tarafından hücre sıcaklığını ölçmek için kullanılır. Bu tür uygulamalarda sıcaklık ölçümü, termistörün elektriksel direnç değerinin ölçülüp bu değer sıcaklığa dönüştürülmesiyle gerçekleştirilir. Sonuç olarak, sıcaklık ölçüm devrelerini test ederken direnç oluşturma işlevselliği sağlayan bir test sisteminin kullanılması uygundur.

2.2.3. Elektrikli Araçlardaki Batarya Paketlerinin Gerçek Yük Testi

Bir batarya paketi, EA'da yüksek hızlı, yüksek akımlı yükler altında kullanılacak ise batarya paketinin özelliklerinin ana cihaza gömülükten ölçülmesi önemlidir. Empedans ölçümüne ve şarj/deşarj kapasitesi ölçümüne dayanan testler, yüksek hızlı, yüksek akım kullanımı durumunda hücre özelliklerini doğru şekilde değerlendirme kapasitesine sahip değildir.

Bu tür testlerde güç analiz cihazı (güç ölçüm cihazı) kullanılması önemlidir. Örneğin, Şekil 48'de gösterildiği gibi, aşağı yöndeki invertör ve motorun yanı sıra batarya paketindeki akım ve voltajın ölçülmesi tipik bir uygulamadır. Bu tür kurulumda yalnızca bataryanın gerçek yük özellikleri değil aynı zamanda invertör ve motor gibi alt bileşenlerin tükettiği enerji ve enerji dönüşüm verimliliği de ölçülür.



Şekil 48. EA invertör motorunun gücünün ölçümü (Int. Kyn. 4).

Bir pilin gerçek yük özelliklerini ölçmek için kullanılan bir güç analiz cihazında; akım ölçümü, ölçüm bandı ve doğruluğu ve yeni bir yakıt verimliliği standardı olan WLTP'nin ölçümünü yapabilme kabiliyeti olmalıdır.

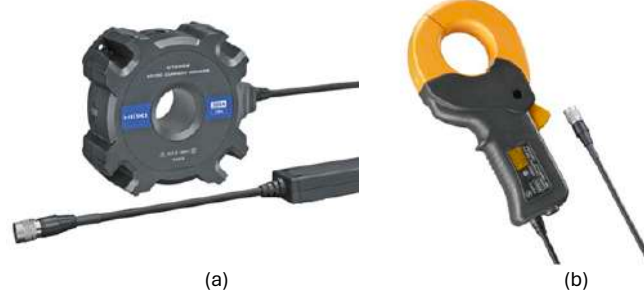
Akım ölçüm yöntemi

Akım şönt direnç kullanarak (doğrudan giriş yöntemi) veya akım sensörü kullanarak (sensör yöntemi) iki farklı yöntem ile ölçülebilir. Genel olarak, doğrudan bağlantı yöntemi küçük akımların ölçümüne, sensör yöntemi ise yüksek frekanslı ve büyük akımların ölçümüne uygundur. Motor invertör girişlerine büyük akımlar aktığından ve bu tür akımlar üst üste binmiş yüksek frekanslı dalgalanmalar taşıdığından, akım sensörlerinin kullanılması daha etkilidir.

Akım sensörleri genel olarak geçişli veya kelepçeli tasarımlar olarak sınıflandırılabilir (Şekil 49). Geçişli sensörler mükemmel frekans bandı, ölçüm hassasiyeti ve kararlılık sunar. Ancak kablonun sensörden geçmesi gerekliliği, hazırlığı daha yoğun emek gerektiren bir hale getirir. Ayrıca, bitmiş araçlara akım sensörlerinin takılması son derece

zordur, bu da bitmiş araç testlerinde doğrudan geçişli akım sensörlerinin kullanılmasını gerçekçi kılmaz. Geçişli akım sensörleri, kablo yönlendirme açısından yüksek derecede serbestlik ve test tezgahı ölçümü gibi gücü yüksek derecede hassasiyetle ölçme ihtiyacı içeren uygulamalar için daha çok uygundur.

Buna karşılık, kelepçeli tasarımlar, düz geçişli muadilleriyle aynı frekans bandını ve ölçüm hassasiyetini sağlayamazlar da, kolaylıkla sabitlenebilmeleriyle bu problem aşılabılır. Bitmiş araçlarda test yaparken kelepçeli bir tasarımın seçilmesi tavsiye edilir. Geçişli sensörün yüksek hassasiyetinin gerekli olmadığı testlerde, kelepçeli tasarımların rahatlığının, test verimliliğinin artmasına önemli bir katkı sağlar.



Şekil 49. a) Geçişli akım sensörü. b) Kelepçeli akım sensörü (Hioki firmasının ürün görseleleridir).

Ölçüm bandı ve doğruluğu

Motor invertör girişlerine büyük akımlar akar ve bu tür akımlar üst üste binmiş yüksek frekanslı dalgalanmalar taşır. Gücü doğru bir şekilde ölçmek için güç analizörü ve akım sensörünün uygun anma akımı, anma gerilimi ve ölçüm frekansı bantlarını sunması önemlidir. Akım sensörlerinin akım değerleri, tepe akım değeri veya RMS (ortalama karekök) değeri cinsinden tanımlanır. Sensör modeli seçerken dikkatli olunması gerekir.

Yeni bir yakıt verimliliği standardı olan WLTP'nin gerektirdiği işlevsellik

Otomotiv yakıt verimliliğiyle ilgili test döngüleri ve yöntemleri ülkeye ve bölgeye göre değişiklik göstermekte ve bu durum, güç aktarma organlarının geliştirilmesindeki her bir parametre için uygun yakıt verimliliği testlerinin kullanılması gerekir. Son zamanlarda, “Uluslararası Uyumlu Hale Getirilmiş Hafif Araç Test Prosedürü” (WLTP), test yöntemlerini standartlaştırma çabasının bir parçası olarak dünya çapında birleşik bir standart olarak oluşturulmuştur. Ülkeler WLTP'nin ne zaman yürürlüğe gireceğine kendileri karar vermekte özgürdür ve ihracatı teşvik etmek amacıyla WLTP'yi standart bir test yöntemi olarak benimsemeyi düşünmektedir. Halihazırda şirketler tarafından WLTP standart bir test yöntemi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.

3. ÜRETİM SÜREÇLERİNDE ENERJİ TÜKETİMİ

Elektrikli araçların üretimi ve kullanımı dünya çapında yaygınlaşmaya başladıkça dünya genelinde hücre üretim tesis yatırımları da artmaktadır. Şekil 50'de Kuzey Amerika, Avrupa ve Asya'da var olan hücre yatırım miktarları verilmiştir ve 1 yıl içerisinde 1 GW sa enerji için Asya'da 55,1, ABD'de 99,6 ve AB'de 105,9 milyon € yatırım yapıldığı görülmektedir.



Şekil 50. Yıllık 1 GW. sa kapasiteli hücre üretim tesislerinin üç kıtadaki yatırım miktarları. (Int. Kyn. 5).

Hücre üreticisi şirketler dışında pek çok şirkette modül ve batarya paket tasarım ve üreticisi olarak batarya ekosisteminde yerini almaktadır. Bu şirketler EA'larla birlikte sabit (grid) ve diğer araç ve sistemlere yeni modül ve batarya paket çözümleri geliştirmektedirler. Batarya depolama sistemlerinin geliştirilmesi ve üretimi bu nedenle önemli ekonomik potansiyele sahip, gelecek vaat eden bir endüstri dalıdır. Son yıllarda elektrikli araç üreticilerinin

modül ve paket üretimini kendi işletmelerinde gerçekleştirme motivasyonunda oldukları da gözlenmektedir. 2023 yılına kadar batarya üretimi, modül üretimi ve paket üretimi ile ilgili iç ve dış kaynak kullanımları incelendiğinde hücre üretimlerinin genelde dış kaynaklı olarak temin edilirken batarya paket üretimlerinin büyük bir kısmı iç kaynaklar ile çözüldüğü görülmektedir. Bununla birlikte yapılan analizlerde gelecekte ise hücre üretimlerinin büyük bir kısmı ve modül ve paket üretimlerinin de hemen hemen tamamı iç kaynaklarla çözüleceği öngörülmektedir (Heimes vd. 2018). Elektrikli araçlar ve batarya hücrelerinin üretimi dünya çapında genişledikçe bu ekosistemin tükettiği enerji ve ürettiği sera gazı (GHG) emisyonlarına ilişkin endişeler giderek artmaktadır. Batarya üretim sürecinde, dahili enerji kaynakları olarak elektrik ve ısıtma için doğal gaz kullanıldığı durumda kaplama ve kurutma, formasyon ve kuru odaların üretimde harcanan toplam enerjinin %76'sını kapsadığı ve tüm sera gazlarının %74'ünü saldığı tespit edilmiştir. Çalışmalar üretimde kullanılan enerjinin temiz enerji olması durumunda doğal olarak emisyonların düşeceğini de göstermiştir. Avrupa'da İsveç elektrik şebekesi en düşük sera gazı emisyon faktörüne sahiptir; Üretimin yalnızca temiz elektrikle gerçekleştirilmesi durumunda, pil hücresi üretiminin genel emisyonları $4,54 \text{ kg } [\text{CO}_{2-\text{eşd}}/\text{kW}\cdot\text{sa}_{\text{hk}} \text{ (hücre kapasitesi)}]$ 'dan $0,53 \text{ kg}'a$ düşürülebildiği hesaplanmıştır. Ancak nükleer enerji İsveç'teki elektrik kullanımının büyük bir kısmını (%30) oluşturmaktadır ve çevresel açıdan sorgulanmaktadır (Degen ve Schütte, 2022).

Kaplama ve kurutma, $10,10 \text{ kW}\cdot\text{sa}/\text{kW}\cdot\text{sa}_{\text{hk}}$ ile doğal gazın en büyük tüketicileri konumundadır. Bu yüksek enerji talebi, 80 m uzunluğundaki fırında $150^\circ\text{C}'ye$ varan yüksek sıcaklığa bağlanabilir. Kuru odalarının çalışması, çoğunlukla nem alma ünitesinin yenilenmesi için $9,06 \text{ kW}\cdot\text{sa}$ doğalgaza ihtiyaç duymaktadır. Vakumla kurutma, formasyon ve yaşlandırma, tüketilen toplam doğal gaz miktarının %10'undan azını oluşturmaktadır. Diğer üretim adımlarının hiçbirisi doğal gaz tedariki gerektirmemektedir.

Formasyon süreci, toplam elektrik tüketiminin ~%50'sini ($9,92 \text{ kW}\cdot\text{sa}/\text{kW}\cdot\text{sa}_{\text{hk}}$) oluşturarak en önemli elektrik tüketicisi konumundadır. Bunun temel nedeni, şarj/deşarj döngüleri sırasındaki tüketilen enerji kayıpları ve tüm hücreler arasında homojenliği korumak için yapılan soğutma işlemidir. Diğer tüm adımlar $2 \text{ kW}\cdot\text{sa}/\text{kW}\cdot\text{sa}_{\text{hk}}$ 'den daha az tüketmektedir.

Batarya hücresi üretimi sırasında tüketilen toplam enerji miktarı, $41,48 \text{ kWsa}/\text{kWsa}_{\text{hk}}$ değerindedir. Bu talebin %52'si ($21,38 \text{ kW}\cdot\text{sa}/\text{kW}\cdot\text{sa}_{\text{hk}}$) kurutma ve kuru odalar için doğalgaz olarak kullanılmaktadır. Geri kalan %48'lik kısım ($20,10 \text{ kW}\cdot\text{sa}/\text{kW}\cdot\text{sa}_{\text{hk}}$), esas olarak batarya hücresi formasyonu için elektrik olarak kullanılmaktadır.

Batarya hücresinin üretimi sırasında tüketilen enerji miktarı, hücre kimyasının değişimine doğrudan bağlıdır. NCA, NMC ve LFP kimyalarında $1 \text{ kW}\cdot\text{sa}$ pil hücresi kapasitesini elde etmek için harcanan enerji miktarı incelendiğinde, nikel esaslı katot içeren Li iyon hücrelerinde $1 \text{ kW}\cdot\text{sa}_{\text{hk}}$ enerjisi üretmek için gerekli enerji $20 \text{ kW}\cdot\text{sa}$ ile $29 \text{ kW}\cdot\text{sa}$ arasında değişmektedir. Li iyon hücre üretiminin enerji tüketimi, enerji yoğunluğu arttıkça azalır. Karbon ve silisyum anotlu NMC900 hücreleri, yaklaşık $20,3 \text{ kW}\cdot\text{sa}$ üretimle Li iyon hücre üretiminde en düşük enerji talebine sahiptir. Özellikle LFP hücrelerinin üretiminde $37,5 \text{ kW}\cdot\text{sa}$ ile diğer tüm hücre kimyalarına göre en yüksek enerji ihtiyacı vardır. Li iyon hücrelerinin üretimde kWsa yerine alana bağlı olarak m^2 başına ortalama tüketilen toplam enerji hesaplandığında bu değer $5,2 \text{ kW}\cdot\text{sa}$ olduğu ve hücre kimyasından bağımsız olduğu görülmüştür. Hücre kimyası $\text{kW}\cdot\text{sa}$ başına etkili parametre iken beklendiği gibi m^2 başına etkisiz kalmıştır (Degen vd., 2023).

Almanya'da bir hücre üretiminde $\text{kW}\cdot\text{sa}$ başına $10,33 \text{ kg CO}_{2-\text{eşd}}$ sera gazı salınmaktadır. Sera gazı emisyonlarının en yüksek payı, $3,04 \text{ kg CO}_{2-\text{eşd}}/\text{kW}\cdot\text{sa}_{\text{hk}}$ değeriyle (toplam sera gazı emisyonlarının ~%30'u) hücre üretiminde oluşmaktadır. Kuru odalar ile kaplama ve kurutma işlemleri, tüm sera gazı emisyonlarının ~%22'sinden ($2,30 \text{ kg CO}_{2-\text{eşd}}/\text{kW}\cdot\text{sa}_{\text{hk}}$) sorumlu olduğu gerçeği yeniden kanıtlanmıştır. Bu üç proses, sera gazı emisyonlarının toplam %73,90'lık ($7,63 \text{ kg CO}_{2-\text{eşd}}/\text{kW}\cdot\text{sa}_{\text{hk}}$) payına sahiptir ve aynı zamanda en büyük enerji tüketicileridir. Diğer üretim adımlarının her biri <%6 paya ($0,6 \text{ kg}$ veya daha az $\text{CO}_{2-\text{eşd}}/\text{kW}\cdot\text{sa}_{\text{hk}}$) sahiptir (Degen ve Schütte, 2022).

Coğrafi konumun hücre üretiminin karbon ayak izi üzerindeki etkisi incelendiğinde Almanya, 2020'de $0,301 \text{ kg CO}_{2-\text{eşd}}/\text{kW}\cdot\text{sa}$ elektrik ve toplam $10,33 \text{ kg CO}_{2-\text{eşd}}/\text{kW}\cdot\text{sa}$ hücre salınımı ile Avrupa'daki en yüksek sera gazı emisyonlarına sahip olan ülkeler arasında yer almaktadır. İsveç, Avrupa'da en düşük sera gazı emisyon faktörüne sahip elektrikli kullanılmaktadır; 2020'de yalnızca $0,013 \text{ kg CO}_{2-\text{eşd}}/\text{kW}\cdot\text{sa}$ salınmış, bu da $4,54 \text{ kg CO}_{2-\text{eşd}}/\text{kW}\cdot\text{sa}_{\text{hk}}$ 'ya karşılık gelmektedir (Degen ve Schütte, 2022).

Polonya'da kullanılan elektrik karışımına göre elektrik üretiminde 2020'de $0,724 \text{ kg CO}_{2-\text{eşd}}/\text{kW}\cdot\text{sa}$ elektrik sera gazı emisyon faktörüne sahiptir ve bu nedenle Polonya'daki $\text{kW}\cdot\text{sa}$ hücre kapasitesi esas alındığında İsveç'in sera gazı emisyonlarının 4 katına yakındır. Fransa, Macaristan ve İngiltere'nin sonuçları İsveç ve Almanya'nın arasında yer almaktadır. Fransa, Macaristan, İngiltere ve İsveç'teki düşük sera gazı emisyon faktörlerinin nükleer enerjinin daha yüksek paylarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, her bölgedeki hücre üretiminin genel sürdürülebilirliğini değerlendirmek için nükleer enerjinin ve nükleer atıkların çevresel etkisi daha fazla dikkate alınmalıdır. Sonuçlar, bir

tesis konumunun Li iyon batarya hücrelerinin sera gazı emisyonları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

4. ÖNERİLER

En son teknolojiye sahip hücre üretimi için enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarına ilişkin doğrudan veriler sınırlı olup güncel ve doğru verilere olan talep ise yüksektir. Bu açığı kapatmak için güncel veri kaynaklarından yararlanılması gereklidir ve bu da verilerin elde edilebileceği gerçek hücre üretimine ihtiyaç duymaktadır. 2019 yılında, hücre üretimi araştırmalarını ilerletmek amacıyla Fraunhofer Enstitüsü tarafından Alman federal hükümetinden 700 milyon € fonla inşa edilen Batarya Hücreleri Araştırma Fabrikasına (FFB) özel erişim hakkı verilmiştir (Eitner, 2019). Son teknolojiye sahip bir araştırma fabrikası olan FFB, küçük pilot üretim hatlarından yüksek kapasiteli üretim hatlarına kadar çok sayıda üretim hattında en son ve gelişen üretim teknolojilerini ve hücre kimyalarını kullanmaktadır.

FFB'de uygulanan yenilikçi teknolojilere örnek olarak -60 °C çığlenme noktasına sahip kuru odalar ve sürekli karıştırma işlemleri örnek gösterilebilir. Teorik çıktısı 7 GW-sa-yıl⁻¹ elektrot kapasitesi olan bu araştırma fabrikası, aynı zamanda mevcut batarya fabrikalarına da yakın mesafede bulunmaktadır. Bu nedenle FFB, en son teknolojiyi kullanan büyük ölçekli hücre üretiminin enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını hesaplamak için benzersiz ancak uygun bir veri kaynağıdır. FFB'de üretim henüz operasyonel olmasa da, merkezin araştırmacıları çok çeşitli üreticilerden alınan makine özellikleri de dahil olmak üzere tüm planlama verilerine özel erişime sahiptir.

Her üretim adımı için enerji tüketimine yönelik üç veya daha fazla makine spesifikasyonu mevcut olduğu bilinmektedir. Buna dayanarak verilerdeki sapmalar dengelenerek ortalama enerji tüketimleri hesaplanmaktadır. Bu sayede büyük ölçekli enerji tüketimi ve son teknoloji elektrikli araç hücresi üretimi için benzersiz ve güvenilir bir veri seti oluşturulmaktadır.

Batarya modülleri ve batarya paketleri büyük miktardaki enerjiyi geçici olarak verimli bir şekilde depolanarak daha sonra gerektiğinde kullanılabilir hale getirme yetenekleriyle geleceğin enerji tedarikinde önemli bir rol oynayacaktır.

Yıllar önce Asya kıtasında ve ABD'de başlayan pil teknolojilerine yönelik Ar-Ge yatırımları ile son kullanıcıya ulaşmış, Avrupa Birliği geride kalmamak için güçlü hamleler yapmış hem Ar-Ge hem de üretime yönelik hızla bu yarışta varlığını kanıtlamıştır. Ülkemizin bu teknolojide sadece kullanıcı olarak kalmaması ve bu pazarın tedarik zincirinin katma değer yaratan ve stratejik alanlarında yer alması gereklidir. Hücre üretimi için gerekli hammaddelerin kimyalarının yerli olarak geliştirilmesi ve bu geliştirme işlemlerinde kullanılan ekipmanların yerleştirilmesi büyük bir öneme sahip iken, hücre üretiminde kullanılan ekipmanların yerleştirilmesi de büyük bir önem arz etmektedir. Ayrıca hücrelerden modüller ve batarya paketlerinin geliştirilmesindeki cihaz ve tesislerin geliştirilmesinde yerleşmenin önündeki engellerin kaldırılarak desteklenmesi, ülke ekonomisi açısından önemlidir. Özellikle katma değeri yüksek ürünler geliştirmek için üreticilerin ve yatırımcıların bu alandaki eksikliğin farkında olmaları sağlanarak gerekli teknolojik desteğin sağlanması gerekir. Burada belirtmek gerekir ki batarya teknolojik yatırımları ülke özelinden daha çok dünya genelinde değerlendirilmeli ve bu bakış açısı ile yatırımlar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Abdollahifar M., Cavers H., Scheffler S., Diener A., Lippke M., Kwade A., 2023 Insights into Influencing Electrode Calendering on the Battery Performance, *Adv. Energy Mater.* 13, 2300973

Bryntesen S.N., Strømman A.H., Tolstorebrov I., Shearing P.R., Lamb J.J., Burheim O.S., 2021 Opportunities for the State-of-the-Art Production of LIB Electrodes—A Review, *Energies* 14(5), 1406

Degen F., Schütte M., 2022 Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production, *Journal of Cleaner Production* 330, 129798

Degen F., Winter M., Bendig D., Tübke J., 2023 Energy consumption of current and future production of lithium-ion and post lithium-ion battery cells, *Nature Energy* 8 1284–1295



Eitner J., 2019. Fraunhofer Begins Setting up a New Research Facility for Battery Cell Production, 406Z.
<https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2019/october/fraunhofer-begins-setting-up-a-new-research-facility-for-battery-cell-production.html>. (Accessed 23 May 2021).

Heimes H., Kampker A., Wessel S., Kehrer M., Michaelis S., Rahimzei E., Battery Module and Pack Assembly Process. PEM of RWTH Aachen and VDMA, 3rd Edition, 2018, ISBN: 978-3-947920-05-1

Heimes H., Kampker A., Wennemar S., Plocher L., Bockey G., Michaelis S., Schüttrumpf J., Production process of a lithium-ion Battery Cell. PEM of RWTH Aachen and VDMA, 4th edition, 2023, ISBN: 978-3-947920-27-3

Küpper D., Kuhlmann K., Wolf S., Pieper C., Xu G., Ahmad J., The Future of Production for Electric Vehicles, 2018, Boston Consulting Group report. (<https://www.bcg.com/publications/2018/future-battery-production-electric-vehicles>)

Niri M.F, Liu K., Apechitei G., Roman-Ramirez L.A.A., Lain M., Widange D., Marco J.,2022, Quantifying key factors for optimised manufacturing of Li-ion battery anode and cathode via artificial intelligence, Energy and AI 7 100129

İnternet Kaynakları

[1] <https://www.zsw-bw.de/en/research/batteries/topics/production-and-process-research.html>

[2] <https://www.ifm.com/de/de/shared/landingpages/e-mobilitaet/batterie-formierung--alterung> (14.04.2024)

[3] <https://www.sdle.co.il/wp-content/uploads/2024/02/grading.pdf> (14.04.2024)

[4] <https://etn.news/energy-storage/li-ion-cell-manufacturing#:~:text=The%20production%20of%20the%20lithium,and%20testing%20the%20battery%20cells> (14.04.2024)

[5] <https://www.hioki.com/euro-en/download/33120> (14.04.2024)

[6] <https://www.volta.foundation/annual-battery-report> (14.04.2024)



BATARYA GÜVENLİĞİ, TEST VE SERTİFİKASYON

D. Uzun¹, E. Biçer² [+]

ÖZET

Üretilen her üründe olduğu gibi tasarım aşamasında mutlaka o ürünün nasıl, ne ile, kim tarafından, ne zaman, hangi şartlar altında hangi test yöntemleri ile test edileceğinin de tasarlanması gereklidir. Günümüzde pek çok ülke ürünlerin test, karakterizasyon ve akreditasyon sistemlerini tasarlayıp yöneterek diğer ülkelere hizmet satmaktadır. Üretici, elektrikli araç ve batarya sektörünün olmazsa olmaz şartlarından olan müşterinin en üst düzey beklediği güvenliği ve performansı üretilen batarya ve araçta sağlayıp sağlamadığını göstermekle yükümlüdür.

Testler genellikle pil ve/veya batarya üreticisinin, müşterilerin belirlediği teknik spesifikasyonları karşıladığını doğrulamak için yapılır. Aynı zamanda hücrelerin olumsuz koşullar veya olağandışı yükler altında ne kadar süre hayatta kalacağını belirlemek, olası arızayı öngörmek ve/veya tanımlanan keyfi sınırlar içinde hücre performansını incelemek için piller test edilebilir. Batarya bileşenleri olan piller ve bunların bağlantıları, kullanım ömürleri boyunca farklı zorluklarla karşılaşacaklar ve sonuç olarak bozulacaklardır. Bu durum güvenlik koşullarını tehlikeye atabilir. Bu sebeple elektrikli ve hibrit araçlar içerisindeki bataryaların dayanıklılığı, güvenliği ve güvenilirliğini doğrulamak için testlerinin yapılması zorunlu hale gelir.

Genel olarak pil ve batarya paketine yönelik testlerde, tekrarlanabilir sonuçların elde edilebilmesi ve anlamlı karşılaştırmaların yapılabilmesi için testlerin sınır koşullarının kesinleşmesi şarttır. Bu koşullar; sıcaklık, deşarj derinliği, yük, gerilim aralıkları ve görev döngüsü olabilir. Bu koşullara göre kullanılacak yöntem belirlenir. Örneğin; hücre kapasitesi ve çevrim ömrü iki temel performans göstergesi olup, testlerin gerçekleştirildiği sıcaklığa ve deşarj oranına bağlı olarak performans değerleri %50 veya daha fazla farklılık gösterebilmektedir.

Tüm tüketici ürünleri, ürünlerin satıldığı ülkelerin güvenlik kuruluşlarının gerektirdiği ulusal veya uluslararası güvenlik standartlarına uymak zorunda olup, bu uygunluğun ortaya konabilmesi için test ve sertifikasyon süreçlerinin uygulanması gerekmektedir. Ülkemizde üretilmiş bir pil ve/veya batarya güvenlik standardı mevcut olmayıp, konu ile ilgili olarak uluslararası güvenlik standartları kullanılmaktadır. Bu standartlara UL (Underwriter Laboratories), ANSI (American National Standards Institute), CSA (Canadian Standards Association) ve IEC (International Electrotechnical Commission) standartları örnek olarak verilebilir.

Elektrikli araçlar için düzenleyici kurumlar tarafından belirlenen birçok test standardı bulunmaktadır. ISO (International Organization for Standardization) tarafından güvenliği kapsayan yayınlanmış 40'tan fazla test standardı vardır. Bunun yanında elektrikli araç bataryası güvenliğiyle ilgilenen diğer bir düzenleyici kurum olan UL en bilinen kurumlar arasındadır. Pek çok standart ve düzenleyici olsa da, pil güvenliği için tasarlanan testlerin neredeyse tamamı, elektrikli araç bataryalarının güvenlik sorunlarına neden olabilecek çeşitli ortam ve şartlara karşı dayanımı esas alan yaklaşımları içermektedir. Bu çalışmada, temel olarak elektrikli araç bataryasına uygulanacak testlerin neler olduğu, bu testlerin gerçekleştirilmesi için nasıl bir altyapıya ihtiyaç duyulduğu ve bu altyapı ile standart yöntemlerin uygulandığı laboratuvarların akreditasyonu için süreçler irdelenmiştir. Bu çalışmada batarya yönetim sistemi testleri ele alınmamıştır.

[+] emre.bicer@sivas.edu.tr

1 Emekli - TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü Gebze Yerleşkesi, Gebze, 41400 Kocaeli, Türkiye.

2 Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Gültepe, 58080 Sivas, Türkiye.



Ülkemizde elektrikli araç bataryası büyüklüğünde (20 kW-sa ve üzeri) bataryaların test edilmesi için bütün testleri karşılayacak kapsama sahip bir batarya test laboratuvarı mevcut değildir. Türkiye’de 20 A-sa kapasiteye kadar pillerin testlerinin gerçekleştirilmesi için altyapı hem özel sektör bünyesinde hem de kamu laboratuvarı bünyesinde mevcuttur. Batarya testi için farklı standartları uygulama kabiliyetine sahip bir elektrikli araç bataryası test altyapısının ülkemizde kurulmasına ihtiyaç vardır. Elektrikli araç pil üreticileri ile elektrikli araç üreticilerinin bir araya gelerek 250 kW-sa kapasiteye kadar batarya testlerini gerçekleştirebilecek bir altyapının kurulmasının sağlanması gerektiği değerlendirilmektedir. Kurulacak bu altyapının elektrikli ve hibrit elektrikli araçların bataryalarının hücre, modül ve batarya paketi seviyesindeki test ve sertifikasyon sürecini bir bütün olarak gerçekleştirebilecek kabiliyette olması gerekmektedir. Bu altyapının bağımsız bir laboratuvar olarak kurulması, akredite edilmesi ve işletilmesi ülkemiz kaynaklarının etkin ve verimli olarak kullanılması açısından önem arz etmektedir.

1. BATARYA ALT BİLEŞENLERİ

Batarya paket tasarımına bağlı olarak istenen gerilim ve akım seviyelerine ulaşılması için piller birbirine seri veya/veya paralel olarak bağlanmaktadır. Bataryanın şarjı için sağlanan elektrik enerjisinin pillere taşınması ve pilde depolanan enerjinin kullanım noktasına iletilmesi için pillerin birbirine akım taşıyıcılar ile bağlanması gerekmektedir. Bu bağlantılar oldukça kritik olup, hem mekanik olarak hem de elektriksel olarak beklentileri karşılayacak özellikte olmalıdır. Batarya ara bağlantıları için bir birleştirme teknolojisinin uygunluğunu değerlendirmek için, disiplinler arası gereklilikleri çıkarmak gerekir. Das ve ekibi bu gereksinimleri dört kategoride tanımlamışlardır (Das vd. 2018).

- Elektriksel ve termal gereksinimler
 - Bağlantı yerlerinde düşük elektrik direnci,
 - Üretim sırasında küçük ısıl girdi,
 - Bağlantı yerlerinin yüksek termal yorulma direnci,
- Malzeme ve metalurjik gereksinimler
 - Düşük korozyon riski,
 - Farklı malzemelerin birleştirilmesi,
 - Çeşitli yüzey koşullarına ve malzemelere uyurlanabilirlik,
- Mekanik gereksinimler
 - Güçlü ara bağlantılar,
 - İyi yorulma ve sürünme direnci,
 - Düşük ön gerilim seviyesi,
 - Birleştirme sırasında mekanik veya titreşim hasarlarından kaçınma,
- Ekonomik gereksinimler
 - Seri üretime uygunluk,
 - Düşük maliyetler,
 - İstikrar ve standardizasyon.

Bataryalar kullanım sürecinde maruz kaldıkları ortam şartlarına ve taşıdıkları yüke bağlı olarak ısı üretebilmektedir. Üretilen bu ısının da bertaraf edilmesi ve belirli şartlarda bataryanın kullanıma hazır durumda tutulması için ısıtma ve soğutma ihtiyacı doğmaktadır. Oluşan ısının bertarafı ve gerekli durumlarda bataryanın optimum çalışma sıcaklığında tutulması amacıyla soğutma/ısıtma sistemi tasarımı ve batarya içerisine montajı yapılmaktadır. Soğutma/ısıtma sisteminin ısı dengesi sağlayarak pil ömürlerini uzattığı bilinmektedir.

Ayrıca, bataryanın etkin şekilde kullanımını sağlamak ve olası güvenlik risklerini minimize etmek amacıyla Batarya Yönetim Sistemi (BYS, Battery Management System) elektrikli araç bataryasının bileşenlerinden bir tanesidir. BYS'nin amacı, sisteme güç sağlayan bataryada depolanan enerjiyi en iyi şekilde kullanarak bataryaya ve sisteme zarar vermemektir. Bu amaca ulaşmak için bataryanın hem şarj süreçleri hem de deşarj süreçleri izlenmeli ve kontrol edilmelidir (Bergveld vd. 2008).

BYS, batarya paketi gerilim ve akımının izlenmesi, bireysel hücre gerilimi ölçümleri, hücre dengeleme rutinleri, paket şarj durumu hesaplamaları, hücre sıcaklığı ve sağlık izleme dahil olmak üzere bataryanın tüm elektronik işlevlerini kontrol eder, genel paket güvenliğini ve optimum performansı sağlar ve araç motor kontrol ünitesi (ECU) ile iletişim kurar. BYS'nin hücrelerden gerilimleri, sıcaklıkları ve ilgili sıcaklık, akım ve voltaj sensörlerinden gelen girdileri okuması gerekir. Buradan, BYS'nin girdileri işlemesi, paket performansını ve güvenliğini kontrol etmek için mantıklı kararlar alması ve çeşitli analog, dijital ve iletişim çıktıları aracılığıyla girdi ve çalışma durumunu bildirmesi gerekir.

Tek tek hücrelerin sıcaklığının ve voltajının izlenmesi, doğrudan her pil modülü yığına monte edilen bir BYS alt modülü tarafından yapılır. BYS ana modül veya alt modüllerden gelen verileri toplamanın ve ECU ile iletişim kurmanın yanı sıra şarj durumunu hesaplama, kontaktörleri etkinleştirme vb. gibi üst düzey işlevleri yerine getirir.

Alt modüller ve ana modül, CAN (Denetleyici Alan Ağı) gibi dahili bir veri yolu üzerinde iletişim kurar. BYS için güç, pil kümesinin kendisi tarafından veya araç üzerindeki standart 12 V kurşun-asit batarya gibi harici bir güç kaynağından sağlanabilir. Bazı durumlarda, ana modüle harici olarak güç verilirken, alt modüllere bağlı oldukları pil modüllerinden güç verilebilir.

Güvenli bir araç kullanımı için batarya paketi içerisinde yer alan bileşenlerin bağlantı öncesi kontrolünün yanı sıra kullanım sırasında, her bir bileşenin fonksiyonunu uygun şekilde yerine getirmesi ve araç yönetim sistemleri ile haberleşmesinin verimli bir şekilde sağlanması için gerekli gücün süreklilik dahilinde araca sağlanması gerekmektedir. Bataryanın gerçek dünya koşullarında güvenilir bir şekilde istenen gücü sağlayabilmesi ve test edilmesi için bir yöntem ihtiyacı duyulacaktır. Bu sebeple batarya paketine yönelik fiziksel girdilerin ve harici bağlantıların simüle edilmesi, eş zamanlı olarak paket çıktılarının tasarımı uygun olarak beklentileri karşılama izlenmesini gerekmektedir.

Bataryanın maruz kalabileceği tüm koşulların gerçek dünya operasyonuna eşdeğer şekilde doğru olarak simüle edilmesi kolay olmayacaktır. Bununla birlikte, herhangi bir koşulun sahada kritik bir arızaya yol açabileceği akılda tutularak, tüm koşullar üzerinde testlerin göz ardı edilmesinin uzun vadeli maliyeti dikkate alınmalıdır. Sonuç olarak, kullanım öncesinde bataryadan karşılaşmasını beklediğiniz voltaj, sıcaklık ve akım kombinasyonunu belirleyerek çalışma koşullarında batarya performansını simüle etmek, paketi güvenli ve güvenilir tutmak için önem arz eder.

Tüm donanımların işletilmesi için kullanılacak yazılımların her bir bileşen bazında değerlendirilmesi ve sonuçta batarya güvenliği için de tüm sistemlerin etkin şekilde fonksiyonlarını yerine getirmesi doğrulanmalıdır. Bataryada en önemli yazılım BYS'nin işletilmesi için kullanılan yazılım olacaktır. BYS üreticileri kendi sistemlerini geliştirirken üretim aşamalarında test ederek raporlandırma gerçekleştirmiş olacaktırlar. Ancak, modüller bazında ve batarya bazında BYS yazılımlarının batarya üzerinde ayrıca test edilmesi ve gerekli durumlarda sertifikasyonun sağlanması gereklidir.

Döngüdeki donanım (HIL, Hardware-in-the-loop) simülasyonu, son teknoloji çevrim içi pil modellerinin hücreden paket düzeyine kadar elektriksel, termal ve yaşlanma özelliklerini de hesaba katarak veri sunabildiği belirtilmiştir. HIL simülatörü üzerinde yapılan test, gerçek piller üzerindeki testlerle karşılaştırıldığında, maliyet, test süreleri, esneklik, izlenebilirlik, çoğaltma kolaylığı veya güvenlik açısından önemli avantajlar sunabileceği ifade edilmektedir (Fleischer vd. 2016).

2. BATARYA GÜVENLİĞİ

Ni-Cd, Ni-MH ve Kurşun-asit pil gibi yaygın olarak şarj edilebilen diğer pillerle karşılaştırıldığında, Li iyon pil, yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun hizmet ömrü ve çevre dostu olma özellikleriyle öne çıkar ve bu nedenle tüketici elektroniğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemleri gibi çok fazla güç gerektiren uygulamalarda, çok sayıda pilin seri ve paralel olarak paketlenerek bir pil paketi haline getirilmesi gereklidir. Ancak, bu durum maliyet, kararlılık ve güvenlik sorunlarına neden olur. Normal çalışma koşullarında bile büyük bir pil paketinde pilin ürettiği ısı tamamen giderilemez, bu durum sıcak ortamlarda daha da kritik bir sorun meydana getirir. Yükselen batarya sıcaklığı, diğer istenmeyen parazitik reaksiyonları (istenmeyen yan reaksiyonlar) tetikleyerek, ısı üretiminin kontrol edilemediği termal bozunma/kaçak (thermal runaway) neden olur. Kazalar sırasında meydana gelebilecek mekanik (gövde hasarı, hücrelerin sıkışması, delinmesi ve bükülmesi), elektriksel (aşırı şarj/deşarj ve kısa devre) ve termal kötü kullanım (termal şok ve yerel ısınma) durumları sırasında termal kaçak daha da hızlı meydana gelecektir (Lamb vd. 2014). Normal çalışma gerilimi ve sıcaklığı sırasında elektrolit içerisinde Li⁺ iyonu taşınımı anot ve katot arasında sorunsuz ilerler, ancak piller yüksek sıcaklık, akım ve gerilime maruz kaldıklarında bu elektrokimyasal reaksiyonlar çok daha kompleks ve öngörülemez hale gelirler. Böylelikle SEI tabakasının bozunması, katottan oksijen salınması, elektrot ve elektrolit arasında istenmeyen yan reaksiyonların oluşumu meydana gelir. SEI film tabakasının bozunması sıcaklığın daha da artmasına neden olur, bu da katottan oksijen salınması sürecini tetikler (Biçer vd. 2021). Bu istenmeyen reaksiyonların her biri birbirini tetikleyerek geri-döndürülemez termal bozunma/kaçak sürecine girilmesini sağlar ve sonuçta da pillerin yanması ve patlaması kaçınılmaz olur.

Tüm bu güvenlik problemlerinin önüne geçmek üzere hücrelere, modüllere ve batarya paketlerine güvenlik cihazları yerleştirilmiştir. Bu nedenle ısı ve gaz üretiminin sonuçlarını yönetmek için birçok pil bazı güvenlik aparatlarına sahiptir (Doughty vd. 2012). Bunlar; hücre gaz tahliye cihazı, akım kesme cihazı (current interrupt device, CID), akım limitleme sigortası (current limiting fuses, CLF), diyotlar, batarya yönetim sistemidir (BYS). Pilleri güvenli tutmak üzere kullanılan

batarya yönetim sistemi kendi başına çalışabilen karmaşık bir elektronik bileşendir. Piller aşırı ve düşük gerilimlerin yanı sıra aşırı akımlara ve belirtilen çalışma penceresi dışındaki sıcaklıklara karşı çok hassastır, dolayısıyla BYS tarafından sağlanan güvenlik yönetiminin ana görevi bu değişkenlerin denetlenmesi ve pillerin bu koşullara karşı korunmasıdır.

2.1. Araç Üzeri Güvenlik

Li iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü, düşük kendi kendine deşarj oranı ve geniş çalışma sıcaklığı aralığı avantajlarından dolayı elektrikli araçlarda güç kaynağı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak hatalı kullanım veya trafik kazalarından kaynaklanan aşırı kötü kullanım koşulları, termal bozunmalara ve sonuçta pillerin yanmasına neden olur. Bunun yanında bataryalarda hızlı şarjın ve aşırı şarjın ardından Li iyon pillerin negatif elektrotlarında lityum metali oluşumu ve elektrolit ile reaksiyonundan termal bozunmanın meydana geldiği görülmüştür. Bu nedenle güvenliğin hücre, modül, paket ve son olarak araç seviyelerinde ele alınması gerekir. Bir seviyedeki başarısızlık, hızla daha yüksek bir seviyede çok daha ciddi arızalara dönüşebilir. Önüne geçilmediği takdirde ise pilleri ve aracı tehlikeye düşürecek sonuçlara yol açmaktadır.

BYS tek bir hücreden itibaren tüm batarya paketini kontrol altında tutmakta ve böylece olası güvenlik risklerinin önüne geçilebilmektedir. BYS tarafından gerçekleştirilen çoğu veri işleme ve yönetimin temeli olarak harici batarya parametrelerinin doğru ölçümü büyük önem taşımaktadır. Bir EA (elektrikli Araç)'nın pil takımı akımı için tipik doğruluklar 450 A akıma kadar %0,5–1,0, hücre voltajları için 1–2mV ve 600V'a kadar paket voltajı için %0,1'dir (Brandl vd. 2012).

Batarya sistemlerinin güvenlik performansını değerlendirmek için birçok güvenlik testini içeren çok sayıda değerlendirme standardı ve ulusal zorunlu test düzenlemeleri oluşturulmuştur (Tablo 1). Güvenlik testleri mekanik güvenilirlik, çevresel güvenilirlik, kötüye kullanım testleri ve elektriksel güvenilirliği içermektedir.

Tablo 1. Test standartları.

Kod	Standart İsmi	Tanım
IEC 62660	Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles (Elektrikli karayolu araçlarının tahriki için ikincil lityum iyon hücreler)	Performans testi - güvenilirlik ve kötüye kullanım testi olmak üzere iki bölümden oluşur
ISO 12405	Electrically propelled road vehicles-Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems (Elektrikle tahrik edilen karayolu taşıtları-Lityum iyon çekiş bataryası paketleri ve sistemleri için deney özellikleri)	Test pil paketi ve batarya sistemine yöneliktir. Yüksek güçlü uygulamalar, yüksek enerjili uygulamalar ve güvenlik performansı gereksinimleri olmak üzere üç bölümden oluşur. Amaç, araç üreticilerine isteğe bağlı test öğeleri ve test yöntemleri sağlamaktır
UL 2580	Batteries for use in electric vehicles (Elektrikli araçlarda kullanılacak bataryalar)	Test pil paketi ve batarya sistemine yöneliktir. Temel olarak pilin kötüye kullanılmasının güvenilirliğini ve kötüye kullanım zarar verdiğinde insanları koruma yeteneğini değerlendirir
SAE J2929	Electric and hybrid vehicle propulsion battery system safety standard (Elektrikli ve hibrit araç tahrik bataryası sistemi güvenlik standardı)	Test pil paketi ve batarya sistemine yöneliktir. İki bölümden oluşur: rutin test ve elektrikli araç kullanımında meydana gelebilecek anormal testler. Bataryanın araçtaki uygulaması dikkate alınarak tüm araç seviyesinde batarya testlerinden bahsetmektedir
SAE J2380	Vibration testing of electric vehicle batteries (Elektrikli araç bataryalarının titreşim testi)	Yollarda seyreden gerçek araçlar tarafından toplanan titreşim yükü spektrumunun istatistiksel sonuçlarına dayanmaktadır. Test yöntemi, araçların gerçek titreşim durumuyla daha uyumludur
GB/T 31484	Cycle life requirements and test methods for traction battery of the electric vehicle (Elektrikli aracın çekiş bataryası için çevrim ömrü gereksinimleri ve test yöntemleri)	Hücre ve modül için standart çevrim ömrünü ve pil paketi ve sistem için çalışma koşulu çevrim ömrünü benimseyen bir test standardıdır
GB/T 31485	Safety requirements and test methods for traction battery of the electric vehicle (Elektrikli aracın çekiş bataryası için güvenlik gereksinimleri ve test yöntemleri)	Testler hücrelere yöneliktir
GB/T 31486	Electrical performance requirements and test methods for traction battery of the electric vehicle (Elektrikli aracın çekiş bataryası için elektriksel performans gereksinimleri ve test yöntemleri)	Testler batarya modüllerine yöneliktir

Bunlar arasında mekanik güvenilirlik testi, sürüş sürecinde aracın mekanik stresini simüle edebilir. Titreşim testi aracın yola çarpmasını simüle eder. Çevresel güvenilirlik testi, araçların farklı iklim koşullarındaki dayanıklılığını değerlendirir:



sıcaklık çevrim testi, gündüz ve gece arasında büyük sıcaklık farkı olan bölgelerde sürüş yapan araçları simüle eder. Harici yangın testi, çivi delme testi gibi kötüye kullanım güvenilirlik testleri, uygunsuz kullanıma maruz kaldığında pilin güvenliğini değerlendirir. Elektriksel güvenilirlik testinin amacı, BYS'in kritik anlarda güvenliğini ve güvenilirliğini değerlendirmektir. Genel olarak batarya güvenlik testleri, pil arızasının temel oluşum ve sonuçlarını baz almaktadır. Bu sürecin ve pil arızalarının temel olaylarının tam olarak taranması, güvenlik değerlendirmesi için kapsamlı bir test sistemi oluşturmak ve kazaların nedenini ortaya çıkarmak açısından faydalı olacaktır.

Uluslararası pek çok standart ve düzenleme oluşturulmuş olmasına rağmen, elektrikli araçların pil güvenliği değerlendirmesi, kapsamlı ve niceliksel bir değerlendirme planının bulunmaması nedeniyle hala önemli zorluklarla karşı karşıyadır. Ayrıca değerlendirme sonuçlarına göre eksikliklerin giderilmesine yönelik ileriye yönelik bir geliştirme yönteminin olup olmadığı da belirsizdir.

2.2. Depolama ve Taşıma Güvenliği

Li iyon pillerin depolanması ve taşınması da en az kullanımları kadar üzerinde önemle durulması gereken konulardan bir tanesidir. Li iyon pillerin her ne kadar kendiliğinden deşarj seviyesi çok düşük olsa da depolama sürelerinin uzun tutulması neticesinde pillerin kritik olan gerilimin altına düşmesi olasıdır. Bu durumda piller depolanma ve taşıma esnasında belirli bir şarj durumunda ve ortam koşullarında tutulmak zorundadırlar.

Pilin şarj durumu (state of charge, SOC), bir hücrenin veya paketin kötü şartlarda kullanıma karşı tepkisini belirlemede en önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle taşıma güvenliği düzenlemeleri, Li-iyon şarj edilebilir pillerin nakliye sırasında düşük bir SOC'de olmasını gerektirir. Bu değer günümüzde %30 olarak belirlenmiştir ve fabrikadan çıkışında tüm hücreler %30 şarjlı olarak sevk edilmektedir.

Bu alanda pillerin depolama sırasında/sonrasındaki performanslarını ölçmek üzere Li iyon pillerin şarj tutma testi ve depolama ömrü testleri gerçekleştirilmektedir. Bu testler genellikle oda sıcaklığında ve 45°C veya 60°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Böylelikle pillerin kendiliğinden deşarj oranları test edilebilmektedir. Diğer bir test ise termal şok çevrimi testleridir. Bu testin ismi farklı standartlarda farklı isimler ile anılmaktadır (Tablo 2). Bu testin amacı, pilin ortam sıcaklığındaki ani ve hızlı değişikliklere direnme yeteneğini doğrulamaktır. Termal kararlılık testleri ise pillerin yüksek sıcaklıktaki kararlılıklarını ölçmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Depolama için kullanılan standartlar ve ilgili testler.

Kod	Standart Adı	Testin Adı
IEC 62660-1:2018	Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles – Part 1: Performance testing	6.3 Storage Test 6.3.1 Charge retention test 6.3.2 Storage life test
ISO 12405-4:2018	Electrically propelled road vehicles-Test specification for lithium-ion traction Battery packs and systems	7.5 SOC loss at storage
IEC 62660-2	Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles – Part 2:	6.3.2 Temperature cycling
GB/T 31485-2015	Safety requirements and test methods for traction battery of the electric vehicle	Temperature cycling
GB/T31467-3-2015	Safety requirements and test methods for traction battery of the electric vehicle	Temperature shock
SAE J2929-2013	Electric and hybrid vehicle propulsion Battery system safety standard	Thermal shock
UL 2580-2013	Batteries for use in electric vehicles	Thermal cycling
IEC 62660-2	Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles – Part 2:	6.3.1 High temperature endurance
UL2580 2013	Batteries for use in electric vehicles	Heating test
GB/T 31485-2015	Safety requirements and test methods for traction battery of the electric vehicle	Heating test



Li iyon piller potansiyel bir yangın tehlikesi oluşturmaları nedeniyle, lityum pillerin taşınması sırasında Sınıf 9 tehlikeli madde olarak tanımlanmaktadır. Dünyada pillerin güvenli bir şekilde taşınabilmeleri için (hava, deniz, demiryolu veya kara yoluyla) çeşitli standartlar geliştirilmiştir. Bunlar içerisinde en önemlileri Tablo 3'te sıralanmıştır.

Li iyon pillerin güvenle taşınabilmesi için UN 38.3 standardında belirtilen gereklilikleri karşılamaları gerekir. Bu standart, tek başına taşınan veya bir cihaza monte edilen piller için geçerlidir. Tüm Li iyon pillerin üretim sonrası güvenli bir şekilde test edilmeleri için öncelikle UN 38.3'e göre test edilip, belgelendirilmesi gerekmektedir. Bu testler, pilleri ve hücreleri, pillerin ve hücrelerin kararlılıklarını sağlamak için aşırı sıcaklık koşulları, şok, darbe ve kısa devre testleri de dahil olmak üzere nakliye ve taşıma sırasında karşılaşılabilecekleri koşullara tabi tutar. Benzer testleri IEC 62660-2 standardı da içermektedir. Diğer bir standart ise Amerikan UL1642 standardıdır. UL1642, lityum pil kullanımı sırasında patlama ve yangın riskini azaltılmasını hedeflemektedir.

Tablo 3. Taşıma için gerekli standartlar.

Kod	Standart Adı
UN 38.3	Transportation Testing for Lithium Batteries and Cells
IEC 62281:2019	Safety of primary and secondary lithium cells and batteries during transport
UL 1642	Lithium batteries

Çoğu lityum veya Li iyon pil, uygun şekilde tasarlandığında, üretildiğinde ve kullanıldığında güvenlidir. Ancak bunların kalitesiz malzemelerden oluşması, yanlış montajı, yanlış kullanılması veya şarj edilmesi, hasar görmesi veya tasarım kusurları olması durumunda büyük risk oluşturabilmektedir. Ayrıca, yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle bu piller aşırı ısınmaya karşı hassastır ve yangın tehlikesi oluşturabilir. Bu nedenle bu pilleri üreten, depolayan, taşıyan ve kullanan her kesimden çalışanların bu pillerin güvenlik risklerinin farkında olması bir gerekliliktir. Bu nedenle Dünya'da lityum pillerin her aşamadaki risklerini test etmek üzere standartlar oluşturulmuştur. Bu standartları geçemeyen pillerin taşınmasında ve kullanımında kısıtlar getirilmiştir.

3. BATARYA TESTLERİ VE TEST ALTYAPISI

Test altyapısı test edilecek bataryanın büyüklüğüne (kapasite ve boyutlar) bağlı olarak tasarlanmalıdır. Standart gereklerinin karşılanması yanında üretici ve/veya kullanıcıların da farklı istekleri (veya gereklilikleri) olabilmektedir. Batarya test altyapısı test edilecek bataryaların minimum ve maksimum kapasitesi ve batarya boyutu, standart gereklerine ve altyapıyı işletecek işletmecinin gerekleri dikkate alınarak tasarlanmalıdır.

Li iyon pillerde zorlanmış şarj ve deşarj testleri, çevresel testler ve mekanik testler sırasında bataryada olası yanma ve patlama riskleri göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle test edilecek batarya büyüklüğüne ve bu bataryada depolanması muhtemel enerjinin büyüklüğüne bağlı olarak güvenlik tedbirlerinin altyapı tasarımı yapılmalıdır. Test sürecinde tesis ve test personelinin güvenliğinin sağlanması ile ilgili tedbirlerin de dikkate alınması gerektiği değerlendirilmektedir.

Batarya testi ekipman üreticisi gereksinimlerinin karşılanmasının yanı sıra, müşteriler için de güvenlik sağlanması ve ayrıca marka itibarının korunması için de kullanım öncesi bir kontrol ve sertifikasyon olarak da değerlendirilebilir. Batarya testleri, olası tasarım ve üretim hataların erken tespitinin sağlanması sonucunda üreticilerin ürünlerini geliştirmelerine önemli katkılar sağlamaktadır. Test edilerek sertifikalandırılmış batarya üreticilerin ulusal ve uluslararası itibarlarını güvence altına almalarına da imkan sağlayacaktır.

3.1. Fonksiyonel Testler

3.1.1. Deşarj Performans Testi

Pil veya batarya deşarj performans testi sabit akım, sabit gerilim veya sabit direnç altında gerçekleştirilebilir. Test sonucunda ürünün ne kadar enerji (A-sa veya W-sa) depolayabildiği veya beyan edilen pil veya bataryanın anma kapasite değerinin (A-sa veya W-sa) karşılanması durumu ortaya konmaktadır. Bu testin gerçekleştirilmesi amacıyla sabit akım, sabit gerilim veya sabit direnç altında deşarj işlemi yapabilecek özellikte elektronik yük kullanılmalıdır. Bu konuda farklı firmalar tarafından üretilmiş elektronik yükler ve/veya batarya elektriksel test sistemleri mevcuttur. Ayrıca, pil veya bataryanın kapasitesi sıcaklık ile değişim göstereceği için şartlandırılmış ortam gerekmektedir. Bu ortamın sağlanması

için sıvı banyoları kullanılabileceği gibi sıcaklığı kontrol edilebilir iklim kabinleri de kullanılabilmektedir. Prizmatik pil kapasite testi görünüşü Şekil1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Kapasite Testi (Prizmatik lityum iyon pil)

3.1.2. Çevrim (döngü) Dayanıklılığı Testi

Pil veya batarya belirli gerilim aralıklarında ve akım yoğunluğunda şarj-deşarj döngüsüne tabi tutulur. Bu amaçla, bataryanın belirli akım ve gerilim seviyelerinde şarj vedeşarj işlemi gerçekleştirilmesi ve bu işlemin istenen sayıda döngü sayısında tekrarlanması gerekmektedir. Testin gerçekleştirilmesi için pil veya bataryanın akım ve gerilim seviyelerine uygun şarj vedeşarj işlemlerini ardışık olarak gerçekleştirebilen batarya test sistemleri kullanılmaktadır. Deşarj performans testi için de aynı ekipmandan faydalanabilir.

3.1.3. Şarj (kapasite) Tutma Testi

Belirli doluluk oranındaki pil veya batarya şartlandırılmış ortamda belirli süre depolandıktan sonradeşarj işlemine tabi tutulur. Bu amaçla şartlandırılmış ortam (klimatik oda veya iklim kabini) ve pil veya bataryanın şarj vedeşarj işlemleri için de akım ve gerilim seviyeleri ayarlanabilir batarya test sistemi kullanılmalıdır.

3.1.4. İç Direnç Testi

İç direnç iki farklı yöntem kullanılarak test edilebilmektedir. Bunlar DC ve AC iç direnç ölçümleridir. DC iç direnç testi için batarya şarj vedeşarjını gerçekleştirebilen batarya test sistemi yeterli olacaktır. AC iç direnç testi için de özel olarak tasarlanmış AC direnç test ekipmanı kullanılabilir.

3.1.5. Uzun Süreli Depolamadan Sonra Şarj (kapasite) Kabul Testi

Test için öncelikle pil veya bataryanındeşarj edilmesi gereklidir. Daha sonra batarya sıcaklığının istenen değere düşürülmesi amacıyla soğutma özelliği olan bir iklim kabini kullanılmalıdır. Sabit akım veya sabit gerilim altındadeşarj işlemi yapabilecek özellikte elektronik yük ve şartlandırılma için de bataryanın şarj edilmesi amacıyla bir şarj ekipmanı kullanılması gerekir.

Pil ve bataryanın fonksiyonel testlerinin tamamının gerçekleştirilmesi amacıyla şartlandırılmış ortam (nem ve sıcaklık), iklim kabini (yaklaşık -20°C +100°C sıcaklık aralığında ayarlanabilen) ve pil ve batarya büyüklüğüne uygun olarak seçilecek elektriksel testlerin gerçekleştirildiği (akım, gerilim ve direnç değeri ayarlanabilen) batarya test sistemine ihtiyaç olacaktır.

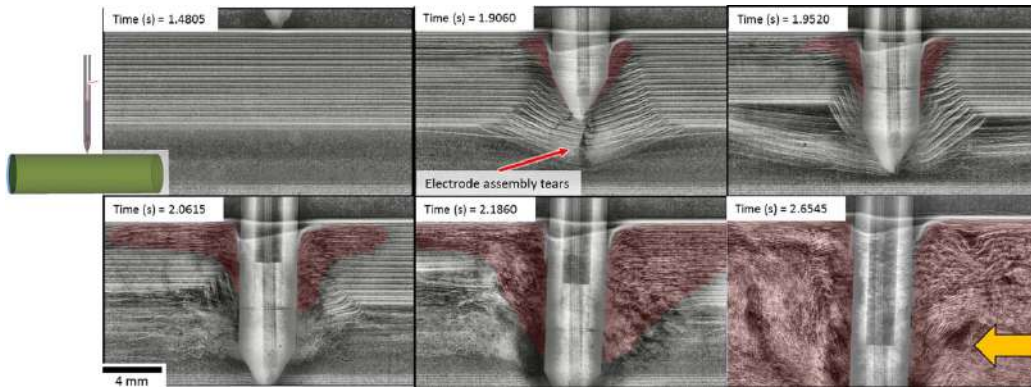
3.2. Güvenlik Testleri

3.2.1. Harici Kısa Devre Testi

Bu test, pil veya bataryanın pozitif ve negatif terminallerine harici bir kısa devreyi simüle etmektedir. Pil veya bataryanın kısa devre edilmesi sonrasında pilin veya bataryanın deformasyona (sızdırmazlığın deformasyonu, yanma, patlama vb.) uğramaması gerekir. Standartlarda pil sıcaklığı için belirli bir sıcaklık değerini aşmaması (Örneğin +150°C'yi aşmaz, vb.) ile ilgili tanımlamalar vardır. Test sürecinde batarya üzerindeki sigorta, akım sınırlama devresi ve havalandırma mekanizmasının etkinleştirilmesine izin verilir. Testin gerçekleştirilmesi amacıyla pil ve batarya büyüklüğüne göre özel olarak tasarlanmış, olası patlama ve yangın dayanımına sahip bir test kabini gereklidir. Test sırasında pil ve batarya sıcaklığının da izlenmesi gerekmektedir.

3.2.2. Çivi Daldırma

Bu test daha çok piller için uygulanan harici bir yırtılma ve kısa devreyi simüle etmek amacıyla uygulanmaktadır. Pile kontrollü olarak sivri cisim (çivi) daldırılır ve bu süreçte pildeki davranışlar izlenir. Pilde yanma ve patlama olmaması beklenmektedir. Kısa devre testine benzer şekilde pil sıcaklığı için belirli bir sıcaklık değerini aşmaması (Örneğin; +150°C'yi aşmaz, vb.) ile ilgili standart gereksinimleri vardır. Testin gerçekleştirilmesi amacıyla pil büyüklüğüne göre özel olarak tasarlanmış, olası patlama ve yangın dayanımına sahip bir test kabini gereklidir. Test sırasında pil ve batarya sıcaklığının da izlenmesi gerekmektedir. 18650 tip silindirik bir lityum iyon pilin çivi daldırma testi sürecindeki radyografi görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir (Finegan vd. 2017).



Şekil 2. Çivi daldırma testi-gerçek zamanlı radyografiler (Finegan vd. 2017).

3.2.3. Serbest Düşme Testi

Bu test, pilin veya bataryanın yanlışlıkla düştüğü durumu simüle eder. Deney, tam doldurulmuş pil ve bataryalarla yapılmaktadır. Test bataryaları 1 m yükseklikten beton bir yüzeye düşürülecektir. Pillerin tüm yüzeylerine düşürülmesi sağlanır. Serbest düşme uygulanan pil veya bataryalar daha sonra 1 saat süreyle depolanır ve gözlemlenir. Bir saatlik gözlem süresi içerisinde hiçbir elektrolit kaçağı, patlama ve yangın olmamalıdır. Test için pil ve bataryanın öncelikle tam şarjı için şarj cihazı ve 1 metre yükseklikten serbest olarak bırakılabileceği bir düzeneğe ihtiyaç vardır.

3.2.4. Aşırı Şarj Testi

Bu deney, şarj gerilimi kontrolü için yalnızca tek bir kontrol veya korumayla donatılmış batarya sistemleri için yapılmalıdır. Şarj voltajı kontrolü için iki veya daha fazla bağımsız koruma(lar) veya kontrol(ler) ile sağlanan batarya sistemleri için bu testten feragat edilebilir. Test imalatçı tarafından belirlenen nihai gerilime sabit akımla boşaltılmış pillere uygulanır. Daha sonra piller, orijinal şarj kontrolünün çalışmadığı koşullar altında voltaj mümkün olan maksimum voltaj değerine ulaşana kadar batarya sisteminin belirtilen maksimum şarj akımına eşit bir sabit akımla şarj edilirler. Test sırasında voltaj ve sıcaklık izlenmelidir. Deney, pil yüzeyinin sıcaklığı kararlı durum koşullarına ulaşana kadar (30 dakikalık bir süre içinde 10 °C'den az değişim) veya ortam sıcaklığına dönene kadar sürdürülmelidir. Deney süresi içerisinde hiçbir elektrolit kaçağı, patlama ve yangın olmamalıdır. Testin gerçekleştirilmesi için akım ve gerilimi kontrol edilebilir bir şarj ekipmanı ve sıcaklık ve gerilim izleme için de veri kaydedici (data logger) ihtiyacı mevcuttur.

3.2.5. Zorlanmış Deşarj Testi

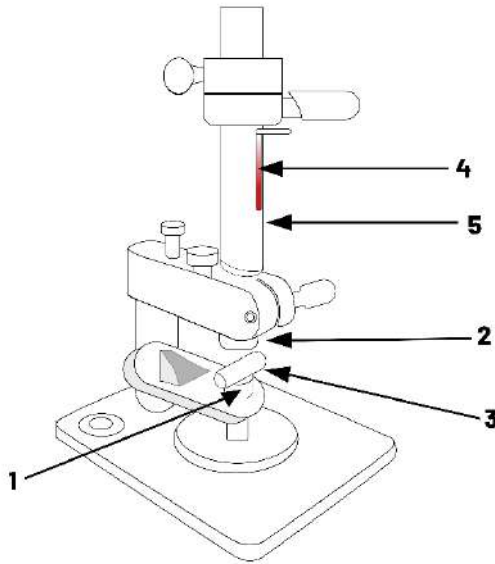
Boşaltılmış piller veya batarya 90 dakikalık bir test süresi boyunca sabit akımda zorlamalı deşarja tabi tutulur. Deney süresinin sonunda görsel muayene yapılmalıdır. Bu deney, şarj gerilimi kontrolü için yalnızca tek bir kontrol veya korumayla donatılmış batarya sistemleri için bataryanın tamamı için, şarj voltajı kontrolü için iki veya daha fazla bağımsız koruma(lar) veya kontrol(ler) ile sağlanan batarya sistemleri için tek pil için uygulanır. Test sonunda hiçbir elektrolit kaçağı, patlama ve yangın olmamalıdır. Elektriksel testlerin gerçekleştirilmesi için batarya test sistemi bu test için de kullanılabilir.

3.2.6. Ezilme Testi

Bu test, dahili kısa devreye yol açabilecek bir ezilmeden kaynaklanan mekanik istismarı simüle etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bir pil veya batarya iki düz yüzey arasında ezilecektir. Pil veya batarya, yüzey alanı en büyük olan tarafa kuvvet uygulanarak ezilecektir. Her pil veya batarya yalnızca bir ezilmeye tabi tutulacaktır. Test numunesi 6 saat süreyle gözlemlenir. Test, daha önce başka testlere tabi tutulmamış pil veya batarya kullanılarak gerçekleştirilecektir. 6 saatlik gözlem süresi içerisinde aşırı sıcaklık artışı, patlama ve yangın meydana gelmemelidir. Batarya kabının mukavemetine bağlı olarak özel bir pres gerekmektedir. Ayrıca, yangın ve patlama riskleri göz önüne alınarak güvenlik tedbirleri alınmalıdır.

3.2.7. Ağırlık Düşürme (darbe) Testi

Pil veya batarya %50 doluluğa kadar kadar sabit bir akımda deşarj edilir. Pil veya batarya düz bir beton veya metal zemin üzerine yerleştirilir. Pil veya bataryanın merkezine $15,8 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ çapında ve en az 60 mm uzunluğunda veya pillerin en uzun boyutundan (hangisi daha büyükse) oluşan 316 tipi paslanmaz çelik çubuk yerleştirilir. Daha sonra 9,1 kg'lık sert bir kütle 610 mm \pm 25 mm yükseklikten numune üzerine yerleştirilen çubuğun üzerine düşürülür. Test sonunda hiçbir elektrolit kaçağı, patlama ve yangın olmamalıdır. Standart gerekliliklerini karşılayacak nitelikte ve güvenlik tedbirlerine sahip özel bir ekipman gerekmektedir. Deney düzeneği Şekil 3'te verilmiştir (TS EN 62281).



Şekil 3. Darbe testi (Şekilde düz ve pürüzsüz bir yüzey (1) ve test numunesinin (3) merkezi boyunca yerleştirilen bir çelik çubuk (2) gösterilmektedir. Düşey kayan kanal (5) kullanılarak kesişme noktasına kontrollü bir şekilde bir kütle (4) düşürülmektedir.) (TS EN 62281).

3.2.8. Şok Testi

Pil veya bataryanın tüm montaj yüzeylerini destekleyecek sağlam bir montaj parçası vasıtasıyla test makinesine sabitlenmelidir. Pilin veya bataryanın karşılıklı üç montaj pozisyonunda her yönde 3 şoka, toplam 18 şoka tabi tutulmalıdır. Her şok için uygulanacak parametreler standartlarda tanımlanmıştır. Deney, daha önce titreşim deneyine tabi tutulan pil veya batarya kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu test sırasında sızıntı, kısa devre, kopma, patlama ve yangın olmamalıdır.

3.2.9. Vibrasyon (titreşim) Testi

Test temel olarak taşıma sırasındaki titreşimi simüle eden bir sinüs taramasıdır. Test pilleri veya batarya, titreşim makinesinin platformuna, onları bozmadan ve titreşimi güvenilir bir şekilde iletecek şekilde sağlam bir şekilde sabitlenmelidir. Pil veya bataryalar sinüzoidal titreşime tabi tutulacaktır. Bu döngü, karşılıklı üç dik montaj konumunun her biri için toplam 3 saat boyunca 12 kez tekrarlanmaktadır. Yönlere biri terminal yüzüne dik olacaktır. Bu test sırasında sızıntı, kısa devre, kopma, patlama ve yangın olmamalıdır. Şok ve vibrasyon testleri için üç eksenli mekanik sarsıcı düzeneklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

3.2.10. Yayılma Testi

Bu test, bir batarya sisteminin tek hücreli bir termal kaçak olayına dayanma kabiliyetini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilir. Herhangi bir termal kaçak olayı batarya sisteminin yangınına neden olmamalıdır.

Batarya tamamen şarj edilir ve ardından hücreler $25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ ortam sıcaklığında stabil hale gelene kadar bırakılır. Batarya sistemindeki bir pil, dirençli ısıtma veya harici bir ısı kaynağı kullanılarak, termal kaçak durumuna girene kadar ısıtılır. Pilde termal kaçak başlatıldıktan sonra ısıtıcı kapatılarak batarya 1 saat süreyle gözlemlenir. Batarya harici bir yangın çıkmaması veya batarya kabının yırtılmaması gerekir. Testin gerçekleştirilmesi için ısıtıcı düzenek ve güvenlik tedbirlerini sağlayan bir test kabini yeterli olacaktır.

3.3. Çevresel Testler

3.3.1. Sıcaklık Dayanımı

Bu test, pil veya bataryanın aşırı yüksek sıcaklığa maruz kaldığı durumu simüle etmek amacıyla uygulanmaktadır. Bir test bataryası bir fırına yerleştirilmeli ve sıcaklık, 5 °C/dakika bir hızla 130 °C sıcaklığa yükseltilmeli ve bu sıcaklıkta 10 dakika süreyle tutulmalıdır. Bu test sırasında sızıntı, kısa devre, kopma, patlama ve yangın olmamalıdır. 130 °C sıcaklığa kadar kontrollü olarak ısıtma sağlanabilen bir sıcaklık kabine ihtiyacı vardır.

3.3.2. Düşük Basınç Dayanımı

Bu test, düşük basınç koşulları altında hava taşımacılığı sürecinde pil veya bataryaların dayanımını simüle etmek amacıyla uygulanmaktadır. Pil veya batarya, ortam sıcaklığında en az 6 saat boyunca $11,6\text{ kPa}$ veya daha düşük bir basınçta tutulur. Bu test sırasında sızıntı, kısa devre, kopma, patlama ve yangın olmamalıdır. Basıncı kontrol edilebilen bir vakum kabini test için yeterli olacaktır.

3.3.3. Isıl Çevrim Dayanımı

Test, -40 °C ile $+75\text{ °C}$ arasındaki aşırı sıcaklıklardaki değişikliklerin pil veya batarya üzerindeki etkilerini gözlemlemek amacıyla gerçekleştirilir. Pil veya batarya, toplam 10 döngü boyunca -40 °C sıcaklıkta 6 saat (veya 12 saat), ardından $+75\text{ °C}$ sıcaklıkta 6 saat (veya 12 saat) tutulur. Bu işlem sonrasında ortam sıcaklığında en az 24 saat süreyle pil veya batarya depolanır. Test, daha önce irtifa testine tabi tutulan test pilleri ve bataryalar kullanılarak gerçekleştirilir. Sıcaklığı -40 °C ile $+75\text{ °C}$ arasında kontrol edilebilen iklim kabini testin gerçekleştirilmesi için yeterlidir.

3.3.4. Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) Testi

Elektromanyetik uyumluluk (EMC), elektronik ve elektrikli ekipman ve sistemlerin diğer elektrikli veya elektronik ekipmanları olumsuz etkileme veya güç hattı geçici akımları, radyo frekansı sinyalleri, dijital darbeler, elektrik gibi diğer parazit kaynaklarından etkilenmeden çalışabilme yeteneğinin ölçülmesidir. EMC testi, özel test ekipmanı ve tesislerini gerektirir. Testlerin elektro-manyetik kaynaklardan arınmış bir ortamda (yankısız bir oda veya Faraday kafesi) gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Paraziti oluşturmak ve ölçmek için özel geniş aralıklı sinyal kaynaklarına ve hassas alıcılara ihtiyaç duyulmaktadır.

3.4. Sertifikasyon

Sertifikasyon faaliyetleri hücre sertifikasyonu, batarya yönetim sistemi (BYS) sertifikasyonu ve batarya bütününe sertifikasyonu olmak üzere üç aşamada kontrol ve irdemelerin yapılması faaliyetlerini zorunlu kılmaktadır. Her bir ürün için tip onay sertifikası üretim süreçlerinde olması gerekmektedir. Tip onay sertifikalarının yanında uluslararası standartların gereklerinin karşılandığına dair uluslararası geçerliliği olan test raporlarının (akredite laboratuvar test



raporları) mevcudiyeti sertifikasyon için gerekmektedir. Pil ve bataryalar için kullanılması gereken standartlar aşağıda sıralanmıştır.

- UL 2580, Elektrikli Araçlarda Kullanıma Yönelik Standart (The Standard for Batteries for Use in Electric Vehicles)
- UL 2271, Hafif Elektrikli Araçlarda Kullanıma Yönelik Batarya Standardı (the Standard for Batteries for Use in Light Electric Vehicle (LEV) Applications)
- IEC 63057, Alkalin veya Diğer Asit Olmayan Elektrolitler İçeren İkincil Hücreler ve Piller - Karayolu Taşıtlarında Kullanıma Yönelik İkincil Lityum Pillerle İlişkin Güvenlik Gereksinimleri (Secondary Cells and Batteries Containing Alkaline or Other Non-acid Electrolytes – Safety Requirements for Secondary Lithium Batteries for Use in Road Vehicles).
- IEC 62133-2, Alkalin veya diğer asit olmayan elektrolitler içeren ikincil hücreler ve piller - Taşınabilir uygulamalarda kullanılmak üzere taşınabilir, sızdırmaz ikincil hücreler ve bunlardan yapılan piller için güvenlik kuralları - Bölüm 2: Lityum sistemler (Secondary cells and batteries containing alkaline or other non- acid electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications - Part 2: Lithium systems)
- IEC 62619 Alkali veya diğer asit olmayan elektrolitler içeren ikincil hücreler ve piller - Endüstriyel uygulamalarda kullanıma yönelik ikincil lityum piller ve piller için güvenlik gereksinimleri (Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications)
- SAE J2380, Elektrikli Araç Akülerinin Titreşim Testi (Vibration Testing of Electric Vehicle Batteries)
- SAE J2929, Elektrikli ve Hibrit Araç Tahrik Akü Sistemi Güvenlik Standardı – Lityum Bazlı Şarj Edilebilir Hücreler (Electric and Hybrid Vehicle Propulsion Battery System Safety Standard – Lithium-based Rechargeable Cells)
- UN 38.3, Birleşmiş Milletler (BM) Testler ve Kriterler El Kitabı, Lityum Metal ve Lityum İyon Piller (United Nations (UN) Manual of Tests and Criteria, Lithium Metal and Lithium Ion Batteries)
- IEC 62660-1 Elektrikli karayolu taşıtlarının tahriki için ikincil lityum iyon piller - Bölüm 1: Performans testi (Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles - Part 1: Performance testing)
- IEC 62660-2 Elektrikli karayolu araçlarının tahriki için ikincil lityum iyon hücreler - Bölüm 2: Güvenilirlik ve kötüye kullanım test (Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles - Part 2: Reliability and abuse testing)

Sertifikasyon faaliyetleri için akredite edilmiş bir test altyapısı gerekmektedir. Akredite edilen test altyapısı ilgili standartlar içerisinde tanımlı test faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi için uygun donanım ve yetkin personel ile donatılmalı ve ulusal akreditasyon kurumunun (TÜRKAK) denetiminden geçerek TS EN ISO/IEC 17025 Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarlarının Yeterliliği İçin Genel Gereklik standardı gereklerine uygun şekilde akredite edilmelidir.

4. AKREDİTASYON

Laboratuvarın çalışmalarına olan güvenin artırılması amacıyla TS EN ISO 17025 standardı geliştirilmiştir. TS EN ISO 17025 standardı, laboratuvarların yetkin çalıştıklarını ve geçerli sonuçlar üretebildiklerini göstermelerini sağlamak amacıyla laboratuvarlar için belirlenmiş gereklilikleri içerir. Bu standarda uyan laboratuvarlar, aynı zamanda ISO 9001-2015 Kalite Yönetim Standardının ilkelerine de genel olarak uyumuş olurlar (TS EN ISO/IEC 17025:2017).

Akreditasyon, uygunluk değerlendirme kuruluşlarınca gerçekleştirilen çalışmaların ve dolayısıyla bu çalışmalar sonucunda düzenledikleri uygunluk teyit belgelerinin (deney ve muayene raporları, kalibrasyon sertifikaları, yönetim sistemi belgeleri, ürün belgelendirme belgeleri, personel belgelendirme belgeleri v.b.) güvenilirliğini ve geçerliliğini desteklemek amacıyla oluşturulmuş bir kalite altyapısı olarak tanımlanmıştır (Int. Kyn. 1).

Laboratuvarlarda kalite güvenceyi sağlamanın yolu, sürekli iyileştirmeye açık etkin bir kalite yönetim sistemi kurmak, çalıştırmak ve iç/dış kalite kontrol süreçleriyle teknik ve dokümantasyon olarak sistemin sürekliliğini ve izlenebilirliğini

sağlamaktır. ISO/IEC 17025 standardı bu amaca hizmet etmek için hazırlanmış, deney laboratuvarlarının akreditasyonunda kullanılan temel standarttır. Laboratuvarların ISO/IEC 17025 standardına göre akredite olabilmeleri için temelde iki koşulu sağlamaları gerekmektedir. Bu koşullardan birincisi bu standarda göre bir kalite yönetim sisteminin kurulmuş ve işletiliyor olması, ikincisi ise teknik anlamda (personel, cihaz, yerleşim vd.) standardın gereklerinin karşılanıyor olmasıdır (Yeşilören ve Karataş 2019).

Akreditasyon süreçleri ve gerekli yönlendirmeler TÜRKAK web sayfasında mevcuttur (Int Kyn. 2). Laboratuvarların akreditasyonu için TÜRKAK başvurular sayasından Deney Laboratuvarları sekmesi altında başvuru ve akreditasyon için gereklilikler tanımlanmıştır.

TS EN ISO/IEC 17025 Standardı genel esasları, genel yaklaşımları, politikaları ve teknik yeterlilik bakımından alınması gerekli tedbirleri ortaya koymaktadır. Akredite olmak isteyen/akredite olan deney laboratuvarları bu standardın şartlarını yerine getirecek şekilde kurulan ve işletilen bir kalite sistemine sahip olmalıdır. Bununla birlikte standarda ilave olarak laboratuvarların çalışma sahasıyla ilgili ek kriterleri içeren yasal mevzuatın, zorunlu dokümanların, Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği, ILAC'ın, Avrupa Akreditasyon Birliği, EA'nın ve TÜRKAK'ın hazırlamış olduğu ilgili dokümanların da şartlarını yerine getirmesi gerekliliği mevcuttur (Int Kyn. 2).

4.1. Kullanılacak Metotlar

Laboratuvar, tüm laboratuvar faaliyetleri ve uygun olduğu yerlerde ölçüm belirsizliği değerlendirmesi için, veri analizi amacıyla kullanılacak istatistiksel tekniklerle birlikte uygun güncel yöntem ve prosedürleri oluşturmalı ve uygulamalıdır.

Laboratuvar tarafından uluslararası, bölgesel ya da ulusal standartlarda veya saygın bir teknik kuruluş tarafından ya da ilgili bilimsel yayınlarda veya dergilerde yayınlanmış olan ya da donanım üreticisi tarafından belirlenmiş yöntemlerin kullanılması tavsiye edilmektedir. Laboratuvar tarafından geliştirilmiş veya tadil edilmiş yöntemler de geçerli kılma faaliyetleri yapılarak kullanılabilir.

Laboratuvar seçilen metotlar uygulamaya başlamadan önce, gereken performansın elde edilebildiğini güvence altına almak suretiyle, yöntemlerin düzgün bir şekilde çalışabildiğini doğrulamalı ve kayıtlarını muhafaza etmelidir. Yöntemlerin güncellenmesi halinde doğrulama faaliyetleri güncellenmenin getirdiği esaslar dikkate alınarak tekrarlanmalıdır.

Laboratuvar standart olmayan yöntemleri, laboratuvar tarafından geliştirilmiş yöntemleri ve amaçlanan kapsamlarının dışında kullanılması düşünülen veya başka bir şekilde değiştirilen standart yöntemleri geçerli kılmalıdır. Geçerli kılma, söz konusu uygulamanın veya uygulama alanının ihtiyaçlarını karşılayacak kapsamda olmalıdır. Laboratuvar tarafından yapılacak geçerli kılma faaliyetleri sürecinde aşağıdaki kayıtlar oluşturulmalı ve muhafaza edilmelidir:

- a) kullanılan geçerli kılma prosedürü,
- b) gerekliliklerin belirlenmesi,
- c) yöntemlerin performans karakteristiklerinin tayin edilmesi,
- d) elde edilen sonuçlar,
- e) yöntemin geçerliliğine yönelik, kullanım amacına uygunluğunu detaylandıran bir ifade.

Metotlar ve geçerli kılma için daha detaylı bilgi TS EN ISO/IEC 17025 Standardı madde 7.2 içerisinde mevcuttur (TS EN ISO/IEC 17025:2017).

4.2. Altyapı Kurulumu ve Validasyonu

Batarya testleri için ilgili deney standartlarının ve müşteri gerekliliklerinin yerine getirilmesi amacıyla uygun tesisler gerekli altyapı ile donatılmalıdır. Tesisler ve çevresel koşullar laboratuvar faaliyetleri için uygun olmalı, sonuçların geçerliliğini olumsuz şekilde etkilememeli ve kontrol altında tutulmalıdır. Sonuçların geçerliliğini olumsuz şekilde etkilemesi muhtemel durumlar kesinlikle kontrol altına alınmalıdır. Örneğin elektromanyetik bozulma, radyasyon, nem, enerji kalitesi, sıcaklık, ses, titreşim vb. etkenler deney faaliyetlerinin sağlıklı bir şekilde yürütülmesine engel teşkil edebilir. Bu gibi durumlar söz konusu ise bu durumlar önceden tanımlanmalı ve kontrol altına alınması için gerekli tedbirler uygulanmalıdır.

Laboratuvar faaliyetlerinin ilgili standart gereklerini doğru bir şekilde gerçekleştirmesi için gerekli olan ve sonuçları etkileyebilen donanım (ölçüm cihazları, yazılım, ölçüm standartları, referans malzemeler, reaktifler ve sarf malzemeleri vb.) uygun şekilde hazırlanmalı ve çalışır durumda tutulmalıdır. Her bir test faaliyeti için bu donanımın test faaliyetini gerçekleştirmek için yeterli özellikte olduğu kontrol edilmeli ve doğrulama kayıtları oluşturulmalıdır. Tüm donanım



kalibrasyon planı dahilinde kalibre edilmelidir. Ölçüm için kullanılacak donanım, ilgili test standardı gerekerini karşılayacak bir sonuç sağlamak için gereken ölçüm doğruluğunu ve/veya ölçüm belirsizliğini elde edebilmelidir.

Kurulu tesislerde bulunan donanımın etkin bir şekilde işletilmesi, bakımı ve muhafazası için prosedürler oluşturulmalı ve aktif olarak kullanılmalıdır. Donanım performansının güvenilirliğini sürdürmek için periyodik olarak tanımlanmış ara kontroller uygulanmalıdır. Bu ara kontroller bir prosedüre göre uygulanmalı ve alınan sonuçlar kontrol edilerek uygunluk kayıtları muhafaza altına alınmalıdır.

4.3. Personel Eğitimi

Laboratuvar, faaliyetlerini yönetmek ve gerçekleştirmek için gerekli olan yetkinlikte ve sayıda personele sahip olmalıdır. Laboratuvar faaliyetlerini gerçekleştiren ve bu faaliyetleri etkileyebilecek bütün laboratuvar personelinin tarafsız hareket etmesi, yapılan iş için yetkin olması ve laboratuvarın kalite yönetim sistemiyle uyumlu şekilde çalışması sağlanmalıdır. Laboratuvar, faaliyetlerinin sonuçlarını etkileyen her bir işlev için öğrenim, nitelik, eğitim, teknik bilgi, beceri ve tecrübe gereklilikleri dâhil, yetkinlik gerekliliklerini dokümanite edilmeli ve bu gerekliliklerin karşılandığı teyit edilmelidir.

Laboratuvarda görevlendirilmiş personelin yönetim sistemi ve laboratuvarın akreditasyon kapsamı dahilinde uygulanan test faaliyetleri ve diğer faaliyetler için yetkin olması amacıyla personel planlı olarak eğitilmeli ve eğitimler sonrasında da personelin sahip olması gereken yetkinliğe ulaştığının değerlendirmelerle kontrol altında tutulması gerekmektedir. Yetkin olmayan bir personelin akreditasyona sahip bir laboratuvarda kendi başına test faaliyetlerine katılımı mümkün olmamaktadır.

Personel akreditasyon sürecinde sistemin işletilmesi ve test faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi için en önemli aktörlerden bir tanesidir. Bu sebeple, personelin deney gereklerine ve kalite yönetim sistemi gereklerine uygun faaliyetleri yürütebilmesi amacıyla güncel bilgilere sahip olması gerekmektedir. Bu durum etkin bir eğitim planlaması ve sürekli gözden geçirme faaliyetleriyle sağlanabilmektedir.

4.4. Akreditasyon Süreçleri

Ülkemizde laboratuvar akreditasyon faaliyetleri TÜRKAK tarafından gerçekleştirilmektedir. TÜRKAK tarafından gerçekleştirilen akreditasyon faaliyetleri için TÜRKAK tarafından P701 Uygunluk Değerlendirme Kuruluşlarının Akreditasyonu Prosedürü uygulanmaktadır. Bu dokümana (Int Kyn. 3) adresinden ulaşılabilir. Bu prosedür içerisinde tanımlanmış Akreditasyon süreci aşağıda belirtilen ana safhalardan oluşmaktadır.

- Başvuru,
- Denetim öncesi yapılan hazırlıklar,
- Öndenetim (başvuran kuruluş tarafından talep edildiğinde),
- Akreditasyon denetimi,
- Denetim sonrası yapılan değerlendirmeler (takip denetimi dahil),
- Karar,
- Gözetim,
- Akreditasyonun yenilenmesi

Akreditasyonu talep eden laboratuvar TS EN ISO/IEC 17025 gerekenlerine uygun olacak şekilde bir kalite yönetim sistemi kurar, dokümanite eder ve uygulamaya başlar. TÜRKAK'ın akreditasyona başvuru için en az altı aylık süre boyunca sistemin uygulanmış olması zorunluluğu mevcuttur. Laboratuvarın başvurusu sonrasında TÜRKAK tarafından dokümantasyon incelenir ve yeterli seviyede olduğu tespit edilmesi halinde yerinde denetim süreci başlatılır. Denetim faaliyetleri sonrasında tespit edilmiş uygunsuzluklar için yapılan düzeltici faaliyet kayıtlarının incelenerek raporlanmasından sonra karar süreci başlar ve laboratuvarın akreditasyonu ile ilgili karar çıkar. Tüm süreçlerden başarıyla geçen laboratuvara akreditasyon verilir. Daha sonra da yine TÜRKAK prosedürlerine uygun olarak gözetim denetimleri ve 48 aylık süre sonrasında da akreditasyon yenileme denetimleri uygulanır.

Akredite laboratuvarlar tamamen tarafsız olup, müşterilerine ait bilgilerin gizliliğini koruyacak ve müşteri dışındaki taraflara bilgi aktarımının sınırlı olduğu laboratuvarlardır. Bu konuda düzenlemeler TS EN ISO/IEC 17025 standardında mevcuttur. Laboratuvar ile müşterisi arasında gizlilik ve diğer hususları içerecek bir sözleşmenin yapılması standart tarafından zorunlu kılınmaktadır. Müşteri ve laboratuvar yasal olarak geçerli olacak bu sözleşmede kendi haklarını korumak için düzenlemeleri yapma hakkına sahiptirler. Akredite laboratuvarlar kendilerine teslim edilmiş ürün ve bu ürüne ilgili bilgilerin muhafazasından yasal olarak sorumlu tutulan laboratuvarlar olup, bilgi güvenliği için gerekli yapılandırmayı ve yönetimi sağlamakla yükümlüdürler. Testlerin tamamlanması sonrasında müşteriye ait ürün, bilgi, belge vb. müşteriye iade edilmek zorundadır. Ancak bazı testlerde ürünlerin tahribata uğraması mümkün olduğu için bu



ürünler müşteriye teslim edilse de ürünün kullanımının mümkün olmayacağı bilinmelidir. TÜRKAK'ın uluslararası sözleşmeler kapsamında tanınıyor olması nedeniyle TÜRKAK tarafından akredite edilmiş bir test laboratuvarının düzenleyeceği test raporu uluslararası alanda geçerli olmaktadır.

Ülkemizde batarya testlerini belirli bir kapasiteye kadar (< 8 kW-sa) gerçekleştirebilecek altyapı mevcuttur. Ancak bu altyapı ile elektrikli araç veya hibrit elektrikli araç bataryalarının test edilmesi mümkün değildir. Ülkemizde batarya testleri konusunda akreditasyona sahip tek laboratuvar Vestel Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş. İzmir Ürün Güvenliği Laboratuvarı olup, akreditasyon kapsamına TÜRKAK web sitesinden ulaşılabilir (Int. Kyn. 4).

Uluslararası arenada faaliyet gösteren elektrikli araç bataryası test merkezleri mevcuttur. Bunlar arasında TÜV SÜD (Int. Kyn. 5), UL Solutions (Int. Kyn. 6) ve Intertek (Int. Kyn. 7) sayılabilir.

5. ÖNERİLER

Bataryalar elektrikli araçların enerjisini karşılayan en önemli bileşenlerinden bir tanesidir. Batarya paketleri elektrik enerjisinin kimyasal enerjiye dönüştürülerek saklandığı piller, mekanik bağlantı ve soğutma sistemleri, elektriksiz bileşenler ve tüm bu sistemlerin uyum içerisinde çalışabilmesi için de yönetim sistemine sahip bir kompleks üründür. Bu ürünün tasarımı ve üretimi için disiplinler arası bir çalışma gerektiği gibi test ve sertifikasyonu için de yine farklı disiplinlerde yetişmiş uzman birikimlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Uluslararası arenada pil ve batarya paketlerinin test edilmesi ile ilgili standartlar mevcuttur.

Batarya paketlerinin test ve sertifikasyonu için öncelikle uyulması gereken standartlar içerisinde tanımlanmış gerekliliklerin özümsemesine ihtiyaç vardır. Bu alan için farklı disiplinlerde personelin yetiştirilmesi ve buna paralel olarak da ilgili test altyapısının kurulması gerekmektedir. Bazı test ihtiyaçlarının ülkemizde mevcut akredite laboratuvarlarda sağlanması mümkün olacaktır. Örneğin; EMC testleri, mekanik şok ve vibrasyon testleri için ülkemiz altyapısının yeterli olduğu bilinmektedir. Batarya paketlerinin taşınması da kolay olmamakla birlikte çok sık tekrarlanmayacak testler için ülkemizde mevcut altyapıların da kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Bu nedenle ülkemizdeki akredite laboratuvarların kabiliyetlerinin belirlenerek test amacıyla kullanılabilecek altyapıların tespiti etkin kaynak kullanımı açısından önem taşımaktadır.

Pil üreticileri tarafından test edilmesi zorunlu olan testlerin pil üreticileri tarafından yapılacağı ve gerektiği durumlarda sertifikalandırılacağı da göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle pil testlerinin de pil üreticilerinin veya bu konuda çalışma yürüten akredite laboratuvarlar tarafından yürütülebileceği beklenebilir. Ülkemizde pil testlerinin tamamını gerçekleştirebilecek akredite bir altyapı mevcut değildir. Akreditasyona sahip laboratuvarların test kapasiteleri (A-sa / pil) düşük olup, hücre tedarik edilecek muhtemel tedarikçiler tarafından sağlanabilecek hizmetlerin tespit edilmesi gerekmektedir.

Elektrikli araç bataryası testi ve sertifikasyon faaliyetleri için mevcut durumun ortaya konması ve ihtiyaçların belirlenmesi için etkin bir çalışmanın yapılmasına ihtiyaç vardır. Mevcut durumun ortaya konması sonrasında ilgili standartların ve bunun yanında kullanıcı gereksinimlerinin belirlenmesi ve sonrasında ihtiyaçlara uygun altyapının tasarlanması gerekmektedir. Tasalanan altyapının işletilmesi için kalite yönetim sistemi ve akreditasyon sürecinin yaklaşık 10-12 aylık bir süreç gerektirdiği göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

Brandl, M., Gall, H., Wenger, M., Lorentz, V. R. H., Giegerich, M., Baronti, F., Fantechi, G., Fanucci, L., Roncella, R., Saletti, R., Saponara, S., Thaler, A., Cifrain, M., Prochazka W., 2012, Batteries and battery management systems for electric vehicles, DATE-Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, 971-976.

Bergveld, H. J., Pop, V., and Notten, P. H. L., 2008, Method and apparatus for determination of the state-of-charge (soc) of a rechargeable battery (Patent No. WO2008099298A1).

Biçer, E., Mazman, M., Kaypmaz, T.C. ve Uzun, D., 2021, Li-iyon Piller ve Uygulamaları, NOBEL Akademik Yayıncılık, İstanbul, 6-7.

Das, A., Li, D., Williams, D., Greenwood, D., 2018, Joining Technologies for Automotive Battery Systems Manufacturing, World Electric Vehicle Journal 9, 2, 22.



- Doughty, D. H. and Roth E. P., 2012, A General Discussion of Li Ion Battery Safety, The Electrochemical Society Interface, 21, 37-44.
- Finegan D. P., Tjaden B., Heenan, T. M. M., Jervis R., Di Michiel M., Rack A., Hinds G., Brett D. J. L., Shearinga P. R., 2017, Tracking Internal Temperature and Structural Dynamics during Nail Penetration of Lithium-Ion Cells, Journal of The Electrochemical Society, 164, A3285-A3291.
- Fleischer, C., Sauer, D. U., Barreras, J. V., Schaltz, E., Christensen, A. E., 2016, Development of Software and Strategies for Battery Management System Testing on HIL Simulator, Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), April 2016.
- Lamb, J., Orendorff, C.J., 2014, Evaluation of mechanical abuse techniques in lithium ion batteries, Journal of Power Sources, 247, 189–196.
- TS EN ISO/IEC 17025:2017 Deney ve kalibrasyon laboratuvarlarının yetkinliği için genel gereklilikler
- TS EN 62281:2019 Birincil ve ikincil lityum hücreler ve pillerin taşınması esnasında güvenliği
- Yeşilören, G., Karataş S., 2019, Gıda Analiz Laboratuvarları için Akreditasyon Süreci ve Gerekliliği, Türk Akreditasyon Kurumu, Ankara (<https://www.turkak.org.tr/makaleler/gida-analiz-laboratuvarlari-icin-akreditasyon-sureci-ve-gerekliligi.html>)

İnternet kaynakları

- [1] <https://www.turkak.org.tr/akreditasyon/akreditasyon-nedir.html>
- [2] <https://www.turkak.org.tr/basvurular/akreditasyon-basvurulari.html>
- [3] <https://portal.turkak.org.tr/tr/QMS/QMSDocumentsList>
- [4] <https://portal.turkak.org.tr/tr/accreditation/accreditation-certificate/search/3e98b362-03e9-470c-bd3b-d11ae2b5f09e>
- [5] <https://www.tuvsud.com/en/industries/mobility-and-automotive/automotive-and-oem/e-mobility/ev-battery-testing>
- [6] <https://www.ul.com/services/electric-vehicle-battery-testing-and-certification>
- [7] <https://www.intertek.com/batteries/automotive-battery-ev-testing/>





BATARYA İZLENEBİLİRLİK VE GERİ DÖNÜŞÜM

E. Gülođlu¹, G. Orhan¹ [+], M. Ş. Sönmez², F. Burat³, M. Zorađa¹, G. Hapçı Ağaođlu¹, M. Ilgar⁴, R. Ercan⁵

ÖZET

1990'lı yılların başında kişisel tüketim listemize giren Li iyon piller elektrikli araçlarda elektrokimyasal enerji depolama amacıyla kullanılması ile gelişimi oldukça artmaktadır. Analizler Li iyon pil pazarının 2025 yılında yaklaşık 100 milyar \$'a ulaşacağına işaret eder. Var olan coğrafi sınırlı kaynaklar ve Paris antlaşması gereğince kısıtlanmış karbon salınım değerleri dikkate alındığında ülkeler bu pazar gelişiminin tamamını birincil kaynaklardan tamamlamak yerine geri dönüştürülmüş pillerin değerlendirilmesiyle gerçekleştirmek üzere çalışmalarını sürdürmektedir. Avrupa Birliği son dönemde 'batarya pasaportu' uygulamasına önem ve ağırlık vererek batarya piyasasında beklenen gelişimin daha sürdürülebilir ve çevreci olarak ilerlemesi için uygun sistemi oluşturmaya ve kontrol etmeye çalışmaktadır.

Bu çerçevede yapılan araştırmalar varolan teknoloji seviyesinde 2025 yılında Li iyon batarya geri dönüşüm pazarının yaklaşık 25 milyar \$ hacmine sahip olacağına işaret etmektedir. Pazar incelemeleri ise Avrupa, Kuzey Amerika ve Asya'da pil geri dönüşümü yapan firmaların bulunduğunu, Kore, Japonya ve Amerika'da ise Li iyon pil geri dönüşüm kapasitelerinin sadece bu ülkelerde kullanılan Li iyon pillerin % 5-7'si olduğunu göstermektedir. Bu geri kazanım oranı 2030 yılı için ihtiyaç duyulması öngörülen 4 milyon ton Li iyon pil hedefinin çok altındadır. Bu sonuç geri kazanım işlem maliyetini düşürmek, düşük karbon ayak izli proses geliştirmek ve yüksek safılıkta malzeme elde etmek için Li iyon pil geri kazanım konusunun daha yoğun çalışılması gereğine işaret etmiştir.

Bu bölümde geri dönüşüm prosesleri sınıflandırılarak avantaj ve dezavantajlarına bağlı olarak tanıtılmıştır. Dünyada var olan geri dönüşüm tesisleri, kapasiteleri ve gelecek senaryoları hakkında bilgi verilmiştir. Hammadde temini başta olmak üzere geri kazanım/dönüşüm sürecinde yaşanan teknik, bilimsel veya ekonomik zorluklar, Avrupa Birliği ülkelerinin uygulamış olduğu hammadde stratejileri, geri dönüşüm sürecine ait kısıtlar ve fırsatlar hakkında bilgi verilmiştir. Bu bölümde ayrıca, batarya kodlama ve batarya pasaportu hakkında genel bir çerçeve sunulmuştur.

[+] gorhan@iuc.edu.tr

1 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Avcılar, 34320 İstanbul, Türkiye.

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Maslak, 34469 İstanbul, Türkiye

3 İstanbul Teknik Üniversitesi, Cevher Hazırlama Müh. Bölümü, Maslak, 34469 İstanbul, Türkiye

4 Exitcom Recycling, Çepni Mahallesi Suadiye Bağdat Cd. No:40, Kartepe, 41250 Kocaeli, Türkiye.

5 Taşınabilir Pil Üreticileri ve İthalatçıları Derneği (TAP), Oruçreis Mahallesi Giyimkent Sitesi, 13. Sk. 75-77, Esenler, 34230 İstanbul, Türkiye.

1. GİRİŞ

2019 Enerji ve CO₂ Durum Raporu'na (Global Energy & CO₂ Status Report-2019) göre atmosfere CO₂ salınımı 2018 yılı için 33,1 Gt gibi endişe verici bir seviyeye ulaşmıştır. Bu değer Paris Antlaşması çerçevesinde "sürdürülebilir gelişme" senaryosuna (sustainable development scenario) uygun olarak 2040 yılına kadar yaklaşık 20 Gt seviyelerine düşürülmesi gerekmektedir (Fan vd. 2020). Bilindiği gibi küresel sıcaklık artışının bu yüzyılın sonunda 1,5° C ile sınırlandırılmasını hedefleyen Paris Antlaşması, 2015 yılında imzalanmış ve Türkiye Ekim 2021 tarihinde anlaşmaya katılarak taraf olmuştur. Ülkemiz için 2018 yılına ait CO₂ emisyonu ise 420 milyon ton'dur ve bu değer taraf olduğumuz Paris Anlaşması çerçevesinde 2050 yılına kadar kademeli olarak 131,6 milyon ton değerine düşürülmesi gerekmektedir. CO₂ emisyon değerindeki talep edilen bu düşüşü gerçekleştirmenin yollarından biri fosil yakıt kullanımının sınırlandırmaktır. Bu noktada karayolu araçlarında fosil yakıt yerine elektrikli araç kullanımının yaygınlaştırılması sorunun çözümünde etkin olacağı düşünülmektedir. Bununla beraber 2021 yılında gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği toplantısında (COP26) 30 ülke 2040 yılına kadar benzinli ve dizel model araçların satışını durduracaklarını imza altına almışlardır.

Bu bağlamda, 1990'lı yılların başında kişisel tüketim listemize giren Li iyon pillerin, üretim ve tüketimini önümüzdeki yıllar için belirleyen en önemli gelişme bu pillerin elektrikli araçlarda (EA) elektrokimyasal enerji depolama aracı olarak kullanıma başlanması olacaktır. Bu gelişme sonrasında, elektrikli araçlar, enerji depolama ve tüketici elektroniği olmak üzere Li iyon batarya pazarının 2025 yılında yaklaşık 100 milyar ABD dolarına ulaşacağı ve buna paralel olarak Li- iyon batarya geri dönüşüm pazarının ise yaklaşık 25 milyar dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir (Fan vd. 2020, Arshad vd. 2020). 2012 yılında dünya çapında 120 bin elektrikli araç satılmasına karşın, 2021 yılında EA satışı 16,5 milyona çıkmış ve 2030'da ise 200 milyona ulaşacağı öngörülmektedir (Int. Kyn. 1). EA'da 2021-2030 yılları arasında gerçekleşmesi beklenen pazardaki bu büyümeye paralel olarak pil yapısında kullanılan Li, Co, Mn, Ni, Cu, Al, Fe gibi metallerin sadece EA kullanılmak üzere 6-9 kat arasında değişen oranlarda talep artışı öngörülmektedir (Latini vd. 2022). Coğrafi sınır koşulları ve madenciliğin çevreye etkileri göz önüne alındığında Li iyon pil pazarındaki özellikle EA çerçevesinde gelişen bu talep artışının birincil üretim ile karşılanamayacağı çok açık bir gerçektir.

Li iyon batarya kullanımındaki bu hızlı artışa bağlı olarak, kullanım ömrünü tamamlamış batarya miktarı 2025 için 80x10³ ton, 2030 için ise 200x10³ ton olması beklenmektedir (Tawonezvi vd. 2023). Avrupa'da faaliyet gösteren geri dönüşüm tesisleri 2022 yılında ömrünü tamamlamış Li iyon bataryaların ancak %45'ini değerlendirebilmiştir. Kurulu tesis kapasitesi aynı şekilde kalması durumunda bu oranın 2030'da %27 seviyesine gerileyeceği ön görülmektedir. Bu nedenle 2030 yılına kadar ön görülen Li iyon pil geri dönüşümünü karşılayabilmek için geri dönüşüm şirketlerinin kapasitelerini önemli ölçüde artırması ve yeni tesislerin kurulması gerekmektedir. Kurulacak yeni tesisler ile beraber Avrupa'da hidrometalurji esaslı geri dönüşüm yapan tesislerin payının toplama göre %82'ye çıkması, pirometalurji temelli geri dönüşüm tesislerinin %10, mekanik işlem yapan tesislerin ise %8 oranında bulunması beklenmektedir (Latini vd. 2022). AB ülkelerinde Li iyon bataryaların geri dönüşüm verimliliğinin 2025'e kadar %65'e, 2030'a kadar %70'e çıkması için gerekli yasal çerçeve hazırlanmıştır. Amerika'da ise bazı eyaletlerde (New York, California ve Minnesota) ikincil pillerin geri dönüşümü zorunlu hale getirilmiştir (Int. Kyn. 2).

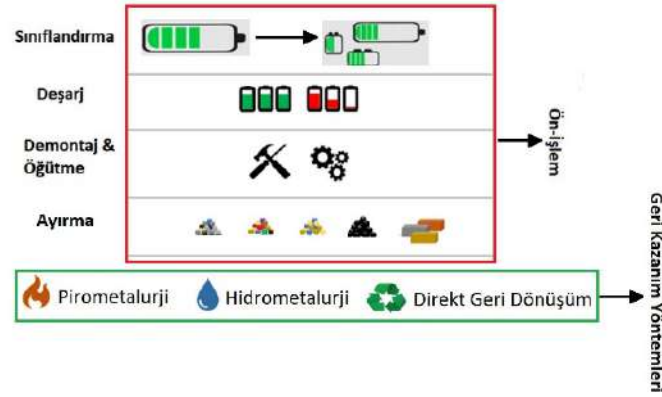
Sonuç olarak, Li iyon pil geri kazanımı çevresel ve sürdürülebilir enerji politikaları çerçevesinde bir zorunluluktur. Bununla birlikte geri dönüşüm sürecinde açığa çıkan toplam karbondioksit emisyonunun, birincil üretim sürecinde yayılan karbondioksit emisyonuna göre daha az olmasına yönelik bir düzenleme henüz AB ülkeleri ve ABD'de mevcut değildir.

2. LİTYUM İYON PİLLERİN GERİ KAZANIMI

Geri kazanım, bir atıktaki metalik ve/veya metal dışı değerlerin aynı amaçlı yeniden kullanımı için değerlendirilmesi süreçleridir. Geri dönüşüm ise atık malzemelerin başlangıç ürüne veya farklı ürünlere yeniden işlendiği süreçlerdir. Bu bağlamda örneğin kullanım ömrünü tamamlamış Li iyon pillerin katot aktif tozundaki metalik değerlerin yeniden Li iyon pillerde kullanımı amacıyla yapılan işlemler geri kazanım olarak tanımlanır. Benzer şekilde yine kullanım ömrünü tamamlamış Li iyon pildeki çelik veya plastik malzemenin farklı alanlarda kullanımı amacıyla değerlendirilmesi geri dönüşüm olarak tanımlanmaktadır. Dolayısı ile Li iyon pillerin değerlendirilmesi; geri kazanım ve geri dönüşüm süreçlerini birlikte içerir.

Genel olarak gelişmiş bir geri kazanım prosesi (Şekil 1) ön işlemler ve geri dönüşüm olmak üzere iki temel iş adımıyla oluşur. İlk aşamadaki ön işlemler mekanik geri dönüşüm işlemi veya fiziksel işlem olarak tanımlanır ve sırasıyla pillerin

sınıflandırılması, tasnifi, deşarj edilmesi, sökme, öğütme ve ayırma işlemlerini içermektedir. Ön işlemler sürecindeki ana zorlukları; a) Farklı elektrikli araçların batarya paketi muhafazasının farklı tasarımı ve bağlantılara sahip olması, b) Farklı pil yönetim sistemlerinin varlığından dolayı otomizasyonun kurulamaması veya yetersiz kalması, c) Sökme işlemi sırasında olası kazalar (pil patlaması ve/veya yangın çıkışı gibi), ve d) Pilin çözünmesi sürecinde çevreyi kirlitecek zararlı gazlar ve toksik maddeler çıkışı şeklinde özetlemek mümkündür. Bu aşamadan sonraki geri dönüşüm operasyonu bir seri metalurjik işlemde oluşur. Metalurjik işlemler, piro-, hidro-, solvo-metalurji yöntemlerini ayrı ayrı veya bu yöntemlerin kombinasyonlarını içerebilir. Bu aşamadaki ana zorluklar ise şu şekilde özetlenebilir: a) proseslerin yüksek enerji ihtiyaçlarına sahip olması, b) iyileştirmenin kapsamı ve çeşitliliğinin var olan teknoloji seviyesinde sınırlı bulunması ve buna bağlı geri kazanımın nispeten düşük verimlerde kalması ve c) kullanılan proseslerin getirdiği çevresel yük (Ali vd. 2022).



Şekil 1. Ömrünü tamamlamış pillerin geri kazanım süreci.

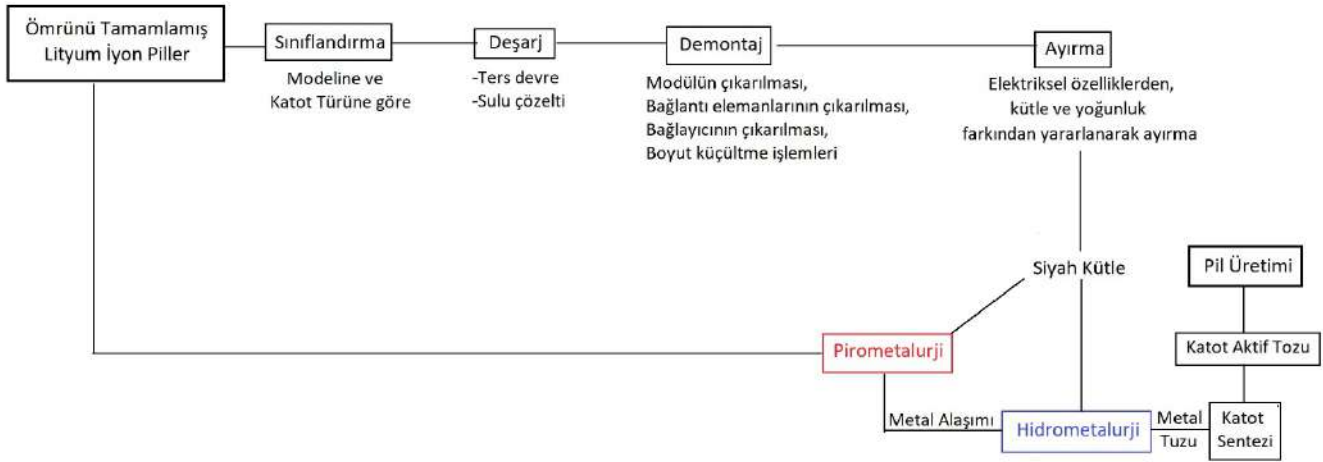
2.1. Ön İşlemler (Mekanik İşlemler)

Geri kazanım prosesi, kullanım ömrünü tamamlanmış pillerin belirli merkezlerde toplanarak bir geri kazanım tesisine nakledilmesi ile başlar. Şekil 2’de ön işlemler aşamasında yer alan adımlar ve bu aşamalarda kullanılan farklı yöntemler verilmiştir. Belli özelliklerdeki pillerin sınıflandırılması geri kazanım aşamasındaki yöntemin uygulanabilirliği ve prosesin toplam verimi için oldukça önemlidir. Şöyle ki, sınıflandırma aşamasında verimin %100 olduğu bir çalışmada, kullanım ömrünü tamamlamış pillerin %50’sinin toplanması ve bu pillerdeki metalik değerlerin %95 proses verimi ile geri kazanılması durumunda pildeki metalik değerlerin sadece %47,5’inin geri kazanımı söz konusudur. Aynı çalışmada, sınıflandırma aşamasındaki verimin %70 olması durumunda metalik değerlerin toplam geri kazanım verimi %33,25 seviyelerine düştüğü bildirilmiştir (Hagelüken 2012). Bu örnekte de görüldüğü gibi sınıflandırma süreç verimini birincil olarak etkilemektedir. Ön işlem adımları sayesinde hem pillerin güvenli olarak proses edilmesi, depolanması hem de geri dönüşümü sağlanır. Diğer taraftan verimli bir ön işlem proses tasarımı sayesinde hem hurda hacminin azaltılması hem de ürün kazanım verimlerinin artırılması sağlanır. Günümüzde ayırma işlemi, fiziksel görünüme, batarya tipine, pillerin içerdiği kimyasallara bağlı olarak gerçekleştirilebilir. Ancak bataryaların sınıflandırılması için yeterli bilgi, batarya kimliğinde bulunmamaktadır. Bu nedenle batarya bileşenlerinin kimyasal içerikleri, elektrolit özellikleri, katot-anot malzemeleri gibi bilgilerin bataryaya tanımlanması amacı ile “batarya pasaportu” uygulamasına geçilmesi için çalışmalar sürmektedir. Batarya pasaportu uygulamasının hayata geçmesi için gereken süre boyunca, pilin çalışma voltajının sınıflandırma aşamasında bir parametre olduğu göz önüne alınabilir. Sınıflandırılan pillerin sahip oldukları enerji seviyeleri test edilir; %70’in üzerinde enerji taşıyan piller enerji depolama kaynağı olarak kullanıma sokulurken, bu değerin altındaki piller geri kazanım işlemine tabi tutulur.

Pillerin tam deşarjı, proses veriminden önce insan iş güvenliği ve sağlığı açısından son derece önemlidir. Deşarj işlemi ile pildeki artık kapasitenin kırma işlemi esnasında anot ve katodun teması ile kısa devreye, sonuçta kontrolü oldukça zor olan yangınlara neden olması engellenir. Bu aşama; (a) Elektronik yük yoluyla, (b) Sulu çözeltiler aracılığıyla veya (c) Endüktif etki yoluyla olmak üzere farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir.

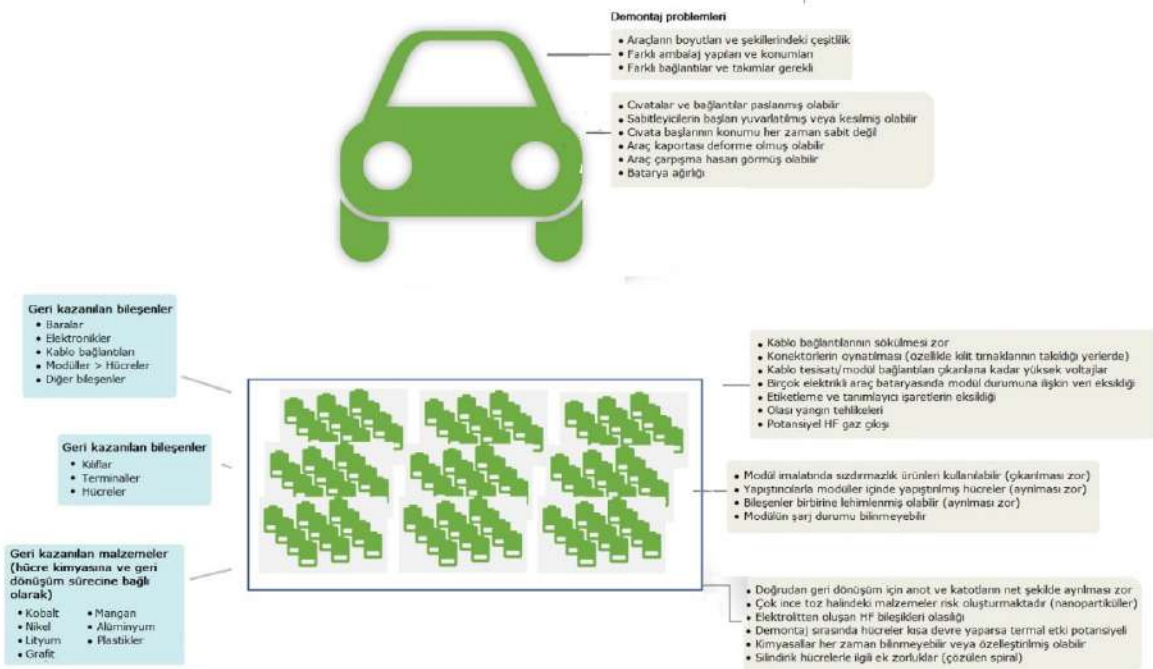
Deşarj aşamasını takiben pil içerisindeki elektrolit, bağlayıcı gibi bileşenlerin etkisiz hale getirilmesi (deaktivasyonu-pasifleştirilmesi) amacıyla; kriyojenik ve/veya piroliz prosesleri iki farklı yöntem olarak uygulanır. Kriyojenik soğutma prosesi sıvı azot kullanılarak (-175 °C /-200 °C) pillerin inert (stabil) hale getirilmesi amacıyla yapılır. Termal deaktivasyon prosesi esas olarak deşarj işlemiyle aynı amaca sahip olup, bu aşamadaki amaç lityum oksidasyonu ve kısa devreye bağlı ani tutuşmaların ve yangınların önlenmesidir. Bu aşamada ortaya çıkabilecek bir yangının kontrol altına alınması veya söndürülmesi yangının boyutuna ve pil tipine bağlı olmakla birlikte klasik yangın söndürme yöntemleri genellikle

yeterli kalmamaktadır. Kum havuzları veya kuru toz uygulamaları günümüzde kullanılan yöntemler arasındadır. İşlemin hızı bir avantaj iken, ilk yatırım ve işletme giderlerinin yüksek olması bu prosesin yaygın kullanımını sınırlamaktadır. Piroliz işlemi genellikle söküm öncesi pil içerisindeki elektrolitin geri kazanımı veya uzaklaştırılması amacıyla 120-600 °C aralığında, bir saat süre ile ve genellikle döner tip fırında uygulanır (Şekil 2).



Şekil 2. Ömrünü tamamlamış pillerin geri kazanım aşamaları.

Deşarj ve/veya termal deaktivasyon sonrasında pillerin demontajı gerçekleştirilir. Günlük hayatımızda dizüstü bilgisayar, cep telefonu gibi cihazlarda kullanılmakta olan bataryalar genellikle tek modülden ibaret seri ve/veya paralele bağlı elektrokimyasal hücrelerden oluşurlar. Elektrikli araçlarda kullanılan sistemler ise çok sayıdaki modülden oluşurlar. Şekil 3'te bir elektrikli araç bataryasının bileşenleri ve demontaj sürecinde yaşanan olası problemler ve demontaj çıktıları verilmiştir. Kullanım ömrünü tamamlamış EA tipi bir LiB farklı sayı ve dizilimdeki modül ve hücrelerden oluşabilir. Örneğin, Tesla Model S'de 444 hücre bir modülü ve 16 modül ise bir paketi oluştururken, BMW i3'te 12 hücre bir modülü ve 8 modül ise paketi oluşturmaktadır. Hücreler bir EA'nın ağırlıkça yaklaşık %55'ni oluşturmaktadır. Bir EA bataryasının ağırlığı ise, boyutu ve enerji depolama kapasitesine göre değişir. Genellikle, batarya büyüklüğü ve ağırlığı, enerji depolama kapasitesi ile doğru orantılıdır (Harper vd. 2019). Örneğin, 6 ila 12 kW·sa bataryalar genellikle 100-150 kg arasında ağırlığa sahiptir, 60-100 kW·sa arasındaki bataryalar ise 350-600 kg arasında değişmektedir ve genellikle aracın ağırlığının %25'ini oluşturmaktadır. Marka ve modellere göre batarya ağırlıklarına örnek vermek gerekirse; Tesla Model S - 544 kg, Tesla Model Y - 771 kg ve Nissan Leaf - 303 kg ağırlığındadır. Farklı hücre içeriklerine göre değişen EA bataryaların bileşenleri konu hakkındaki literatüre dayandırılarak Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 3. EA bileşenleri ve farklı seviyelerde demontaj problemleri.

**Tablo 1.** Farklı tipteki elektrikli araç bataryalarının bileşenleri.

Batarya Bileşenleri (%)	Elektrikli Araç Batarya Kimyası						
	LMO	NMC-111	LFP	NMC-532	NMC-622	NMC-811	NCA
Aktif Malzeme	43-45	38-40	35-37	38-42	35-37	30-32	35-38
Karbon	15-20	18-22	17-20	21-23	22-23	21-23	23-25
Bağlayıcı	1,2-1,3	1,7-1,8	1,1-1,2	1,2-1,3	2,2-2,3	2,2-2,5	1,1-1,2
Bakır	8,0-8,5	7,2-7,5	8,0-8,3	7,2-7,3	7,0-7,2	7,2-7,3	6,8-7,0
Alüminyum	16-17	16-17	17-18	16-18	15-17	17-19	19-21
LiPF ₆	1,4	1,4	1,8	1,3	1,4	1,4	1,4
Çelik	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
Yalıtım	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4
Elektronik aksam	1,4	1,7	1,4	1,7	1,8	1,9	1,9

Demontaj işleminden sonra, kırma ve öğütme gibi boyut küçültme ve ayırma aşamaları gerçekleştirilir. Boyut küçültme devresinden sonra eleme yoluyla yapılan separasyon-ayırma işlemi sonucunda elek altından elde edilen katot aktif tozundaki metalik malzemeler ile anot malzemedeki gelen grafit karışımına “siyah kütle” veya “pil tozu” adı verilir. Bu toz kritik metalleri içerdiğinden yüksek ekonomik değer sahiptir. Bu aşamada siyah kütledeki Li, Co, Mn, Ni gibi metalik değerlerin ve grafitin geri kazanımı ön plana çıkmaktadır. Ekonomik olarak kıyaslandığında elek üzerinde kalan bu metaller maden ocağından çıkarılan ve herhangi bir zenginleştirme işlemine tabi tutulmamış cevherlerin (tüvenan) metal içeriklerinden onlarca kat daha zengin, dolayısıyla da çok daha yüksek ekonomik değere sahiptir. Elek üzerinde yoğunlaşan anot ve katot elektrotları (folylardan gelen Cu ve Al, anot ve katot aktif malzemedeki gelen Ni, Fe, Mn, Co vb), pilin diğer aksamı (kılıftan gelen paslanmaz çelik veya alüminyum folyo) ve plastiklerin ise mutlaka geri dönüştürülerek değerlendirilmelidir.

Geri dönüşüm prosesinde siyah kütle tane boyutu, reaksiyon hızı ve proses verimini etkileyen önemli bir parametredir. Etkin bir geri dönüşüm prosesi uygulanabilmesi için bataryayı oluşturan bileşenlerin boyut küçültme işlemleri ve siyah kütle tane boyutu ön işlem aşamasında optimize edilmelidir.

Katot (alüminyum) ve anot (bakır) akım toplayıcı folyolarının üzerine yaklaşık 20-40 µm kalınlığında; anot için grafit ve katot için çeşitli metal oksitler veya fosfatlar bağlayıcı (PVDF) ilavesiyle konumlandırılır. Bu elektrotlar, boyut küçültme aşamasında yüksek torka sahip kesicilerin kullanıldığı kırma devresinde parçalanır. Bu aşamada ortaya çıkan pil tozunu kirletmemek amacıyla metalik folyo, kılıf malzemeleri ve plastikler ancak belirli bir boyuta kadar indirilmelidir. Seçici ve kademeli boyut küçültme işlemi sonrasında elek yardımıyla yapılan boyuta dayalı ayırma işlemi ile aktif anot ve katot malzemeleri içeren pil tozu (Li, Co, Ni, Mn, grafit) elek altından alınırken; Cu ve Al folyo, kasa ve plastik gibi malzemeler elek üstünden ayrılır. Katot aktif tozunun yüksek verimli olarak ayrıldığı eleme boyutunun 0,2 mm olduğu literatürde verilmiştir (Çuhadar vd. 2023). 200 mikrondan daha küçük bir boyut küçültme işlemi, siyah kütle tane boyutunun (pil tozunun) geri kazanım verimini azaltmaktadır. Anot (bakır) elektrot üzerindeki grafit kırma işlemleri neticesinde kolaylıkla ayrılmaktadır. Pil geri dönüşüm endüstrisinde en büyük problem ve bilimsel çalışmaların odak noktası poliviniliden florür (PVDF) gibi organik bağlayıcılarla alüminyum folyo (katot elektrot) üzerine sıkı olarak kaplanan Co, Li, Ni ve Mn gibi katot pil tozlarının etkili olarak sıyırılmamasıdır.

Mekanik ayırma işlemleri uygun yürütülmez ise, elektrot folyoları ve ayırıcıların kalıntıları siyah kütleyle kolaylıkla kirletir ve kimyasal işlemler sırasında seçicilik kaybı gibi birçok kritik soruna neden olabilir. Li iyon pilleri içerisinde bulunan yüksek ekonomik değere sahip Li, Co, Ni ve Mn gibi metallerin bulunduğu pil tozlarının kazanımında piro-hidrometalurjik prosesler ön plana çıkmakta iken Cu, Al ve Fe gibi metaller ve plastikler, fiziksel veya mekanik yöntemlerle ayrılabilir ve yüksek içerikli konsantreler halinde üretilebilmektedir. Bu nedende, LIB'lar bu metaller için birinci sınıf ikincil kaynak niteliğindedir. Mekanik işlemler sonunda pillerin kompozisyonunda bulunan malzemeler fiziksel davranışlarına göre (iletkenlik, yoğunluk veya manyetik duyarlılık) ayrılmaktadır. Plastik ve metallerin arasındaki özgül ağırlık farkının yüksek olması nedeniyle gravite ayırma yöntemleri ön plana çıkmaktadır. LIB'daki ferromanyetik metaller (Fe&Ni), uygun bir manyetik ayırıcı kullanılarak diyamanyetik Cu ve Al'dan etkili bir şekilde ayrılabilir. İletken ve yalıtkan özellik farkına dayalı olarak yapılan elektrostatik ve Eddy-current ayırma işlemi ile Cu ve Al farklı ürünler halinde elde edilebilir. İki veya daha fazla partikülün yüzey özelliklerinin farklılıklarından yararlanılarak yapılan köpük flotasyonu cevher hazırlama endüstrisinde, fiziksel yöntemlerle kolaylıkla konsantre edilemeyen, ince, hidrofobik (suyu sevmeyen) ve hidrofilik (suyu

seven) parçacıkları ayırmak için sıklıkla kullanılır. Flotasyon işlemi için yüzey özelliklerini değiştirecek, yüzmeyi veya batmayı sağlayacak yardımcı reaktifler kullanılır (Burat vd. 2009).

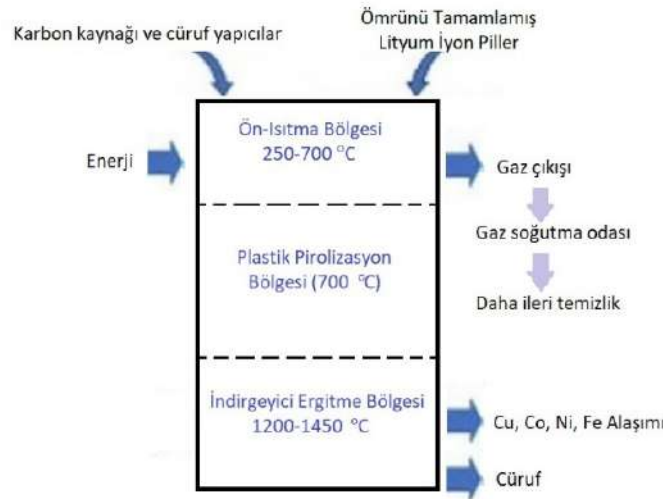
Ön işlem adımları sonucunda elde edilen siyah kütledeki metallerin geri kazanımı farklı geri kazanım yöntemlerinin ayrı ayrı veya birlikte kullanıldığı prosesler çerçevesinde gerçekleştirilir.

2.2. Geri Kazanım Yöntemleri

Ön işlem sonrasında yürütülen geri kazanım aşamasında bir veya genellikle birbirleriyle paralel veya seri çalışan birden fazla yöntem kullanılarak geri kazanım prosesi tamamlanır.

2.2.1. Pirometalurjik Yöntem

Pirometalurjik yöntemde, Li iyon pil siyah kütlesi veya herhangi bir ön işlem görmemiş Li iyon pil hücreler modüllerinden ayrıldıktan sonra doğrudan cüruf yapıcı ve karbon ile birlikte bir fırına beslenir ve işlem sonucunda bir alaşım ve bir cüruf elde edilir. Pirometalurjik yöntemde ait akış şeması Şekil 4'te verilmiştir. Yöntemde fırına beslenen ürün üç farklı sıcaklıktaki zonda işlem görmektedir. Bu zonlar yukardan aşağıya, ön ısıtma, plastik-piroliz ve metal ergitme/redükleme zonlarıdır. Ön ısıtma zonu yaklaşık 300°C'de tutularak organik bileşenler sistemden uzaklaştırılır. Orta bölgede bulunan plastik-piroliz zonunda PVDF, seperatör ve kılıf gibi pil bileşenleri uzaklaştırılır. Plastik-piroliz bölgesinin sıcaklığı yaklaşık olarak 700°C olarak belirlenmiştir. En üstte bulunan ergitme/redükleme bölgesi oksijence zenginleştirilmiş gaz atmosferine sahiptir. Bu sayede karbon bileşeni oksitlenerek uzaklaştırılmakta, Cu, Co, Ni, Fe metalleri redüklenerek alaşım haline getirilmekte ve Li, Al, Si ve bir miktar Fe metalleri ise cürufa alınmaktadır. Proses sürecinde ortaya çıkan toksik gazlar ve buharlaşan bileşenler fırın dışına kontrollü olarak alınarak dekompoze edilmekte ve böylece çevre yükü olabildiğince azaltılmaktadır (Zhang vd. 2022). Proses sonunda pil içerisindeki Co, Ni, ve Cu gibi metaller, bir alaşım oluştururken; Li, Al ve Fe cüruf fazına geçerler. Alaşımı oluşturan metallerin (Co, Ni, Cu) seçimli veya birlikte kazanımları daha sonra uygulanan hidrometalurjik bir proses sayesinde gerçekleştirilir. Cüruf fazına geçen metallerin hidrometalurji gibi ilave metalurjik prosesler sayesinde geri kazanımında ise büyük güçlükler yaşanmaktadır (Hantanasirisakul ve Sawangphruk 2023). Bununla beraber pirometalurjik yöntem yüksek sıcaklıkta gerçekleştirildiğinden (ortalama 1500°C) enerji tüketimi ve pil içerisinde bulunan seperatör, kılıf ve elektrolit gibi yüksek karbon ayak izine sahip bileşenlerin yakılması nedeniyle işlem sonucunda çıkan sera gazları diğer yöntemlere göre daha fazladır (Mishra vd. 2022).



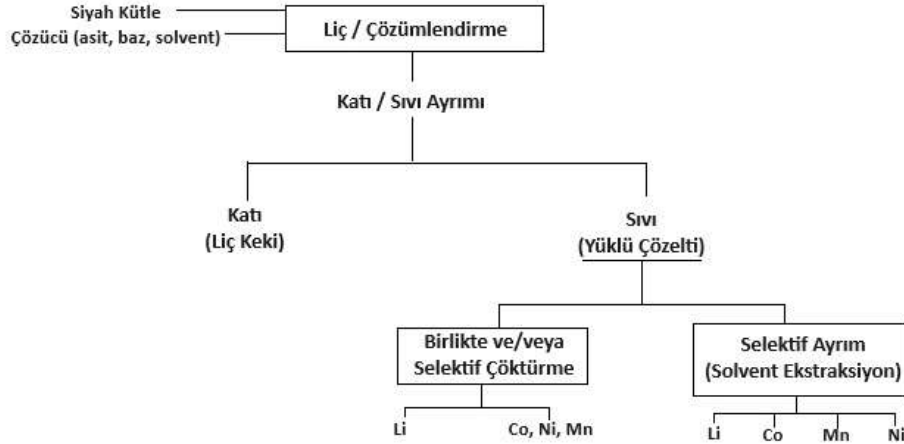
Şekil 4. Pirometalurjik Batarya Geri Kazanımı Proses Akış Şeması.

Pirometalurjik yöntemin dezavantajlarına rağmen, yöntemin uygulama kolaylığı, deşarj etme, pil demontajı ve bileşenlerine ayırma gibi ön işlemler gerektirmemesi, kolayca büyük ölçekli çalışmalara adapte edilebilmesi, batarya tiplerindeki farklılıklara karşı yöntemin esnek olması gibi avantajları endüstriyel ölçekte tercih edilmesini sağlamaktadır (Leal vd. 2023; Zhang vd. 2022).

Pirometalurjik yöntem ile geri dönüşüm yapan endüstriyel firmalara Umicore, SNAM, Batrec, Inmetco, Sumitomo-Sony örnek verilebilir (Jin vd. 2022).

2.2.2. Hidrometalurjik Yöntem

Hidrometalurjik yöntem, kompleks oksit formundaki katot aktif tozunun veya siyah kütlede bulunan metallerin, selektif veya birlikte geri kazanımı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntem; kimyasal çözündürme (liç) işlemi sonucunda elde edilen polimetallik yüklü çözümlerden birlikte çöktürme (metallerin birlikte veya Ni, Co, Mn ile Li olmak üzere iki adımda çöktürülmesi) ve/veya solvent ekstraksiyon (SX) yöntemi ile metallerin ayrı olarak elde edilmesi adımlarını içerir. Şekil 5'te işlem adımlarını gösteren akış şeması verilmiştir.



Şekil 5. Hidrometalurjik Batarya Geri Kazanımı Proses Akışı Şematik Gösterimi.

Kimyasal çözündürme işlemi ile Li, Co, Ni, Mn gibi kritik metaller, grafit ve Al, Cu gibi değerli pil bileşenleri geri kazanılmaktadır. Siyah kütledeki metallerin hidrometalurjik geri kazanımında; yüksek çözündürme kabiliyetlerinden dolayı organik ve inorganik asitler liç işlemi için sıklıkla kullanılmaktadır. Endüstriyel boyuttaki liç işleminde en sık kullanılan asitler HCl, HNO₃ ve H₂SO₄'tür. Bununla birlikte Sitrik asit-(C₆H₈O₇) (Li vd. 2018), Asetik asit-(CH₃COOH) (Natarajan vd. 2018), DL-malik asit-(C₄H₅O₆), (Ning vd. 2020; Zhou vd. 2021), Askorbik asit-(C₆H₈O₆), (Lie vd. 2021) Oksalik asit-(C₂H₂O₄), (Zeng vd. 2015), Tartarik asit-(C₄H₄O₆) (Chen vd. 2019) gibi organik asitlerin ayrı ayrı veya farklı karışımlar (Yan 2021) halinde kullanıldığı çalışmalarda elde edilen sonuçlar, inorganik asidin sahip olduğu avantajları da göz önüne alarak, yakın gelecekte endüstriyel uygulamalarda kullanılabileceğini işaret eder niteliktedir.

Pirometalurji ile karşılaştırıldığında hidrometalurji, seçimli ve çevre dostu olması, düşük sıcaklıkta gerçekleştirilebilmesi, düşük enerji tüketimi ve yüksek verim gibi avantajları ile daha fazla ilgi çekmektedir (Zhang vd. 2022). Bununla birlikte kullanılacak asidin çevresel etkileri ve yine kullanılacak aside göre SO₃, Cl₂ ve/veya NO_x gazlarının ortaya çıkması hidrometalurjik yöntemin dezavantajları arasındadır (Leal vd. 2023).

Kimyasal çözündürme işleminden sonra çözüme alınmış metalik değerleri geri kazanmak amacıyla birlikte çöktürme, solvent ekstraksiyon veya elektrokimyasal işlemler uygulanmaktadır. Birlikte çöktürme yönteminde liç işleminden gelen yüklü çözüme çöktürücü ajan ilavesi ve pH ayarı yapılarak uygun çökme şartları sağlanan metaller, çözümden ayrılarak katı faza geçirilmektedir.

SX işleminin yükleme kademesinde geri kazanılması istenen metaller organik faza alınmaktadır, takip eden sıyırma kademesinde ise organik fazdaki metaller selektif olarak sıvı fazda zenginleştirilerek geri kazanım sağlanmaktadır. Metalik değerlerin çözümden geri kazanımında uygulanan bir diğer yöntem elektrokimyasal uygulamalardır. Bu kapsamda elektroliz ve hidrometalurjik işlemler başlığında laboratuvar ölçekli çalışmalarda çözücü ortam olarak asidik ve bazik çözümlerin kullanıldığı yöntemlerin yanında, çeşitli bakteri (sülfür oksitleyici ve demir oksitleyici bakteriler ve kombinasyonları gibi) ve mantar kullanımı ile çözümden Co, Mn ve Ni metalleri geri kazanıldığı biyoliç yöntemi (Golmohammadzadeh vd. 2022; Harper vd. 2019; Zhang vd. 2022) üzerine akademik çalışmalar yapılmaktadır.

Hidrometalurji başlığı altında değerlendirilen son gelişme ise solvometalurjik liç işlemleridir. Bu yöntemde, hidrometalurjik uygulamalarda çözücü olarak kullanılan "suyun" yerini organik çözücüler almaktadır. "Ötektik Altı Çözücü" adı verilen bu çözücüler çevre dostu ve yeniden kullanılabilir olduğundan solvometalurjik yöntem "yeşil kimya uygulaması" olarak kabul edilmektedir (Binnemans ve Jones, 2017; Peeters vd. 2020). Çok az miktarda su kullanımı, liç sürecinde emisyon gelişmemesi gibi avantajları yanında yüksek liç verimi için uzun reaksiyon süresi dezavantajdır.

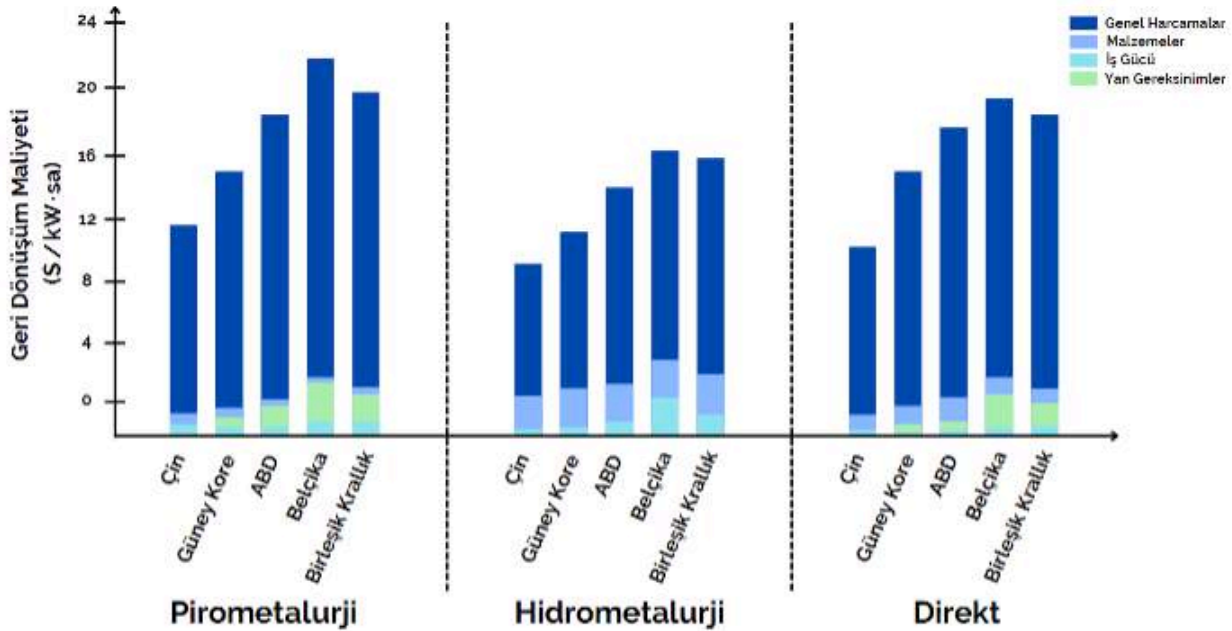
2.2.3. Direkt Geri Dönüşüm (Upcycling)

Kapasitesi %70'in altına düşmüş veya iç direnci %30'a çıkan piller "ömrünü tamamlamış" olarak sınıflandırılmaktadır. Dendrit oluşumu, aktif Li⁺ iyonu tüketimi, elektrotlarda meydana gelen hasarlar bu oranlara ulaşma süresini kısaltmaktadır. Arayüzey stabilitesi pil performansını belirleyen ana faktördür. Tersinir olmayan kapasite kaybı veya voltaj kaybı pilin performansında düşüş olarak kendini göstermektedir. Direkt geri dönüşüm yöntemi, bu kayıplarla birlikte kompleks kimyasal reaksiyonları ve depo edilen enerjideki düşüşü elimine ederek ve katot aktif malzemesinin ana yapısına odaklanarak yeniden kullanımına uygun şekilde rejenerasyonu gerçekleştirir. Direkt geri dönüşüm yöntemi pirometalurjik ve hidrometalurjik proseslerden önce gerçekleştirilen ön işlem aşamasında da uygulanabilmektedir (Zhang vd. 2022). Yöntem kullanım ömrünü tamamlamış pillerdeki katot aktif tozuna öncelikle lityum takviyesi yaparak yeniden kullanımı şeklinde tanımlanabilir. Yöntem hızlı ve ekonomik olmakla birlikte, bu yöntemle yeniden üretilen katot aktif tozunun elektrokimyasal performansı diğer yöntemlere göre üretilenler ile karşılaştırıldığında düşük kalması yöntemin önemli dezavantajıdır. Li iyon pillerin geri kazanımında endüstriyel olarak kullanılmakta olan pirometalurjik ve hidrometalurjik esaslı yöntemlerin kimyasal maliyet, çevresel etki, enerji ve geri dönüşüm verimi gibi parametrelere bağlı karşılaştırılması Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Batarya geri kazanım proseslerinin karşılaştırılması (Bae ve Kim 2021).

Şekil 7'de ise farklı ülkelerde NCA tipi piller için geri dönüşüm maliyet analizi verilmiştir.



Şekil 7. 240 W·sa·kg⁻¹ NCA batarya paketi için geri dönüşüm maliyetinin ülkeler ve yöntemlere bağlı değişimi (Murdoch vd. 2021).

3. LİTYUM İYON PİL GERİ DÖNÜŞÜM TESİSLERİ

Dünya genelinde faaliyet gösteren Li iyon batarya geri dönüşüm tesisleri, kapasiteleri, kullandıkları geri dönüşüm prosesi, yıllık üretim hacmi ve son ürünleri Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2'de verilen yöntemlerde; pirometalurjik (turuncu), mekanik (gri) ve hidrometalurjik (mavi) olarak tanımlanmıştır. Geri dönüşüm ürünü ve geri kazanılan malzemeler ise geri kazanım oranı ve kalitesine göre sınıflandırılmıştır. Buna göre, bataryada kullanıma uygun (koyu yeşil), yüksek kalite (açık yeşil), ilave metalurjik işlem gerektiren (sarı), geri kazanım sırasında kayıp (kırmızı) ve geri kazanım sürecine dahil edilmeyen (beyaz) malzemeleri göstermektedir (Latini vd. 2022).

Dünya genelinde yapılan dikkat çeken geri dönüşüm ve pil yatırımları aşağıda özetlenmiştir:

Gerİ dönüşüm yatırımları:

- Glencore (Norveç) : 200 milyon \$ (Li-Cycle'a yatırım)
- Umicore (Belçika) : 525 milyon \$
- Aurubis AG (Almanya) : 200 milyon €
- Redwood Materials (ABD) : 3,5 milyar \$

Pil üretimindeki yatırımlar:

- LG Energy Solutions (Güney Kore) : 3,1 milyar \$ (Güney Kore'de pil üretimi), 4,4 milyar \$ (Honda Motors ile birlikte), 4,2 milyar USD (Stellantis ile birlikte)
- BYD (Çin) : 1,4 milyar \$ (Çin'de pil üretimi)
- Panasonic (Japonya) : 4 milyar \$ (ABD'de pil üretimi)
- SK On (Güney Kore) : 8,9 milyar \$ (ABD'de pil üretimi), 5 milyar \$ (Hyundai ile birlikte)
- SVOLT (Çin) : 2 milyar \$ (Avrupa'da pil üretimi)

Gerİ dönüşüm destekleri:

- Stena (İsveç) : 7,7 milyon \$ özel hibe (Swedish Energy Agency tarafından)
- LiBinfinity projesi (Almanya) : 16,66 milyon € hibe (Alman Ekonomi ve Çevre Koruma Bakanlığı tarafından)
- Redwood Materials (ABD) : 700 milyon \$ (özel yatırımcılardan hibe)
- Consortium (Blackstone Technology GmbH tarafından yönetilen): 24,1 milyon € hibe (Alman Ekonomi ve Çevre Koruma Bakanlığı tarafından)

Pil üretimindeki destekler:

- SK on (Güney Kore) : 1,5 milyar \$ özel hibe
- Northvolt (İsveç) : 620 milyon \$ özel hibe (Volkswagen)

2020 yılı öncesi pil geri kazanım pazarının %60'ı Çin, %20'si Güney Kore ve kalan %20'si diğer ülkeler tarafından gerçekleştirilmekte iken özellikle Avrupa Birliği ülkeleri ve Amerika Birleşik Devletleri'nde gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda denge AB ülkeleri ve ABD lehine değişim göstermektedir. Dünyada gerek pil üretimi gerekse ham madde talebinin karşılanması için çok büyük yatırımlar yapılmaktadır ve bu noktada geri dönüşümün önemi kritik ve stratejik önem kazanmaktadır.

Tablo 2. Avrupa, Kuzey Amerika ve Asya'da bulunan tesislere ait geri dönüşüm yöntemleri, elde edilen ürünler ve yıllık kapasiteleri (Latini vd. 2022).

	Co	Ni	Li	Mn	Al	Cu	C	Elektrolit	Plastik	Fe	Yıllık Üretim (ton/yıl)
AVRUPA											
Umicore (Belçika)	CoCl ₂	Ni(OH) ₂	Curuf	Curuf	Curuf	CuS	-	-	-	Curuf Fe(OH) ₃	7.000 (2020)
Accurec (Almanya)	Alaşım	Alaşım	Curuf	Alaşım	Kılıf	Al-Cu levha	-	-	-	Çelik aşım	4.000-6.000 (2020)
					Al-Cu levha	Cu					
					Al(OH) ₃						
Erasteel (Fransa)	Alaşım	Alaşım	Curuf	Curuf	Curuf	Alaşım	-	-	-	Alaşım	20.000 (2020)
Akkuser (Finlandiya)	Siyah Kütle	Siyah Kütle	Siyah Kütle	Siyah Kütle	Siyah Kütle	Siyah Kütle	Siyah Kütle	-	Plastik parça	Çelik Parça	1.000 (2020) 3.000 (2020)
BatRec (İsviçre)	Siyah Kütle	Siyah Kütle	Siyah Kütle	Siyah Kütle	Al-Cu levha	Al-Cu levha	Siyah Kütle	Organik Çözücüler	Plastik parça	Çelik Parça, Fe(OH) ₃	200 (2020)
Recupyl (Fransa)	Co(OH) ₃	-	Li ₂ CO ₃	-	Al-Cu levha	Al-Cu levha	Grafit	-	Plastik parça	Çelik Parça, Fe(OH) ₃	110 (2020)
	Co		Li ₂ PO ₄			Cu					
KUZEY AMERİKA											
Inmetco (ABD)	Alaşım	Alaşım	Curuf	Curuf	Curuf	Alaşım	-	-	-	Alaşım	6.000 (2020)
Glencore (Kanada)	CoCl ₂	Alaşım	Curuf	Curuf	Curuf	Alaşım	-	-	-	Alaşım	7.000 (2020)
Retriev (ABD)	Siyah Kütle	Siyah Kütle	Li ₂ CO ₃	Siyah Kütle	Al-Cu- plastik parçalar	Al-Cu- plastik parçalar	Siyah Kütle	-	Al-Cu- plastik parçalar	Plastik-çelik parçalar	4.000 (2020)
ASYA											
Sumitomo (Japonya)	CoO	NiSO ₄	-	-	-	Cu	-	-	-	-	150 (2020)
Brunp (Çin)	NMC LCO	NMC	NMC LCO	NMC	NaAl(OH) ₄	-	-	-	-	-	30.000 (2020)

4. GERİ KAZANIM SÜRECİNDE KARŞILAŞILABİLECEK ZORLUKLAR

Li iyon pil geri kazanımında ülke olarak karşılaşılabileceğimiz en büyük problem kullanım ömrünü tamamlamış atık Li iyon pillerin yani bu süreçte ihtiyaç olunan ham maddenin teminidir.

Atık Li iyon piller günümüzde “diğer pil ve akümülatörler” olarak kategorize edilen **tehlikesiz** atık kapsamında olan 16 06 05 kodu altında yönetilmekte iken, AB ülkelerinin kullanılmış Li iyon pillerin **tehlikeli** atık kapsamı altında yönetme talepleri bulunmaktadır. Bu talebin olası iki nedeni;

- (1) Uluslararası Tehlikeli Malların Taşınması Yönetmeliği'ne (ADR) göre uygunsuz paketlemeden kaynaklı taşımada çıkabilecek olan potansiyel risklerin bertarafı ve
- (2) Kullanım ömrünü tamamlamış Li iyon pillerinin içerdiği kritik hammaddeler nedeniyle AB dışına çıkışını zorlaştırmak.

Bu bağlamda Li iyon pillerinin içerdiği Li, Co ve Ni gibi kritik metallerin AB dışına çıkması engellenerek; AB'nin dışa bağımlılığını azaltmak, Li iyon pil için gerekli malzeme üretimini arttırmak (katot aktif malzemesi gibi) ve kritik hammaddelerin geri kazanılması hedeflenmektedir. Böylece AB ülkeleri döngüsel ekonomiye fayda sağlayarak Yeşil Mutabakat kapsamında belirtilen hedeflere ulaşmayı hedeflemektedir.

AB Komisyonu Li iyon pilleri ayrı spesifik bir kod altında yönetmek ve bunu Avrupa Atık Kataloğuna eklemek için çalışmalar yürütmektedir. Bununla birlikte geçiş döneminde Li iyon pillerinin atık kodunu belirleme yetkisi AB üye devletlerin yetkili kurumlarına bırakılmıştır. AB Ülkeleri için genel yaklaşım Li iyon pilleri tehlikeli atık kapsamına almaktır. AB Ülkeleri içerisinde de piller farklı kodlara göre yönetilmektedir. Örneğin, Almanya'da atık Li iyon piller 16 01 21* ve 16 02 15* kodu altında yönetilirken, Yunanistan 16 06 02* kodunu uygun görmektedir. İspanya ise Avrupa Atık Kataloğunda yer almayan 16 06 07* kodunu kullanmaktadır. Bir AB Ülkesi olan İtalya'da ise tamamen farklı olarak Li iyon piller için

tehlikesiz olan 16 06 05 kodu kullanılmaktadır. AB ülkeleri arasında atık pillere uygulanan bu yaklaşım ülkeler arasındaki atık pil transferinde problem oluşturmaya neden olabilecek boyuttadır. AB ülkelerinde atık Li iyon pil yönetimindeki bu farklı yaklaşımlar ile birlikte, Bataryalar ve Atık Bataryaları ilgilendiren 2006/66 / EC sayılı Direktifin yürürlükten kaldırılması ve 2019/1020 Sayılı (AB) Yönetmeliğinin değiştirilmesi çerçevesinde alınan tedbirler ortaktır ve bu tedbirlerden en önemlisi: Li iyon bataryaların geri dönüşüm verimliliğinin 2025'e kadar %65'e, 2030'a kadar %70'e çıkması için gerekli tedbirlerin alınması şeklindedir. Bununla birlikte 2030 ve 2035'te zorunlu geri dönüştürülmüş içerik seviyesi 2030 yılı için Co, Li ve Ni için sırasıyla %16, %6 ve %6; 2035 yılında ise %20, %10 ve %12 olarak belirlenmiştir. AB kapsamında içten yanmalı araçların yeni satışlarının 2035 yılından itibaren yasaklanacak olması elektrikli araçların artışına ve böylelikle pil yapımında kullanılacak metal ihtiyacını ciddi boyutlara taşıyacaktır.

Yaşanan gelişmeler kullanım ömrünü tamamlamış Li iyon pillerin veya Li iyon pil yapısında yer alan tüm metalleri içeren siyah kütleli Türkiye'ye girişinde zorluk oluşturacak potansiyele sahiptir.

Türkiye'nin de Li iyon pil global ekosistemi içerisinde yer alabilmesi; ham madde tedarik zincirini koruyabilmesi ve bunu garanti altına alması ile mümkün görülmektedir. Yapılacak çalışmaların ve alınacak tedbirlerin bu hedefe hizmet eder nitelikte olması ülkemizin Li iyon pil üretim ve geri kazanımı pazarında yer alması açısından büyük önem arz etmektedir.

Bu hedefe; devlet, sanayi, üniversite ve sivil toplum örgütlerinin ortak çalışması ile ulaşmak mümkündür.

5. BATARYA PASAPORTU

Batarya pasaportu, pil bileşenlerinin kaynağı, pil kimyasallarının üretimi, geri dönüşümü ve kullanımına ilişkin kayıtlar barındıran, bir anlamda pilin bir dijital ikizinin oluşturulması olarak tanımlanabilir. Bilgiler, pillerin tüm yaşam döngüsü boyunca üretiminden, geri dönüşüme kadar tüm adımlarını kapsamaktadır.

AB komisyonu Aralık 2020'de iç pazarın güçlendirilmesi, dögüsel ekonominin teşvik edilmesi ve pil hayat döngüsü kapsamındaki tüm aşamalarda oluşabilecek olan çevresel ve sosyal etkileri azaltmak amacıyla piller ve kullanım ömrünü tamamlamış piller üzerine bir direktif önerisi sunmuş ve bu yeni direktif taslağı kapsamında bir batarya pasaport ekosisteminin oluşturulması planlanmıştır. Bu öneride 1 Ocak 2026'dan itibaren piyasaya sürülen 2 kW-sa'in üzerinde kapasitesi olan tüm endüstriyel ve elektrikli araçlar için geçerli olacak Batarya Pasaportu için bir zaman çizelgesi (Şekil 8) oluşturulmuştur.



Şekil 8. Avrupa Birliği batarya düzenlemesi zaman çizelgesi (Int. Kyn. 3).

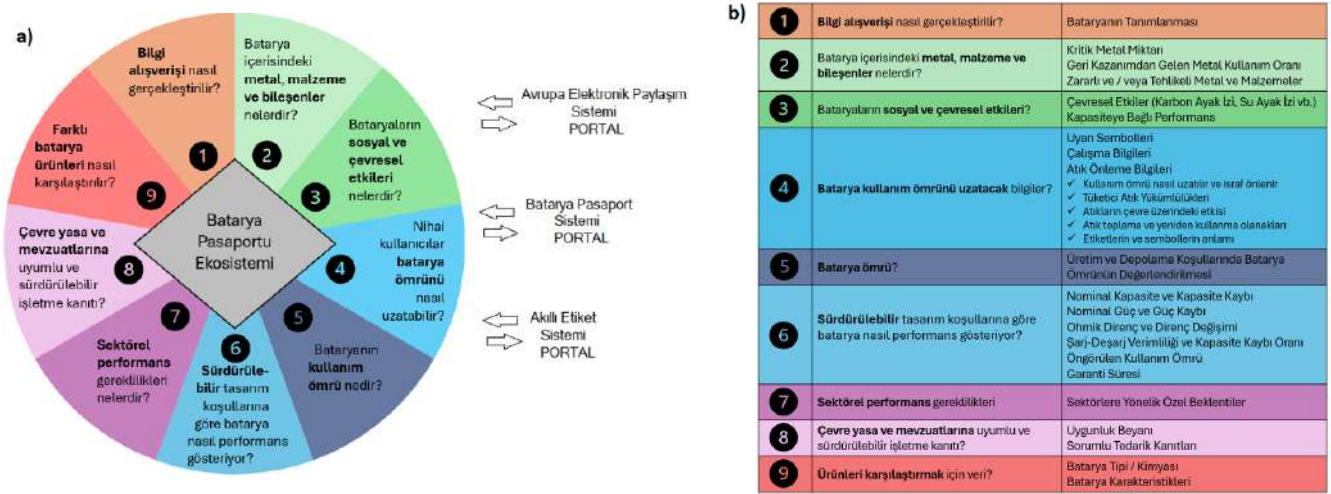
Batarya pasaportunda performans ve dayanıklılık parametreleriyle ilgili bilgiler kaydedilecek ve pilin durumundaki değişiklikleri not edilecektir. Batarya pasaport ekosistemi kapsamında pasaportta bulunması öngörülen bilgiler;

1. Elektronik Aktarım Sistemi
2. Batarya Pasaport Sistemi
3. Akıllı Etiketleme konularını kapsamaktadır.

Bu üç sistem batarya pasaportu sistemi kapsamında birleştirilecektir ve gerekli olan bilgilerin sistemler arası koordinasyonu sağlanacaktır. AB komisyonunun yeni pil yönetmeliğinin ana hedefi pillerin uzun ömürlü ve güvenli olmasıdır. Yönetmelik ayrıca Batarya Pasaportu ve birbirine bağlı veri alanı başta olmak üzere yeni IT teknolojilerinin kullanımı, güvenli veri paylaşımı, pil pazarının şeffaflığının artması ve büyük pillerin kullanım ömürleri boyunca izlenebilirliği için önemlidir.

Batarya pasaportunda performans ve dayanıklılık parametreleriyle ilgili bilgiler de kaydedilecektir. Kurulacak bu sistemin veri kaynaklarının internet üzerinden erişilebilir olması gerekmektedir. Şekil 9a'da batarya pasaportu ekosisteminde yer alması planlanan Avrupa Elektronik Paylaşım Sistemi, Batarya Pasaport Sistemi ve Akıllı Etiket Sistemi olmak üzere üç temel bileşen ve bu bileşenler ile cevaplanması hedeflenen sorular, Şekil 9b'de cevaplara giden yol haritasının içeriği verilmiştir.

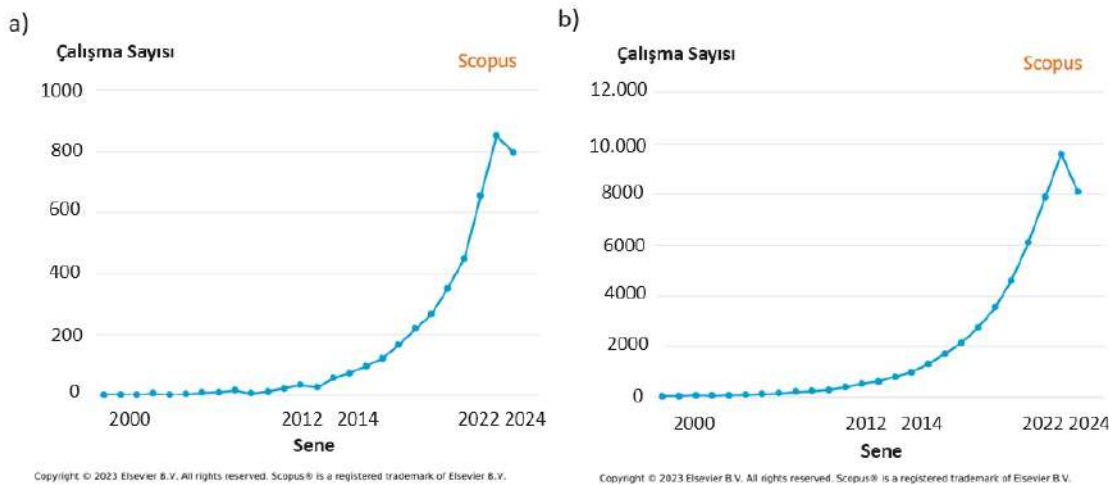
Batarya pasaportu sayesinde, karbon ayak izi, hammadde üretimi, yeniden kullanım ve/veya geri dönüşüm koşullarına ilişkin bilgiler güvenli bir şekilde saklanacaktır. Bu durum özellikle elektrikli otomobil bataryaları çerçevesinde şeffaflık yaratacaktır.



Şekil 9. a). Batarya pasaportunda bulunması istenen bilgiler, b). Batarya pasaportu içeriğinin detaylı açıklaması

6. LİTERATÜRDE LİTYUM İYON PİL GERİ KAZANIMI

1998 yılından itibaren Dünya genelinde Li iyon pil geri dönüşümü ve geri kazanımı anahtar kelimeler ile gerçekleştirilen akademik çalışmaların yıllara bağlı değişimi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Scopus veri tabanında yer alan Li iyon batarya a) geri dönüşümü (Anahtar Kelimeler: Li ion battery and recycle) b) geri kazanımı (Anahtar Kelimeler: Li ion battery and recovery) ile ilgili akademik çalışma sayılarının yayın yılına göre dağılımı (Eylül 2023) (Int. Kyn. 5).

İki veritabanında bulunan çalışmalardan da görüldüğü gibi geçmişten günümüze Li iyon batarya geri dönüşümü ile ilgili yapılan çalışma sayısı hızla artmıştır.

Li iyon batarya geri dönüşümü (recycle) konusunda en fazla bilimsel yayına sahip ülke Çin'dir. Çin'i sırasıyla ABD, Hindistan, Güney Kore, Birleşik Krallık, Avustralya, Almanya, Japonya, Kanada, İtalya, İran, Brezilya, İspanya, İsveç ve Tayvan izlemektedir. Li iyon batarya geri kazanımı (recovery) ile ilgili bilimsel yayın sayısı en fazla olan ülkeler ise sırasıyla Çin, ABD, Hindistan, Birleşik Krallık, Avustralya, Kanada, Almanya, Güney Kore, Japonya, İtalya, İran, Fransa, İspanya, Brezilya ve Suudi Arabistan'dır.

Li iyon pillerde ortaya çıkan yangınlar ile ilgili 13 makale üzerinden yapılan bir meta-incelemede, Li iyon pil yangınlarına ilişkin araştırma alanları vurgulanmış ve hangi koruma katmanlarının ne kadar araştırıldığı incelenmiştir. Bulgular, çalışmaların bileşen ve hücre ölçeği üzerine yoğunlaştığını, modül ve paket ölçeğinin daha az sayıda olduğunu göstermektedir. Araştırmalar genellikle yangın önleme konusuna odaklanmıştır ve diğer koruma katmanlarına daha az dikkat edilmiştir. Yangın bastırma, algılama ve bölme gibi koruma yöntemlerine yönelik literatüre katkı sunulması gerektiği belirtilmiştir (Bravo Diaz vd. 2020).

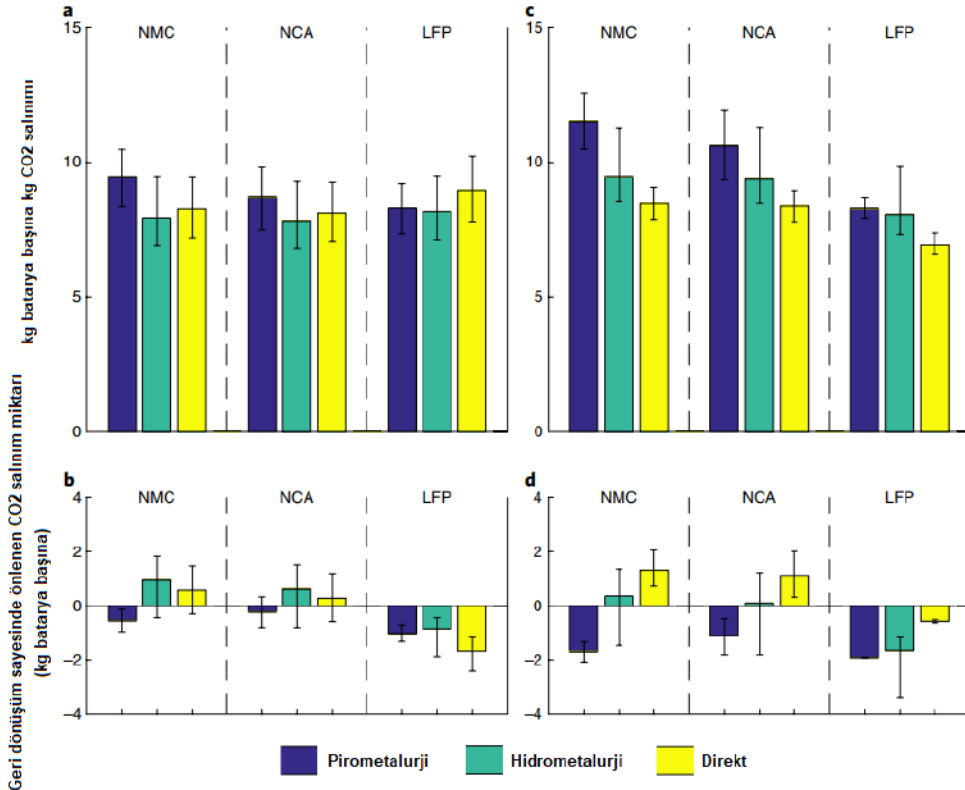
Battery 2030+ yol haritası geri dönüşüm üzerine yapılacak araştırma çalışmalarını kuvvetli bir şekilde önermektedir. Hedef, yeni pil malzemeleriyle tasarlanmış arayüzler ve akıllı pil hücresi mimarileri geliştirirken üretilebilirliğe, ölçeklenebilirliğe, geri dönüştürülebilirliğe ve yaşam döngüsüne dikkat ederek düşük çevresel ayak izli bataryaların eldesinin sağlanmasıdır.

7. LİTYUM-İYON BATARYALARIN GERİ DÖNÜŞÜM PROSESLERİNDE KARBON AYAK İZİ DEĞERLENDİRMESİ

Ömrünü tamamlamış Li iyon piller önemli miktarlarda kritik metaller (lityum, nikel, kobalt ve mangan) içermelerinin yanı sıra toksik/mutajenik kimyasallar da içermektedir. Ömrünü tamamlamış pillerin kontrolsüz atılması veya yakma yolu ile bertaraf edilmesi bileşimindeki kritik metallerin ve diğer malzemelerin kaybına neden olmakla birlikte, ciddi boyutta biyolojik ve çevresel sorunlara neden olur (Meshram vd. 2020). Ömrünü tamamlamış pillerin geri dönüşümünün iki temel hedefi vardır: kritik metal talebini karşılamak ve çevresel yükü en düşük seviyeye taşımak. Bu bağlamda geri dönüşüm sürecinde yöntemlerin çevre yükünü ez aza indirecek şekilde seçilmesi sürdürülebilir çevre ve ekonomi için büyük öneme sahiptir.

Şekil 11'de NMC, NCA ve LFP pilleri için silindirik ve kese pil tiplerinde geri kazanım sürecinde açığa çıkan kg pil başına kg CO₂ salınımları verilmiştir. Şekil 11a'da pirometalurjik, hidrometalurjik ve direk katot geri dönüşüm yöntemleri kullanılarak açığa çıkan (kg batarya-silindirik tip) CO₂ salınımları verilmiştir. Şekil 11b'de her bir pil kimyası için kullanılan geri kazanım yöntemine bağlı olarak önlenen CO₂ gazı salınımları tanımlanmıştır. Benzer çalışma kese tip piller için yapılmış ve sonuçlar 11b ve 11d'de verilmiştir (Ciez vd. 2019).

Bataryaların yaşam döngüsü değerlendirmesi için güncel olarak Eco-Indicator 99, CML-IA, IPCC, GREET, ReCiPe, IMPACT 2002+ gibi yazılımlar kullanılmaktadır (Arshad vd. 2022). Kullanılan yazılıma göre farklılık gösterebilmekle beraber, ölçümler genel olarak 1 kg pil, pil paketi, 1 kW-sa depolama kapasitesi ve 1 km mesafe gibi fonksiyonel birimler için yapılmaktadır. Yaşam döngüsü çalışmalarında yapılan değerlendirmede göz önünde bulundurulmuş kategoriler ve yaklaşımlar farklılık gösterebilmektedir. Ancak yapılan çalışmalarla ve geliştirilen verilerle birlikte daha fazla bilginin erişilebilir hale geleceği öngörülmektedir. Gelecekte yapılacak yaşam döngüsü değerlendirme çalışmalarında, yalnızca pil üretimi süreci değil pil ömrü ve pil verimliliği de modellenmelidir. Böylece gelecekteki çevresel değerlendirmelerin sağlamlığı ve ölçülebilirliği önemli miktarda artacaktır. Aynı zamanda, pillerin çevresel etkilerinin olabildiğince azaltılması ve üretimleri sırasında kullanılan hammaddelerin ikincil üretimle elde edilmiş olması, yeni pil kimyalarının araştırılması ve geliştirilmesi gibi parametreler de yaşam döngüsü çalışmaları için önemlidir (Arshad vd. 2022).



Şekil 11. Pil geri dönüşüm emisyonları. a-d, Silindirik (a,b) ve kese tipi pil üretim ve geri dönüşüm süreçleri (c,d) için her bir geri dönüşüm süreci (b,d) kullanılarak önlenebilir net CO₂ emisyonları ve geri kazanılan malzemelerden (a,c) elde edilen CO₂ engelemeleri düşüldükten sonra kg başına CO₂ emisyonları (Ciez vd. 2019).

8. ÖNERİLER

Dünya genelinde pil üretimi ve geri kazanım çalışmalarına yönelik için çok büyük yatırımlar yapılmaktadır ve bu noktada kullanım ömrünü tamamlamış Li iyon pillerin geri dönüşüm ve/veya geri kazanımı yeniden kullanımı kritik ve stratejik önem kazanmaktadır.

Dünyada pil geri kazanımının ana hedefleri; pil yapısındaki metallerin pil yapımında kullanılabilir kalitede yeniden üretilmesi ve üretim sürecinin alternatif üretim yöntemlerine göre daha ekonomik ve minimum çevre yüküne sahip olmasıdır.

Geri dönüşüm konusu hem atıkların bertarafı açısından hem de bu atıkların yapısında bulunan değerli metallerin geri kazanımı yönünden oldukça büyük bir öneme sahiptir. Katot aktif malzemeler, yüksek ekonomik değerleri nedeniyle çoğu araştırma faaliyetinde ve endüstriyel uygulamalarda esas olarak hedeflenen bileşenlerdir. Bunların haricinde anot aktif malzeme (grafit), bakır ve alüminyum folyo elektrotları, kasa bileşenleri ve plastikte değerlendirilmesi gereken kaynaklardır.

AB ülkeleri uygulamaya koyduğu yasalar çerçevesinde öncelikle kullanım ömrünü tamamlamış pillerin AB dışına çıkışını -pil üretiminde kullanılan metallerin geri dönüşümünden gelen zorunlu minimum oranlarını belirleyerek- zorlaştırmakta hatta AB dışına kullanılmış Li iyon pil çıkışını çıkarmayı planladığı yasalar çerçevesinde imkânsız hale getirmeyi hedeflemektedir.

Ülke olarak, Li iyon pil geri kazanımının endüstriyel boyutta gerçekleştirmede avantaj ve dezavantajlara sahibiz. Ülkemiz geri kazanım konusunda uzmanlaşmış insan gücüne hem üniversiteler hem de sanayi sahiptir. Bu çok önemli bir avantaj olmakla birlikte yeterli değildir. Bu avantajı hayata geçirmek için devlet, üniversite, sanayi ve sivil toplum örgütlerinin amaca uygun ortak çalışma yürütmeleri, süreci birlikte analiz ederek konu hakkındaki yol haritasını ortak akıl çerçevesinde ortaya koymaları son derece önemlidir.



Zamanın aleyhte çalıştığını dikkate alarak, ilgili yasal düzenlemelerin tüm paydaşların (Devlet-Üniversite-Sanayi-Sivil Toplum Kuruluşu) katıldığı bir zeminde ivedilikle yapılması hayati öneme sahiptir.

KAYNAKLAR

- Ali, H., Khan, H. A., Pecht, M. 2022. Preprocessing of spent lithium-ion batteries for recycling: Need, methods, and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112809.
- Arshad, F., Lin, J., Manurkar, N., Fan, E., Ahmad, A., Tariq, M. un N., Li, L. 2022. Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries: A Critical Review. *Resources, Conservation and Recycling*, 180.
- Bae, H., Kim, Y. 2021. Technologies of lithium recycling from waste lithium ion batteries. *Materials Advances*, 2(10), 3234–3250.
- Binnemans, K., Jones, P. T. 2017. Solvometallurgy: An Emerging Branch of Extractive Metallurgy. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(3), 570–600.
- Bravo Diaz, L., He, X., Hu, Z., Restuccia, F., Marinescu, M., Barreras, J. V., Rein, G. 2020. Review—Meta-Review of Fire Safety of Lithium-Ion Batteries: Industry Challenges and Research Contributions. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(9), 090559.
- Burat, F., Güney, A., Olgaç K, M. 2009. Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method. *Waste Management*, 29(6), 1807–1813.
- Chen, X., Kang, D., Cao, L., Li, J., Zhou, T., Ma, H. 2019. Separation and recovery of valuable metals from spent lithium ion batteries: Simultaneous recovery of Li and Co in a single step. *Separation and Purification Technology*, 210, 690–697.
- Ciez, R. E., & Whitacre, J. 2019. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. *Nature Sustainability*, 2(2), 148–156.
- Çuhadar, İ. E., Mennik, F., Dinç, N. İ., Gül, A., Burat, F. 2023. Characterization and recycling of lithium nickel manganese cobalt oxide type spent mobile phone batteries based on mineral processing technology. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(3), 1746–1759.
- Fan, E., Li, L., Wang, Z., Lin, J., Huang, Y., Yao, Y., Wu, F. 2020. Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects. *Chemical Reviews*, 120(14), 7020–7063.
- Golmohammadzadeh, R., Faraji, F., Jong, B., Pozo-Gonzalo, C., Banerjee, P. C. 2022. Current challenges and future opportunities toward recycling of spent lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112202.
- Hagelüken C., G. M. 2012. Recycling and loop concept for a sustainable usage. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*.
- Hantanasisarakul, K., Sawangphruk, M. 2023. Sustainable Reuse and Recycling of Spent Li-Ion batteries from Electric Vehicles: Chemical, Environmental, and Economical Perspectives. *Global Challenges*, 7(4).
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Anderson, P. 2019. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75–86.
- Jin, S., Mu, D., Lu, Z., Li, R., Liu, Z., Wang, Y., Dai, C. 2022. A comprehensive review on the recycling of spent lithium-ion batteries: Urgent status and technology advances. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130535.
- Latini, D., Vaccari, M., Lagnoni, M., Orefice, M., Mathieux, F., Huisman, J., Bertei, A. 2022. A comprehensive review and classification of unit operations with assessment of outputs quality in lithium-ion battery recycling. *Journal of Power Sources*, 546, 231979.
- Leal, V. M., Ribeiro, J. S., Coelho, E. L. D., Freitas, M. B. J. G. 2023. Recycling of spent lithium-ion batteries as a sustainable solution to obtain raw materials for different applications. *Journal of Energy Chemistry*, 79, 118–134.
- Li, L., Bian, Y., Zhang, X., Guan, Y., Fan, E., Wu, F., Chen, R., 2018, Process for recycling mixed-cathode materials from spent lithium-ion batteries and kinetics of leaching, *Waste management*, 71, 362–371.
- Lie, J., Liu, J., 2021, Closed-vessel microwave leaching of valuable metals from spent lithium-ion batteries (LIBs) using dual-function leaching agent : Ascorbic acid, *Separation and purification technology*, 266, 118458.
- Meshram, P., Mishra, A., Abhilash, Sahu, R. 2020. Environmental impact of spent lithium ion batteries and green recycling perspectives by organic acids – A review. *Chemosphere*, 242, 125291.
- Mishra, G., Jha, R., Meshram, A., Singh, K. K. 2022. A review on recycling of lithium-ion batteries to recover critical metals. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108534.



Murdock, B., Toghil, K. E., & Tapia-Ruiz, N. 2021. A Perspective on the Sustainability of Cathode Materials used in Lithium-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials*, 11(39).

Natarajan, S., Boricha, A.B., Bajaj, H.C., 2018, Recovery of value-added products from cathode and anode material of spent lithium-ion batteries, *Waste management*, 77, 455–465.

Ning, P., Meng, Q., Dong, P., Duan, J., Xu, M., Lin, Y., Zhang, Y. 2020. Recycling of cathode material from spent lithium ion batteries using an ultrasound-assisted DL-malic acid leaching system. *Waste Management*.

Peeters, N., Binnemans, K., Riaño, S. 2020. Solvometallurgical recovery of cobalt from lithium-ion battery cathode materials using deep-eutectic solvents. *Green Chemistry*, 22(13), 4210–4221.

Tawonezvi, T., Nomnqa, M., Petrik, L., Bladergroen, B. J. 2023. Recovery and Recycling of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries: A Comprehensive Review and Analysis. *Energies*, 16(3), 1–33.

Yan, S., Sun, C., Zhou, T., Gao, R., Xie, H. 2021. Ultrasonic-assisted leaching of valuable metals from spent lithium-ion batteries using organic additives. *Separation and Purification Technology*, 257, 117930.

Zeng, X., Li, J., Shen, B. 2015. Novel approach to recover cobalt and lithium from spent lithium-ion battery using oxalic acid". *Journal of Hazardous Materials*, 295, 112–118.

Zhang, N., Xu, Z., Deng, W., Wang, X. 2022. Recycling and Upcycling Spent LIB Cathodes: A Comprehensive Review. *Electrochemical Energy Reviews* (C. 5). Springer Nature Singapore.

Zhou, S., Zhang, Y., Meng, Q., Dong, P., Fei, Z., Li, Q. 2021. Recycling of LiCoO₂ cathode material from spent lithium ion batteries by ultrasonic enhanced leaching and one-step regeneration". *Journal of Environmental Management*, 277, 111426.

İnternet kaynakları;

- [1] IEA (2023), Global EV Data Explorer, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>, 23.04.2023.
- [2] <http://www.call2recycle.org/recycling-laws-by-state/>, (Anahtar Kelimeler: New York, California ve Minnesota), 23.02.2024.
- [3] https://thebatteryass.eu/assets/images/content-guidance/pdf/2023_Battery_Passport_Content_Guidance_Executive_Summary.pdf, 29.10.2023.
- [4] <https://drmelanieking.com/2022/10/04/insights-battery-passports-and-the-eus-new-battery-regulations/>, 28.10.2023.
- [5] <http://www.scopus.com>, 19.10.2023.



BATARYALARININ YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

O. A. Arıkan¹[+], H. Güven¹, M. T. Akırmak², M. Banar³, F. G. Üçtuğ⁴, B. A. Türkmen⁵, S. S. Övez¹, K. E. Maçın¹, K. Özçelik¹, O. Atacan⁶

ÖZET

Sanayi devriminden bu yana, fosil yakıt kullanımının neden olduğu çevresel stres ve okyanuslarda asidifikasyon, biyoçeşitliliğin azalmasına sebep olmuştur. Ayrıca küresel ölçekteki karbon salımının artması sebebiyle buzulların erime hızı gittikçe artmaktadır. Bu nedenle yüksek karbon salımına neden olan ve buna bağlı olarak antropojenik iklim değişikliği kaynaklarından biri olan ulaşım sektörü için sürdürülebilir çözümler üretilmeye çalışılmaktadır. Küresel iklim değişikliğinin etkilerinin giderek yaygın hale gelmesiyle yenilenebilir enerji kullanımına imkân tanıyan alternatiflerden biri olan elektrikli araç (EA) talebinde ve kullanımında hızlı bir artış gerçekleşmiştir. Elektrikli araçların içten yanmalı motorlardan (İYM) farkı, motor yerine batarya kullanılmasıdır. Bu açıdan bataryalar elektrikli araçların en önemli parçalarından birini oluşturmaktadır. Bataryanın belli bir kullanım ömrü tamamlandıktan sonra değiştirilmesi gerekmektedir. Değiştirilen batarya ya doğrudan geri dönüşüme/bertarafa gönderilmekte ya da ikincil kullanım olarak hizmet etmeye devam etmektedir. Dolayısıyla elektrikli araç bataryalarının çevresel etkilerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Bu bölümde, elektrikli araç bataryalarının yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD, Life Cycle Assessment-LCA) ile ilgili literatürdeki çalışmaların ortaya konması amaçlanmıştır. YDD aşamaları, sistem sınırları ve fonksiyonel birim özetlenmiş, elektrikli araç bataryaları ile ilgili yasal dayanaklar ve kısıtlar verilmiş ve elektrikli araç bataryalarının YDD sonuçları irdelenmiştir.

AB Bataryalar ve Atık Bataryalara İlişkin Yönetmelik, 28 Temmuz 2023 tarihinde yayımlanmıştır. Söz konusu yönetmelik kapsamında AB’de üretilen veya AB pazarına sunulan; elektrikli araç bataryaları, endüstriyel bataryalar, çoğunlukla araçlar ve makineler için kullanılan marş, yıldırım ve ateşleme (SL) bataryaları ile elektrikli bisikletler ve e-mobilet (scooter) bataryalarının tüm yaşam döngüsü ele alınacak, bataryaların izlenebilmesi amacıyla yaşam döngüsü süreçlerini kapsayacak bataryaların modeli, içeriği, kullanımı ve geri dönüşüm koşulları gibi bilgilerin yer aldığı Dijital Batarya Pasaportu uygulamasına geçilecektir. Yeni AB Yönetmeliği’nin ülkemiz koşullarına uygun olarak adapte edilmesi ve ulusal mevzuat olarak yayımlanması beklenmektedir.

Elektrikli araç bataryalarının YDD analizleri yapılırken sistem sınırları, etki kategorileri, fonksiyonel birim gibi faktörler doğru belirlenmeli, süreçlere ilişkin ülkemize özgü veriler ortaya konmalıdır. Bu sayede YDD analizleri elektrikli araç bataryalarının çevresel performansları ile ilgili sürdürülebilir kararların verilmesine yardımcı olacaktır.

[+] arikan@itu.edu.tr

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Kampüsü, Maslak, 34467 İstanbul, Türkiye.

2 Otomotiv Sanayi Derneği, Altunizade, Atilla Sk. No:10, Üsküdar, 34676 İstanbul, Türkiye.

3 Eskişehir Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İki Eylül Kampüsü, 26555, Eskişehir, Türkiye.

4 İzmir Ekonomi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya Caddesi, No:156, Balçova, 35330 İzmir, Türkiye.

5 Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Pelitözü Mah. Fatih Sultan Mehmet Bulvarı No:27, 11230, Bilecik, Türkiye.

6 Metsims Sustainability Consulting, Sanayi Mah. Hümevra Sokak No:7/46-47, Kâğıthane, 34415 İstanbul, Türkiye.

1. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Bir ürünün veya hizmet eldesinin ISO 14040 (Çevre yönetimi - Hayat boyu değerlendirme - İlkeler ve çerçeve), 14044 (Çevre yönetimi - Hayat boyu değerlendirme - Gereklere ve kılavuz) ve 14067 (Sera gazları - Ürünlerin karbon ayak izi - Hesaplama için gereklere ve kılavuz) standartları çerçevesinde, hammadde temininden bertaraf edilmesine uzanan süreçte ortaya çıkabilecek çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerin raporlanması YDD ile yapılmaktadır (Demirer, 2011). YDD hem doğrudan (üretim aşamasında oluşan emisyonlar ve kullanılan enerji vb.) hem de dolaylı (hammadde eldesi, ürünün dağıtılması, tüketici tarafından kullanılması ve bertarafı vb.) etkileri belirlemek ve ölçmek için kullanılmaktadır. YDD, endüstrilerin çevresel etkilerini kontrol altına alarak sosyal etkileri maliyet analizi ile ilişkilendirerek yatırımların şekillenmesi, proses/ürün seçimi yapılması ve süreçlerin geliştirilmesinin yanı sıra ürün deklarasyonu, eko-etiketleme, pazarlama ve stratejik planlama gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Bir ürünün YDD'si raporlanırken mevcut üretim prosesinin verimi ve etkileri (dolaylı veya doğrudan) değerlendirilmektedir. Ayrıca kullanılacak diğer proseslerin de değerlendirilmesi yapılarak karşılaştırma imkânı bulunabilmektedir. Böylece en uygun ve en verimli prosesin tercih edilmesi sağlanabilmektedir.

Çevresel etkilerin yanında hammadde ve enerji kullanımıyla birlikte ekonomik etkiler için de YDD yaklaşımı uygulanabilmektedir. YDD altında bu yaklaşımların yer aldığı iki farklı alt başlık bulunmaktadır;

- **Yaşam Döngüsü Enerji Analizi:** Bir ürünün ve bileşenlerinin üretilmesi, ürünün kullanılması, sevkiyatı ve bertaraf edilmesi sırasında gereken enerji girdilerini kapsamaktadır.
- **Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi:** Bir ürünün ve bileşenlerinin ilk yatırım maliyetleri, ürünün sevkiyatı ve işletilmesi, ürünün bakım-onarımı ve bertarafı sırasında oluşan toplam maliyeti kapsamaktadır.

YDD, ayrıca ekolojik ayak izi ve su ayak izi gibi kavramlarla da ilişkilendirilmektedir. Bu kavramlar çevresel değerlendirmenin önemli bir kısmını oluşturarak yaşam döngüsü değerlendirmesine katkı sağlamaktadır.

YDD'nin Birleşmiş Milletler (BM) Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) (2015) (Int. Kyn. 1), Avrupa Birliği (AB) Döngüsel Ekonomi Eylem Planı (2015) (Int. Kyn. 2) ve AB Yeşil Mutabakat Eylem Planı (Green Deal) (2019) (Int. Kyn. 3) kapsamında da ele alınması YDD'nin önemini artırmaktadır. Ayrıca,

- AB'ye üye ülkelerde ürünlerini satışa sunmak isteyen firmalar için ürünlerinin çevresel performanslarının sunulmasının zorunlu olması,
- Avrupa Komisyonunun, çevresel performansı ölçmenin ortak bir yolu olarak Ürün Çevresel Ayak İzi (Product Environmental Footprint-PEF) ve Kurumsal Çevresel Ayak İzi (Organisation Environmental Footprint-OEF) yöntemlerini önermesi ve bu yöntemlerin YDD tabanlı olması

YDD'nin gittikçe önem kazanacağını göstermektedir. YDD için farklı yazılımlar kullanılabilmektedir.

1.1. YDD Aşamaları

YDD, bir ürün ya da hizmet eldesi sürecinde kullanılan girdilerin (enerji, su, diğer hammaddeler ve doğal kaynaklar) ve bununla birlikte ortaya çıkan çevresel etkilerin envanterinin çıkartılması ve bu çıktılara istinaden sonuçların sistematik ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek karar vericilere sunulmasını kapsamaktadır. ISO 14040'dan uyarlanan yaşam döngüsü değerlendirme çerçevesi dört aşamadan oluşmaktadır (Demirer 2011, Şekil 1).

1. Amaç ve Kapsam

Değerlendirmenin amacı, kapsamı, detayları ve sınırları bu aşamada belirlenmektedir. Ayrıca çalışmaya ait fonksiyonel birim de bu kısımda belirlenir.

2. Envanter Analizi

Bu aşamada enerji, su, hammadde gibi girdiler ve girdilere bağlı olarak çevresel emisyonlar belirlenmektedir. Envanter analizi, proses akışının belirlenmesi, verilerin toplanması, değerlendirilmesi ve raporlanmasını kapsamaktadır.

Envanterde kullanılan verilerin kalitesi, YDD sonrasında yapılacak değerlendirmeyi büyük oranda etkileme potansiyeline sahip olduğundan oldukça önem taşımaktadır. Çalışmada kullanılacak verilerin şeffaf ve doğrulanabilir olması çalışmanın kalitesini artırmaktadır. Veri kalitesinin aşağıdaki unsurları sağlaması beklenmektedir:

- **Zaman bilgisi:** Verinin ne zaman ve hangi tarihlerde alındığı ile veri toplama süresinin uzunluğu (örn: yıllık, aylık vb.).

- **Coğrafik bilgi:** Çalışmanın coğrafik kapsamı (yerel, bölgesel, ulusal, kıtasal, küresel gibi).
- **Teknolojik bilgi:** Teknolojik verinin niteliği (en iyi teknolojinin veya en kötü işletme biriminin ağırlıklı ortalaması) (Çokaygil ve Banar, 2005).

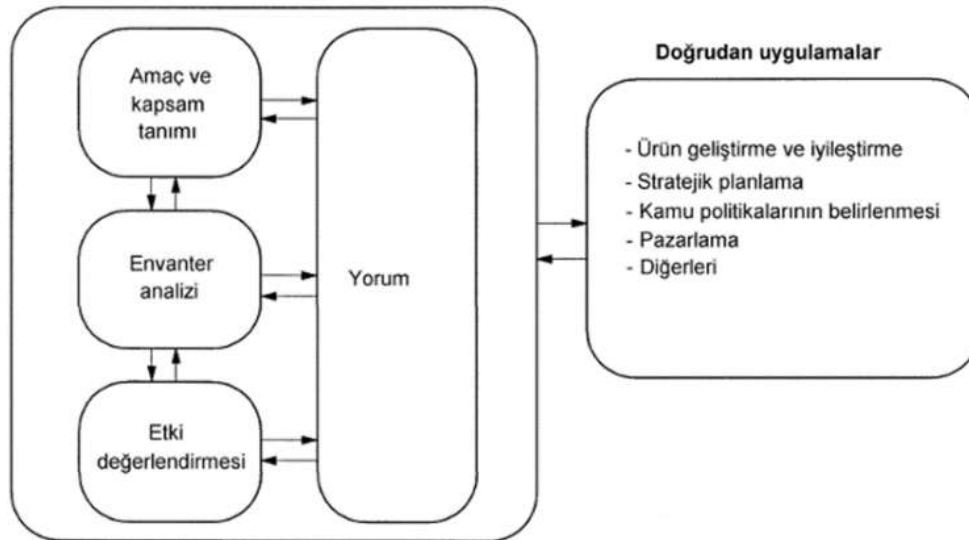
3. Etki Değerlendirmesi

Bu aşamada, envanter analizinde belirlenen girdilerin ve çevresel emisyonların çevre ve canlılar üzerindeki etkileri belirlenmektedir. Etki analizi için etki kategorilerinin seçilmesi ve sınırlandırılarak tanımlanması (sınıflandırılması), karakterizasyon faktörlerinin belirlenmesi, potansiyel etkilerin karşılaştırılması, etki kategorilerinin sıralanması adımlarını takiben etkilerin gerek duyulduğu takdirde ağırlıklandırma yöntemi ile analizin raporlanmasını kapsamaktadır (Üçtuğ, 2022). Envanter gösterge verilerini etki kategorilerine göre toplamak için renk kodlaması, puanlama ve bir ağırlıklandırma sistemi kullanılır. Ağırlıklandırma, her bir etki kategorisinin, göreceli önemine bağlı olarak, bu kategorilere bir ağırlık faktörü atamak anlamına gelir (Özdemir, 2019). Etki kategorilerinin karşılaştırılabilirliği ve toplu etkinin açıklanabilmesi için etki kategorileri belli kat sayılar ile çarpılarak kg CO₂ eş değeri cinsinden hesaplanabilmektedir. YDD'de en sık kullanılan çevresel etki kategorileri aşağıda belirtilmiştir (Üçtuğ, 2022):

- Küresel ısınma potansiyeli (Global Warming Potential – GWP) (Sera Gazı Emisyonu olarak da ifade edilmektedir)
- Asidifikasyon potansiyeli (Acidification Potential - AP) (Asitleşme potansiyeli olarak da ifade edilmektedir)
- Ötrofikasyon potansiyeli (Eutrophication Potential - EP)
- Ozon tabakası incelme potansiyeli (Ozone Layer Depletion Potential - ODP)
- Fotokimyasal ozon oluşumu potansiyeli (Photochemical Ozone Creation Potential - POCP)
- İnsan toksisite potansiyeli (Human Toxicity Potential - HTP)
- Kaynak tüketimi (Resource Depletion - RD)

4. Değerlendirme/Yorumlama

Bu aşamada, gerçekleştirilen analizler sonucunda ortaya çıkan etkiler değerlendirilmekte ve karşılaştırmalı olarak raporlanması gerçekleştirilmektedir. Bu raporlama sonucunda çevresel açıdan en iyi performansa sahip hizmet, proses veya ürün belirlenmektedir. Yorumlama aşaması genellikle “duyarlılık analizi”, “belirsizlik analizi” veya “yeni senaryoların analizi”ni kullanarak, kalitesini değerlendirerek sonuçların tanımlanmasını kapsamaktadır (Cihansar, 2022). Bu aşamada YDD boyunca var olan belirsizlikler ve tahminler net bir şekilde açıklanmakta ve gerekirse en başa dönerek YDD'nin önceki aşamaları tekrarlanmaktadır. Yorumlama sırasında belirsizlik ve hassasiyet analizi yapılması tavsiye edilmektedir.

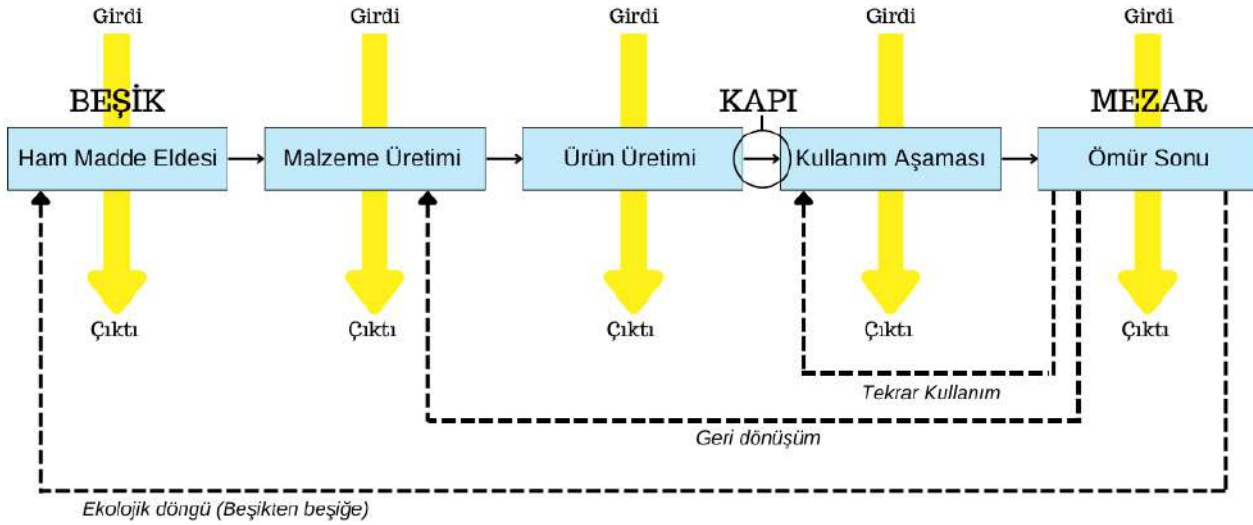


Şekil 1: Yaşam Döngüsü Değerlendirme Çerçevesi (ISO 14040, 2006).

1.2. YDD Sistem Sınırları ve Fonksiyonel Birim

YDD çalışmalarında, sistem sınırlarını belirlemek amacıyla, “beşikten mezara (cradle to grave)”, “beşikten kapıya (cradle to gate)”, “beşikten beşiğe (cradle to cradle)” ve “kapıdan kapıya (gate to gate)” olmak üzere, sistem sınırları farklı şekilde gruplandırılmaktadır (Şekil 2) (Zahedi vd., 2022).

Beşikten mezara kavramı, bir ürünün üretiminde veya bir hizmetin sağlanmasında doğadan hammadde temini, üretimi, kullanımı ve faydalı hizmet ömrünün sona erip, doğaya geri dönmesiyle biten süreci kapsamaktadır. Beşikten kapıya, hammaddenin doğadan elde edilmesi, hazırlanması, işlenmesi ve nihai malzemenin sevkiyatını ve pazarlanmasını içermektedir. Beşikten beşiğe yaşam döngüsünün en son aşaması olan atık yönetimi ve atıkların geri kazanımını, kapıdan kapıya ise sadece üretim aşamasını ve dağıtımını kapsamaktadır.



Şekil 2: Genel Bir YDD Sistem Sınırları (Zahedi vd., 2022).

YDD bir ürünün veya prosesin genellikle 4 aşamasını içerir ve inceler (Demirer, 2011);

1. Hammadde Temini

Hammaddenin doğadan elde edilmesi, kullanıma hazır hale getirilmesi ve işleme noktasına sevkiyatını kapsamaktadır. Bu aşamada ham madde elde edilme yöntemi, hammadde miktarı, geldiği bölge ve nakliye (nakliye şekli ve nakliye mesafesi) önemli rol oynamaktadır. Bu aşama, hammadde eldesi için gerekli enerji teminini de içermektedir.

2. Üretim Süreçleri/İmalat

Bu aşama hammaddelerin işlenmesiyle elde edilen son ürün imalatını içermektedir. Sonrasındaki ürünün dolun/paketleme ve dağıtımını (taahhütü) da bu aşamaya dahil edilebilmektedir.

3. Kullanım/Bakım

Ürünlerin tüketiciler tarafından kullanılması, bakım-onarım yaptırılması ve yeniden kullanılması aşamalarını içermektedir. Bu çerçevede ürünlerin tüketiciye ulaştırılması sonrasındaki tüm faaliyetler kapsamaktadır. Bu aşama ürün depolama, işletim kaynaklı enerji veya kaynak tüketimi, atık oluşumu ve bu süreçlerden oluşan emisyonları da içermektedir. Bu aşamada ürünün kullanım süresi, kullanım şekli ve çevresel faktörler önemli rol oynamaktadır.

4. Geri Dönüşüm/Atık Yönetimi

Kullanıcının ürüne artık ihtiyaç duymaması, kullanılabilirlik özelliklerinin kaybedilmesi ile ürün kullanım aşamasının sona ermesiyle başlayan aşamadır. Ürünün kullanımı sona erdikten sonra ortaya çıkan atıkların yönetimi, geri dönüşümü, bertarafı, oluşan emisyonları ve ayrıca enerji gereksinimlerini kapsamaktadır. Bu aşama diğer aşamaların her birinin alt basamağı olarak değerlendirilmektedir.

YDD metodolojisinde, sistem sınırlarını tanımlamak, ilgili sistemlerin tüm yaşam döngüsü içindeki hangi süreçlerin dahil edilmesi gerektiğini veya basitleştirme adına ihmal edilebileceğini belirlemenin bir yoludur. Sistem, giriş ve çıkış temel akışlarına sahip olacak şekilde modellenmelidir. Sistem sınırları, YDD'ye dahil edilmesi gereken süreçleri tanımlar ve bunların seçimi, çalışmanın hedefi ile tutarlı olmalıdır. Bir bataryanın kullanım ömrü boyunca tüm aşamaları göz önünde bulundurularak beşikten mezara analiz yapılması önerilmektedir (Temporelli vd., 2020).

Fonksiyonel birim, “referans birim olarak kullanılmak üzere bir ürün sisteminin sayısal performansı” olarak tanımlanmaktadır (ISO 14040, 2006). Fonksiyonel birimin birincil amacı girdi ve çıktılarla ilgili referans sağlamaktır. Bu referans aynı ürün, proses veya hizmet için farklı YDD sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için gereklidir. Örnek olarak araçların üretiminden başlayarak kullanım ve bertaraf süreçlerindeki çevresel etkiler hesaplanır ve ardından araçların toplam kat ettikleri kilometre değerine bölünerek km başına etki değerleri raporlanır. Araçlar için en yaygın kullanılan fonksiyonel birim 1 yolcu-kilometre (p-km) veya 1 kilometre (km) iken bataryalar için 1 kW-sa enerjidir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

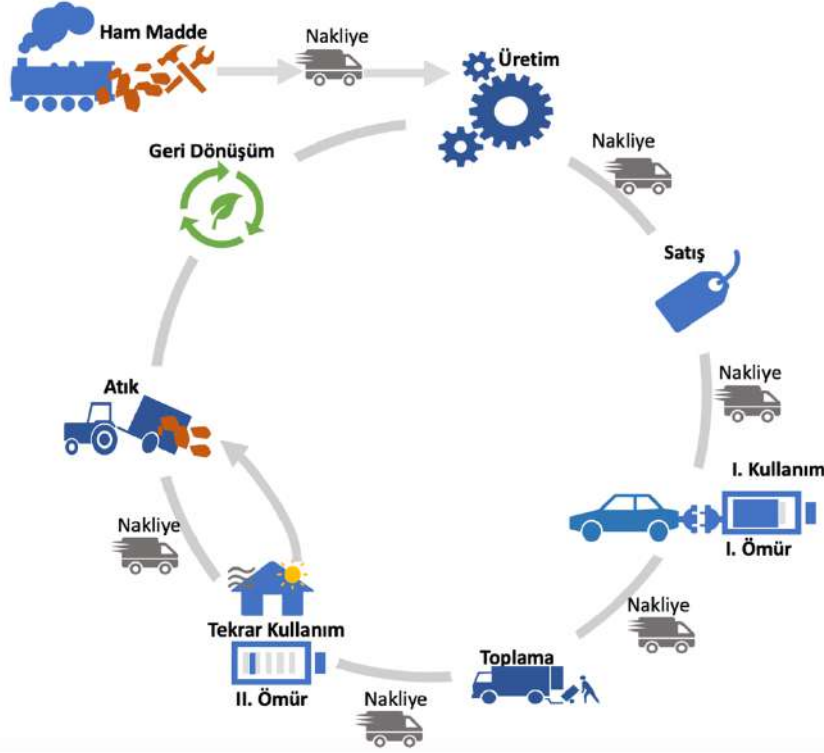
Bir aracın yaşam döngüsü boyunca (beşikten mezara) çevresel etkisi değerlendirildiğinde, en büyük etki sürüş ve yol kalitesi gibi durumlara bağlı olarak araçların kullanım aşamasında oluşmaktadır (OSD, 2020). Hafif araçlarda doğrudan yanma kaynaklı karbon emisyonları, toplam emisyonların yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır (OSD, 2020). Bir aracın toplam yaşam döngüsü boyunca oluşturduğu karbon emisyonlarının yaklaşık %80'lik kısmını yakıt üretim aşamaları ve araç kullanımı oluşturmaktadır (OSD, 2020). YDD için karbon emisyonu dışında başka çevresel etkiler de bulunmaktadır. İklim değişikliğine sebep olan sera gazlarının günümüzde bilinir bir etki olarak ortaya çıkmasıyla beraber asidifikasyon, ötrofikasyon gibi çevresel birçok etki de söz konusudur. Küresel ısınma potansiyelinin yanı sıra diğer çevresel etkiler değerlendirildiğinde yoğun bir şekilde hammadde ve malzeme tüketimi kaynaklı etkilerin baskın olduğu görülmektedir (OSD, 2020). Son yıllarda özellikle elektrikli binek otomobillerin kullanımı, kentsel hava kirliliğini ve ulaşım sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltmak için bir fırsat olarak görülmektedir. Özellikle, kentsel hava kalitesiyle ilgili olarak, elektrikli araçlarda egzoz gazı emisyonlarının oluşmaması, bu hipotezin doğruluğunu desteklemektedir (Temporelli vd., 2020).

Sera gazlarının azaltılması, elektrikli araçların genel olarak daha yüksek bir verimliliğe sahip olması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının ulusal elektrik üretimine katkı sağlamasına dayanmaktadır (Nordelöf vd., 2014). Dolayısıyla elektrikli araçların her zaman İYM (İçten Yanmalı Motorlu) araçlardan daha sürdürülebilir olduğu söylenemez. Çünkü araçların sadece kullanım aşamasında ortaya çıkan emisyonlarını dikkate alan bir değerlendirme yapmak yeterli değildir (Temporelli vd., 2020). İYM araçları ve elektrikli araçları sağlıklı bir şekilde karşılaştırmak için elektrikli araçların YDD'sinde elektrik enerjisi üretimi, fosil yakıt üretimi, araç ve batarya üretimi ve kullanım sonrası yönetimi ile ilgili etkileri dikkate alınmalıdır. Başka bir deyişle, araçların tüm yaşam döngüsü boyunca meydana gelen çevresel etkilerinin analiz edilmesine olanak sağlayan bir YDD yaklaşımı benimsenmelidir.

Bataryalar, elektrikli araçlarda ana unsurdur ve elektrikli araçlar ile İYM araçları arasındaki (güç aktarma organı ile birlikte) en önemli ayırt edici unsurlardan biridir. Ayrıca batarya üretimi, özellikle iklim değişikliği olmak üzere kullanım aşamasından dolayı elektrikli araçların enerji tüketimini ve çevresel etkilerini artırmaktadır (Temporelli vd., 2020). Şekil 3'te elektrikli araç bataryası için genel YDD girdi ve çıktıları gösterilmektedir.

Elektrikli araç ve batarya üretimi için kullanılan mevcut teknolojiler, üretim zincirinin uzunluğu ve yapısı dikkate alındığında karmaşık bir konu olarak ortaya çıkmaktadır. Girdi faktörleri (birincil kaynaklar, enerji ve malzemeler) ile çıktı faktörleri (emisyonlar, atık) arasındaki ilişki nedeniyle beşikten mezara çevresel etkinin değerlendirilmesi, entegre bir yaklaşım olan YDD yaklaşımı esas alınarak yapılmaktadır.

Elektrikli araç bataryalarının ömrü, birincil ve ikincil kullanım sırasındaki batarya performansı, batarya yenileme (toplama, test etme, yenileme) ve kullanım ömrü yönetimi, elektrikli araç YDD sonuçlarının güvenilirliğini artırmak için gereklidir. Yenilenmiş (ikincil kullanıma hazırlanmış) Lityum İyon Batarya (LIB) parametrelerinin değişkenliğini değerlendirmek için bir duyarlılık analizi yapılmalıdır. Bununla birlikte, LIB'lerin yeniden kullanımının değerlendirilmesi, elektrikli araç bataryalarının kullanım aşaması sırasında diğer hususların yanı sıra sürüş modelleri (sürücünün kullanma şekli, dur-kalk sıklığı vb.), çalışma sıcaklığı ve şarj olma sıklığı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Martinez-Laserna vd., 2016). Gelecekteki çalışmalar, yenilenmiş LIB'in güvenlik, düzenleyici çerçeve ve uygulanabilir iş modelleri gibi yönlerini ele olacaktır.



Şekil 3: Elektrikli Araç Bataryası İçin Genel YDD Girdi ve Çıktıları.

2.1. Yasal Dayanaklar ve Kısıtlar

2.1.1. Türkiye

Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü Yönetmeliği

31.08.2004 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan 25569 sayılı “Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü (APAK) Yönetmeliği” ile pil ve akümülatör ürünlerinin etiketlenmesi/işaretlenmesi, üretilmesinde zararlı madde miktarının azaltılması, kullanıldıktan sonra atıklarının toplanması, taşınması, bertarafı ile ithalat, transit geçiş ve ihracatına ilişkin yasak, sınırlama ve yükümlülükler, alınacak önlemler, yapılacak denetimler ve tabi olunacak sorumluluklar düzenlenmektedir (ÇŞİDB, 2004). Yönetmelik “genişletilmiş üretici sorumluluğu” prensibi ile, pil ve akümülatör üreticileri ile piyasaya sürenlere atık pil ve akümülatörlerin toplanması, taşınması ve bertarafını sağlamak ve bu amaçla yapılacak harcamaları karşılama yükümlülüğünü vermektedir.

Elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılan bataryalar ülkemizde APAK Yönetmeliği ile düzenlenmesine rağmen, henüz AB ile uyumlu olarak elektrikli ve hibrit araç batarya tanım ve süreçleri bu yönetmelikte henüz güncellenmemiştir. Elektrikli araç bataryaları ithal edilmeye başlanmış olup, bu bataryaların pil veya akümülatör olarak ele alınması hususu ile yönetmelik kapsamındaki sorumluluklar konusu gündeme gelmiştir. Elektrikli ve hibrit araç bataryaların ithal edilebilmesi için bu yönetmeliğe göre Çevre Uyum İzni alma yükümlülüğü ve atık hale gelen sistemlerin toplanması-taşınması-bertarafı ve geri dönüşümü süreçlerinin yönetilebilmesi için yetkilendirilmiş kuruluş üyeliği yükümlülüğü bulunmaktadır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından ithalat süreçlerinin yönetmeliğe göre taşınabilir pil statüsü ile yapılması yönünde değerlendirilmesi ile ithalat süreçleri yönetmelik güncelleninceye kadar pil kategorisinde yapılmaktadır.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından mevcut yönetmeliğin AB ile uyumlu elektrikli ve hibrit araç batarya tanımlarını içerecek şekilde güncelleme çalışmaları yapılmakta olup, “Atık Pil ve Akümülatörlerin Yönetimi Hakkında Yönetmelik Taslağı” hazırlanmıştır. Mevcut yönetmeliğin güncellenmesi sürecinde elektrikli ve hibrit araç bataryalarının AB ile uyumlu tanımlanması ve piyasaya süren yükümlülüklerinin belirlenmesi gerekli görülmektedir.

31.08.2004 tarihli APAK Yönetmeliği, AB’nin yakın zamana kadar yürürlükte olan 2006/66/EC sayılı AB Batarya ve Atık Batarya Direktifi’nin ülkemizdeki karşılığı olup, AB’de 28.07.2023 tarihli AB Resmî Gazetesi’nde Bataryalar ve Atık Bataryalara İlişkin Yönetmelik yayımlanmış ve yürürlüğe girmiştir. Bu yeni Yönetmelik ile AB’nin Batarya Direktifi



(2006/66/EC) yürürlükten kalkmıştır. AB'nin yeni batarya mevzuatı bataryaların ürün yaşam döngüsü boyunca tüm aşamalarını kapsayan önemli kurallar getirmektedir. Bu nedenle ülkemiz mevzuatı güncellenmesinde bu yeni yaklaşımın göz önünde bulundurulması önerilebilir. Ayrıca ülkemiz mevzuatındaki Atık Yönetimi Yönetmeliği, Geri Kazanım Katılım Payı (GEKAP) Yönetmeliği gibi ilgili yönetmelikler ile birlikte gözden geçirilip geri dönüşüm hedefleri, geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı, tamir süreçleri, ikincil ömür, atık sonrası (end-of-waste) gibi konu başlıklarının da yönetmeliğe yansıtılması değerlendirilmelidir.

Gerı Kazanım Katılım Payına (GEKAP) İlişkin Yönetmelik

10.12.2018 tarihinde yayımlanan ve yürürlüğe giren Çevre Kanunu değişikliği ile Kanun ekinde yer alan listede bulunan ve yurtiçinde piyasaya sürülen ürünler için GEKAP yükümlülüğü getirilmiştir. Bu listede EA bataryaları da yer almakta olup, uygulamanın kapsamı ve nasıl uygulanacağı ile ilgili 31.12.2019 tarihli Resmî Gazete'de 30995 sayılı GEKAP Yönetmeliği yayımlanmıştır.

Bu yönetmeliğin uygulanmasına ilişkin lastik, akümülatör, pil/batarya, madeni yağ, elektrikli ve elektronik eşya ve ambalajlara yönelik tanımlayıcı ve açıklayıcı hususlar Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından çıkarılan usul ve esaslar ile belirlenmektedir. GEKAP Beyannamesi ise Hazine ve Maliye Bakanlığı tarafından belirlenen usul ve esaslara göre yapılmaktadır.

05.02.2020 tarihinde Hazine ve Maliye Bakanlığı Gelir İdaresi Başkanlığı'ndan "Gerı Kazanım Katılım Payı Beyannamesi Genel Tebliği" yayımlanmıştır. Buna göre ilk beyannameler Ek-1 listesinde yer alan ürünlerin piyasaya sürüldüğü/ithal edildiği beyan dönemini takip eden ayın son gününe kadar yetkili vergi dairesine elektronik ortamda gönderilmektedir.

11.02.2020 tarihinde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'ndan kapsam ve uygulamaya yönelik "Gerı Kazanım Katılım Payına İlişkin Yönetmeliğin Uygulanmasına Dair Usul ve Esaslar" yayımlanmıştır. Listede otomotivde kullanılan akümülatör, lastik, batarya, madeni yağ, elektrikli ve elektronik eşyalar, aydınlatma ve ambalaj yer almaktadır. Usul ve Esaslar Ek-1 listesinde yer alan ürünlerin tamamından ithal ise ithalatçı, Türkiye'de üretiliyor ise piyasaya ilk arz eden tarafından GEKAP bildiri/beyanname ve ödeme yapılma yükümlülüğü bulunmaktadır.

Piyasaya arz edilecek araçlar ile elektrikli ve elektronik eşyaların orijinal eşya/parçası olarak kullanılan ve Kanunun Ek-1 listesinde yer alan ürünler için bu ürünleri sadece araç ile elektrikli ve elektronik eşya üretiminde orijinal eşya/parça olarak kullanılmak şartıyla piyasaya sürenler tarafından beyan yapılır, ancak bu ürünlerden geri kazanım katılım payı tahsil edilmez. Orijinal eşya/parça tanımına uymasına rağmen münferit olarak piyasaya arz edilen Kanunun Ek-1 listesinde yer alan ürünler için geri kazanım katılım payı beyanı yapılır ve geri kazanım katılım payı tahsil edilir (ÇŞİDB, 2019).

Türkiye'de 22.06.2023 tarihinde 32229 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan İthalat Rejimine Ek Karar ile pek çok ürüne yeni gümrük vergisi gelmiş, bazı ürünlerin gümrük vergisi ise sıfırlanmıştır. Açıklanan kararla gümrük vergisi getirilen ürünler arasında motor parçaları, kimyasal katkı maddeleri, elektronik devre parçaları, akümülatör ve LiB yer almaktadır. LiB için %1,3 gümrük vergisi belirlenmiştir (Cumhurbaşkanı Kararı, 2023). EA bataryası gibi büyük bataryalar gümrük vergisi kapsamına girmektedir.

Resmî Gazete'de yer alan ifadeye göre;

- uzunluğu 150 mm veya daha fazla olan ancak 1.310 mm'den fazla olmayan,
- genişliği 100 mm veya daha fazla olan ancak 1.000 mm'den fazla olmayan,
- yüksekliği 200 mm veya daha fazla olan ancak 1.500 mm'den fazla olmayan,
- ağırlığı 75 kg veya daha fazla olan ancak 200 kg'den fazla olmayan,
- nominal kapasitesi 58 A-sa'den az olmayan ve 500 A-sa'den fazla olmayan,
- nominal çıkış gerilimi 230V AC (hattan nötre) veya nominal gerilimi 50V (%±10) olan

tüm ithal Li iyon bataryalardan (LiB) %1,3 oranında gümrük vergisi alınacaktır.

2.1.2. Avrupa Birliği ve Diğer Ülkeler

AB Bataryalar ve Atık Bataryalara İlişkin Yönetmelik, 28 Temmuz 2023 tarihli ve L 191/1 sayılı AB Resmî Gazetesi'nde yayımlanmıştır. Yayımlanma tarihinden itibaren 20. günde yürürlüğe girmiştir. Bu yeni Yönetmelik ile mevcut Batarya Direktifi (2006/66/EC) yürürlükten kalkmıştır.

Yeni düzenleme ile AB'nin Avrupa Yeşil Mutabakatı, Döngüsel Ekonomi Eylem Planı ve Yeni Sanayi Stratejisi'nin önemli bir konusu olan bataryalar için;

- (i) bataryaların ürün yaşam döngüsünün tüm aşamalarında çevresel ve sosyal etkileri azaltmak,
- (ii) döngüsel bir ekonomiyi teşvik etmek ve
- (iii) iç pazarın işleyişini güçlendirmek

amaçlanmaktadır.

Öne çıkan konular aşağıda özetlenmiştir;

- Söz konusu yönetmelik ile getirilen düzenlemeler; tüm atık taşınabilir piller, elektrikli araç bataryaları, endüstriyel bataryalar, çoğunlukla araçlar ve makineler için kullanılan marş, yıldırım ve ateşleme (SLI) bataryaları ile elektrikli bisikletler ve e-mobilet (scooter)'lar gibi araçlar için bataryalar dahil olmak üzere tüm bataryalar için geçerli olacaktır.
- Yönetmelik, yalnızca AB'de üretilen değil, AB pazarına sunulan tüm bataryaları kapsamaktadır. Bu sebeple, AB pazarına arz edilen diğer ürünlerde olduğu gibi uygunluk değerlendirme prosedürleri ve onaylanmış kuruluşlar aracılığıyla ürün mevzuat uyumunun sağlanmasını gerektirmektedir.
- Döngüsellik kapsamında bataryaların tüm yaşam döngüsünün ele alınması, bataryaların kullanım ömrü sonlandıktan sonra nasıl muamele edileceğine ilişkin düzenlemeleri de gerektirdiğinden, geri dönüşüm pazarlarının ve atık bataryalardan elde edilen ikincil hammadde için pazar oluşturulmasının desteklenmesi beklenmektedir.
- Üreticilerin, AB pazarına ilk kez sundukları bataryalara ilişkin Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (Extended Producer Responsibility-EPR) getirilmektedir.
- Bataryaların izlenebilmesi amacıyla tüm yaşam döngüsü süreçlerini kapsayacak bataryaların modeli, içeriği, kullanımı ve geri dönüşüm koşulları gibi detaylı bilgilerin yer aldığı Dijital Batarya Pasaportu uygulamasına geçilecektir. Sürdürülebilirlik gereklilikleri (Karbon Ayak İzi, sorumlu üretime yönelik durum tespiti bilgileri ve Çevresel, Sosyal, Yönetişim (ESG) verileri) kapsamında bilgilerin yer alacağı Çabuk Tepki (QR) Kodu kullanımına geçilecektir.

Yönetmelikte belirlenen tarihlerden sonra, bataryaların içeriğindeki kobalt, nikel, kurşun ve lityumun ne oranda atık bataryalardan elde edilebileceğine dair kurallar getirilmektedir.

Yeni yayımlanan AB Bataryalar ve Atık Bataryalara İlişkin Yönetmelik ile EA bataryaları, kapasitesi 2 kW-sa'nin üzerinde olan şarj edilebilir endüstriyel bataryalar ve hafif taşıma araçları (Light means of transport- LMT) bataryaları (ağırlığı 25 kg veya daha az olan ve tek başına bir elektrik motoruyla veya bir elektrik motoruyla çalıştırılabilen tekerlekli araçların çekişi için elektrik gücü sağlamak üzere özel olarak tasarlanmış batarya) için farklı tarihlerde karbon ayak izi yükümlülükleri devreye girecektir. EA bataryaları için bu kapsamda;

- Karbon Ayak İzi Beyan yükümlülüğü,
- Karbon Ayak İzi Performans Sınıfı yükümlülüğü,
- Maksimum Ürün Yaşam Döngüsü Karbon Ayak İzi Sınırı yükümlülüğü

devreye girecektir. Madde 7'de bu kapsamdaki içerik ve takvimlendirme yer almaktadır;

- 18.02.2025'te Karbon Ayak İzi Beyan yükümlülüğü başlamaktadır. Her bir batarya modeli için; üretici, batarya modeli, fabrika mevkii ve karbon ayak izi değerini içeren deklarasyon sunulmalı, QR kodu devreye alındıktan sonra, QR kodu okutulduğunda bu bilgiler sağlanmalıdır.
- 18.02.2026'da Karbon Ayak İzi Performans Sınıfı yükümlülüğü başlamaktadır. Şubat 2025'te belirlenecek sınıf detaylarına göre, performans sınıfı bilgisi batarya etiketinde belirtilmelidir.



- 18.02.2028’de Maksimum Ürün Yaşam Döngüsü Karbon Ayak İzi Sınırı yükümlülüğü başlamaktadır. Karbon ayak izi değeri, Ağustos 2026’da belirlenecek maksimum yaşam döngüsü karbon ayak izi eşik değerini sağlamalıdır.

Yeni yayımlanan AB Bataryalar ve Atık Bataryalara İlişkin Yönetmelik ile Geri Dönüştürülmüş İçerik Gereksinimleri yükümlülükleri getirilmektedir. Buna göre aktif malzemelerde bulunan ve batarya üretim atıklarından veya tüketici sonrası atıklardan geri kazanılan kobalt, lityum, kurşun veya nikelin yüzdelerini içeren dokümanın batarya ile birlikte sunulma yükümlülüğü bulunmaktadır:

- 18.08.2026’ya kadar Komisyon tarafından kobalt, lityum ve nikelin yüzdelerinin hesaplanması ve doğrulanmasına yönelik metodoloji oluşturulacaktır.
- 18.08.2028’de batarya içinde bulunan, üretim atığı veya tüketim atığından yeniden kazanılan kobalt, lityum, kurşun veya nikelin yüzdelerini içeren dokümanın batarya ile birlikte sunulma yükümlülüğü başlayacaktır.

Üreticilerin endüstriyel, elektrikli araç ve belirli otomotiv bataryalarında geri dönüştürülmüş metal için minimum yüzde eşiklerini karşılaması gerekecektir:

- 18.08.2031 tarihinde mevzuat kapsamı bataryaların kobalt (%16), lityum (%6), nikel (%6) ve kurşun (%85) hammaddelerinde belirli miktarda geri dönüştürülmüş içerik barındırması,
- 18.08.2036 tarihinde mevzuat kapsamı bataryaların kobalt (%26), lityum (%12), nikel (%15) ve kurşun (%85) olarak hammaddelerinde belirli miktarda geri dönüştürülmüş içerik barındırması ve bataryaların geri dönüştürülmüş içerik belgesi taşıması.

Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında önemli bir başarı olan yeni yönetmelik, bataryaları, malzemelerin tedarik edilmesinden toplanmasına, geri dönüştürülmesine ve yeniden kullanılmasına kadar tüm yaşam döngüleri boyunca sürdürülebilir hale getirerek AB'nin hem dögüsel ekonomiyi hem de sıfır kirlilik hedeflerini öne çıkarmaktadır. Yeni kurallar, Avrupa'nın temiz enerjiye geçişini destekleyen ve yakıt ithalatına bağımlılığı azaltan, rekabetçi ve sürdürülebilir batarya endüstrisinin geliştirilmesini teşvik eden temel bir çerçeve oluşturmaktadır. Bataryalar aynı zamanda AB'nin 2050 yılına kadar iklim nötr hedefini sağlamakta merkezi rol oynayan kilit bir teknoloji olacaktır (Int. Kyn. 4).

Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Kanada, Çin, Japonya ve Avustralya’daki atık batarya yönetim sistemi ve mevzuatı, AB ile karşılaştırmalı olarak Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1: Lityum Bataryalar ile İlgili Mevzuat Özeti (Winslow vd., 2018’den uyarlanmıştır).

Ülke	Yürürlükteki düzenlemeler ve politikalar	Hedeflenen geri dönüşüm oranı	İyileştirme için avantajlar ve olası stratejiler
ABD	Federal düzeyde toplama veya geri dönüşüm mevzuatı bulunmamaktadır. Bazı eyaletler, LiB’lerin düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmesini yasaklamaktadır.	Mevcut Değil	Avantajlar: Kapsamlı bir gönüllü toplama sistemi oluşturulmuştur. ABD ve Kanada’da birçok yerel geri dönüşüm şirketi faaliyet göstermektedir. Stratejiler: LiB’ler, kurşun asit ve nikel kadmiyum bataryalara benzer şekilde atık olarak sınıflandırılabilir. Bu, LiB geri dönüşümünü teşvik etmekte ve depolama alanlarında bertaraf edilmesini engellemektedir.
Kanada (Manitoba, Quebec ve British Columbia eyaletleri)	Eyaletler, üreticilerin atık LiB’ler için bir toplama sistemine sahip olmalarını şart koşmaktadır.	%50	Avantajlar: Manitoba, Quebec ve British Columbia eyaletleri için bir toplama sisteminin olması zorunluluğu vardır ve toplama oranları belirlenmiştir. Ayrıca, geri dönüşüm endüstrisi oldukça gelişmiştir ve hedeflenen geri kazanım oranına ulaşılması zorunluluğu vardır. Stratejiler: Diğer Kanada eyaletleri, kendi toplama oranlarını belirlemek ve geri dönüşüm oranlarını hedeflemek için yerel şirketlerle birlikte çalışabilir.
Çin	Elektrikli araç üreticilerini kendi LiB geri dönüşüm altyapılarını oluşturmaya teşvik edilmektedir (zorunluluk yoktur).	Mevcut Değil	Avantajlar: Çin’deki birçok üretici, toplanan ve geri dönüştürülen atık arasındaki açığı kapatmak için geri dönüşüm şirketleriyle ortaklık kurmuştur. Stratejiler: LiB toplama ve geri dönüşüm sektörlerine katılımı artırmak için daha katı düzenlemeler uygulanabilir. LiB üretimi ve tüketiminde beklenen artışa uyum sağlamak için geri dönüşüm endüstrisi kapasitesi artırılmalıdır.

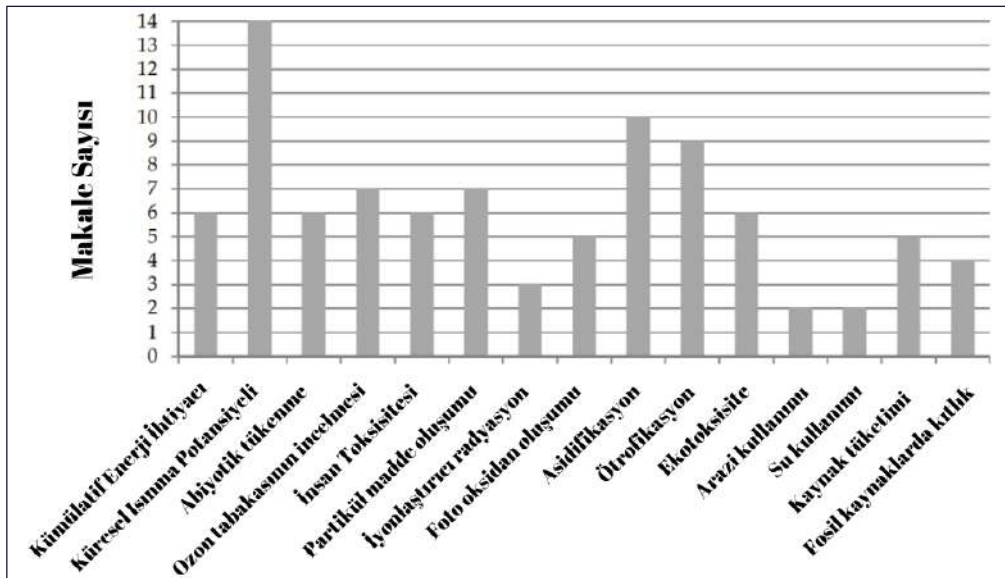
Tablo 1. Devamı.

Ülke	Yürürlükteki düzenlemeler ve politikalar	Hedeflenen geri dönüşüm oranı	İyileştirme için avantajlar ve olası stratejiler
Japonya	Üreticileri atık LiB'leri toplamaya ve geri dönüştürmeye teşvik edilmektedir (zorunluluk yoktur).	%30	Avantajlar: Japonya, iyi kurulmuş bir geri dönüşüm altyapısına ve LiB toplama sistemine sahiptir. Stratejiler: LiB yönetimi ile ilgili yasalar çoğunlukla isteğe bağlıdır. Bu nedenle atık EA batarya toplama oranlarını artırmak için daha sıkı düzenlemeler uygulanabilir. Ülke çapında bir hedef toplama oranının oluşturulması yardımcı olabilir.
Avustralya	LiB'lerin toplanmasını veya geri dönüştürülmesini gerektiren bir mevzuat yoktur.	Mevcut Değil	Avantajları: Toplama sistemleri ülke çapında uygulanmaktadır. Stratejiler: Avustralya, LiB uygulamaları için dünyanın önde gelen lityum üreticilerinden biridir. Bu nedenle bir lityum kiralama sistemi kurabilir, net lityum tüketen ülkelerde LiB geri dönüşüm oranlarını artırabilir ve bu da lityum için kapalı bir yaşam döngüsü kurarak Avustralya'ya fayda sağlayabilir.
Avrupa Birliği	Atık LiB'lerin toplanması ve geri dönüştürülmesine ilişkin mevzuat bulunmaktadır.	18.08.2031'den itibaren: Lityum için %6 18.08.2036'dan itibaren: Lityum için %12	Avantajlar: Hedef toplama oranları ve geri dönüşüm oranları AB Batarya Direktifi'nde açıkça belirtilmiştir ve üye devletlerin bu oranlara ulaşması gerekmektedir. AB gelişmiş bir LiB geri dönüşüm altyapısına sahiptir. Stratejiler: AB, LiB geri dönüşümü konusunda önemli deneyime sahip olduğundan, daha verimli süreçlerin geliştirilmesine öncülük edebilir.

3. ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARI İÇİN YAPILAN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ SONUÇLARI

2020 yılında yapılan bir literatür derlemesi çalışmasında elektrikli araç bataryaların YDD'si ile ilgili 2011-2019 yılları arasındaki 14 makale ve teknik rapor incelenmiş, sonuçları karşılaştırılmıştır (Temporelli vd., 2020). Genel olarak envanter analizi için, ticari sır olması nedeniyle bazı verilerin eksik olduğu veya sunulamayan birincil verilerin (doğrudan iş birliklerinden alınan) bulunduğu çalışmalar görülmektedir. Bu kritik konu, sektördeki yüksek rekabet ve yenilikçilik ile açıklansa da birincil verilere ilişkin bilgi eksikliği, birçok çalışmanın şeffaflığını ve tekrarlanabilirliğini etkilemektedir (Temporelli vd., 2020).

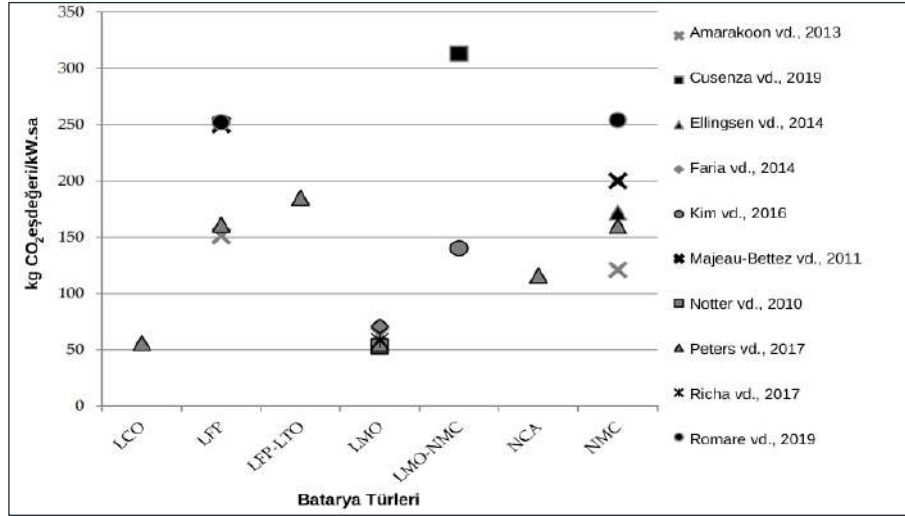
EA batarya YDD'sinde en fazla değerlendirilen etki kategorileri genellikle küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli, ötrofikasyon, ozon tabakası incelme potansiyeli, partikül madde oluşumu, abiyotik tükenme, insan toksisite potansiyeli, ekotoksisite potansiyeli ve YDD haricinde kümülatif enerji talebi (KET)'dir (Baumann vd., 2017). Daha az sıklıkta değerlendirilenler ise foto oksidan oluşumu, kaynak tüketimi, fosil kaynaklarda kıtlık, iyonlaştırıcı radyasyon, arazi kullanımı ve su kullanımı gibi etki kategorileridir (Temporelli vd., 2020) (Şekil 4).



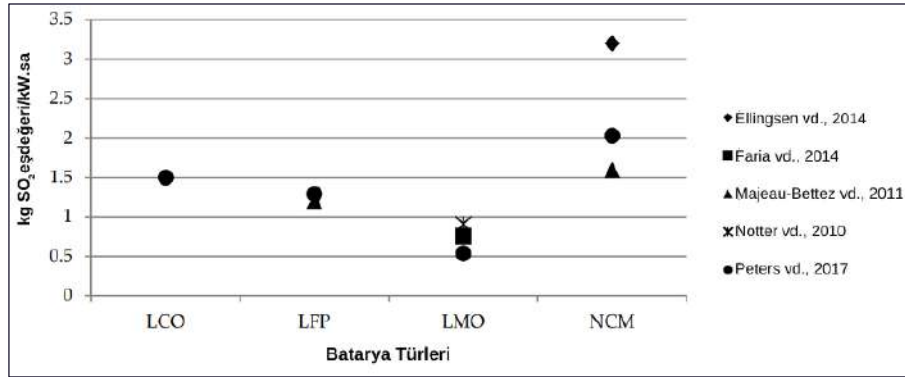
Şekil 4: Elektrikli Araç Bataryaları ile İlgili Çalışmalarda Kullanılan Etki Kategorileri ve Sayıları (Temporelli vd., 2020).



Farklı batarya türleri için batarya üretim aşamasının beş etki kategorisi sonuçları Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. YDD envanter sonuçları ile ilgili olarak, farklı çalışmalar arasında karşılaştırılabilir olan tüm etki kategorilerinde (küresel ısınma, ozon tabakasının incilmesi, asidifikasyon, ötrofikasyon ve partikül madde oluşumu) büyük bir değişkenlik vardır. Ele alınan ana etki kategorilerinden biri olan küresel ısınma için bu değişkenlik 53 ila 313 g CO₂ eş değeri/kW-sa batarya kapasitesi arasında değişmektedir (Şekil 5a) (Temporelli vd., 2020).



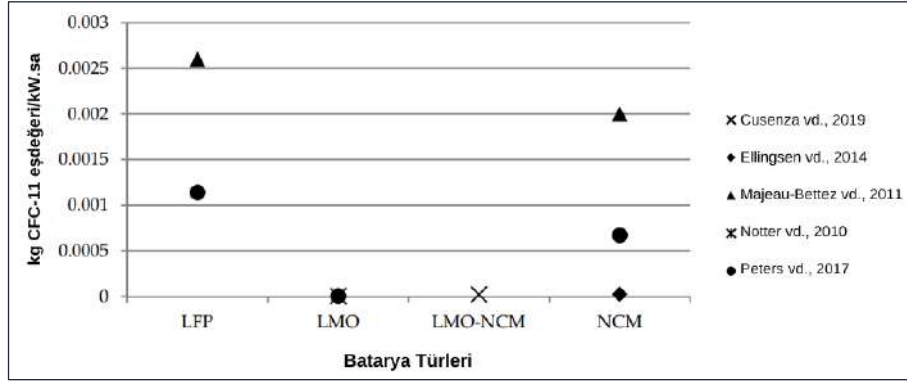
(a)



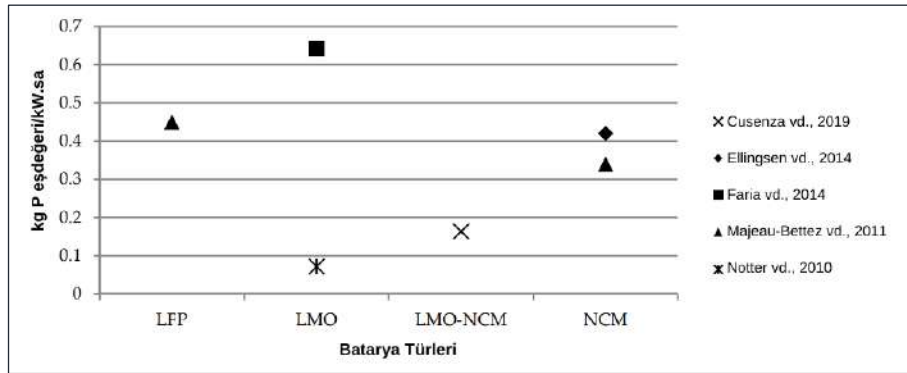
(b)

Şekil 5. Farklı Batarya Türleri İçin Batarya Üretim Aşamasının Küresel Isınma Potansiyeli (a) ve Asidifikasyon Potansiyeli (b) Sonuçları (Temporelli vd., 2020) (LCO: Lityum Kobalt Oksit; LFP: Lityum Demir Fosfat; LFP-LTO: Lityum Demir Fosfat-Lityum Titanat; LMO: Lityum Manganez Oksit; LMO-NMC: Lityum Manganez Oksit-Lityum Nikel Kobalt Manganez; NCA: Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit; NCM: Lityum Nikel Kobalt Manganez Oksit).

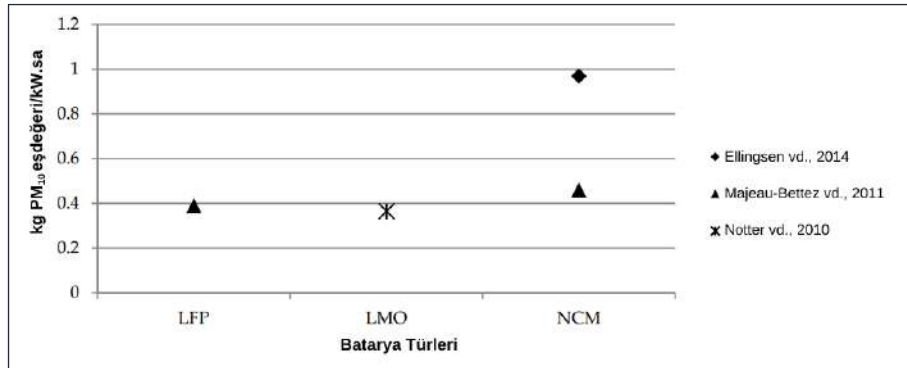
Pek çok araştırma, batarya ikincil ömrünün, yani bataryaların otomotiv alanında kullanımlarından sonra sabit enerji depolama teknolojilerinde kullanılmasının, depolama sistemlerinin çevresel etkilerinin azaltılmasına yardımcı olabileceğini ortaya koymaktadır (Temporelli vd., 2020). Ayrıca, nispeten az sayıda çalışma tarafından incelenmiş olmasına rağmen, özellikle kobalt ve nikel olmak üzere batarya geri dönüşümünün, depolama sistemlerinin üretimi sırasında hammadde kullanımını önleyerek bataryaların genel etkilerini azaltmak için başka bir fayda sağlayabileceği değerlendirilmektedir (Temporelli vd., 2020).



(a)



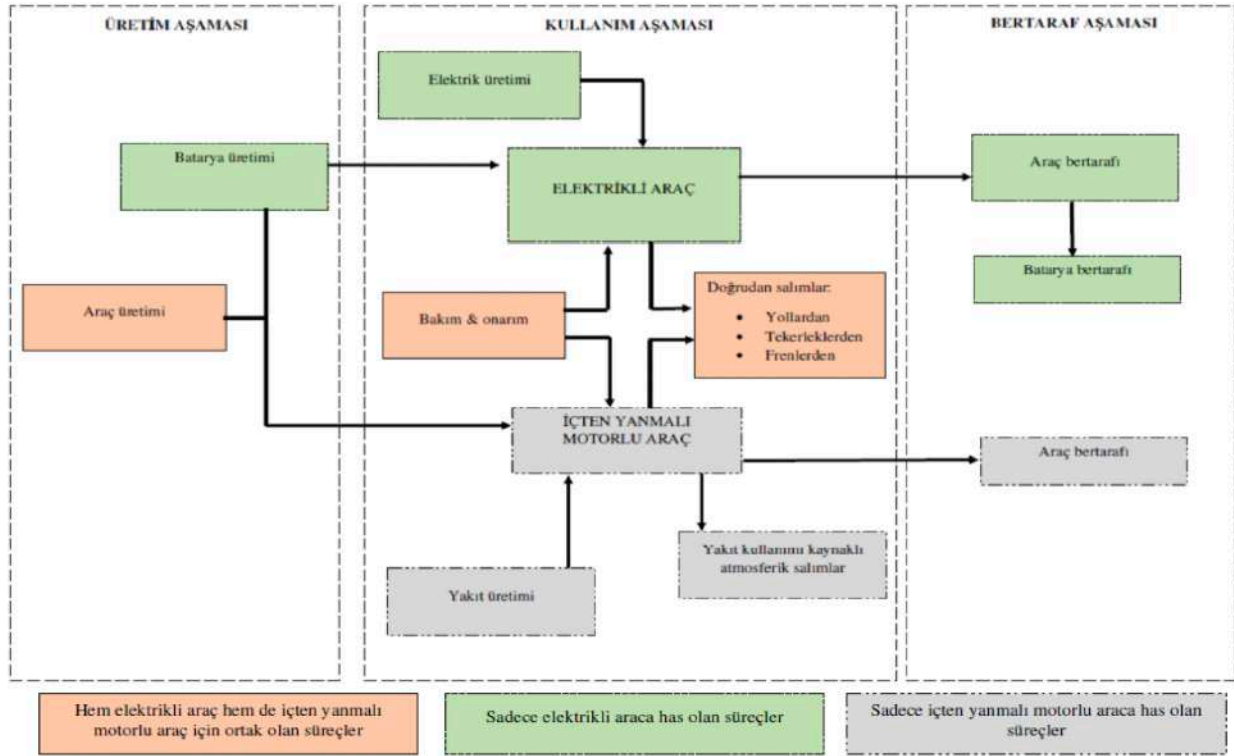
(b)



(c)

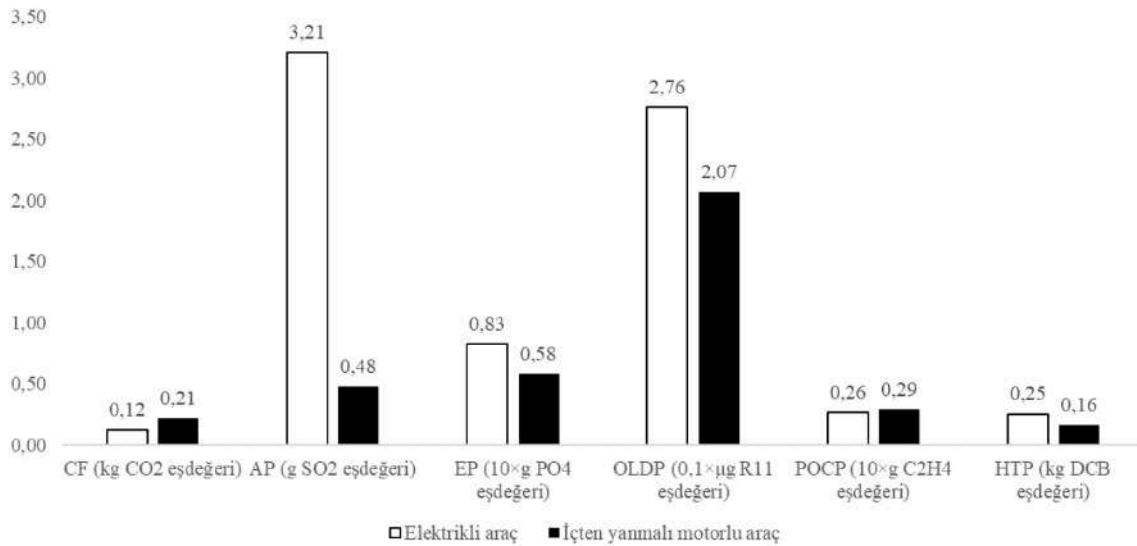
Şekil 6. Farklı Batarya Türleri İçin Batarya Üretim Aşamasının Ozon Tabakası İncelme Potansiyeli (a), Ötrofikasyon Potansiyeli (b) ve Partikül Madde Oluşumu (c) Sonuçları (Temporelli vd., 2020) (LFP: Lityum Demir Fosfat; LMO: Lityum Manganez Oksit; LMO-NCM: Lityum Manganez Oksit-Lityum Nikel Kobalt Manganez; NCM: Lityum Nikel Kobalt Manganez Oksit).

Türkiye’de üretilen EA ve İYM araçların yaşam boyu çevresel etkilerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada karbon ayak izi bakımından elektrikli araçların benzinli/dizel araçlara kıyasla daha çevre dostu olduğu açıkça görülmektedir. Ancak, diğer çevresel etkiler de dikkate alındığında, bu iki teknoloji arasında büyük bir farkın olmadığı gözlemlenmiştir (Üçtuğ, 2022). Eşit ağırlıklandırma yöntemiyle hesaplanan toplam çevresel etki skorlarına göre, EA’ların İYM araçlara göre %4 daha yüksek etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir (Üçtuğ, 2022). Çalışmada kullanılan YDD’nin kavramsal şeması Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Türkiye'de Üretilen EA ve İYM Araçların Yaşam Boyu Çevresel Etkilerinin Karşılaştırıldığı Çalışmanın Sistem Sınırları ve Girdi-Çıktı Şeması (Üçtuğ, 2022).

Şekil 6'de görüldüğü üzere, karbon ayak izi açısından, EA'lar İYM araçlara göre daha düşük etkiye sahip olmalarına rağmen, diğer beş çevresel etki faktörünün dördünde elektrikli araçların daha yüksek etkilere sebep olduğu bulunmuştur.



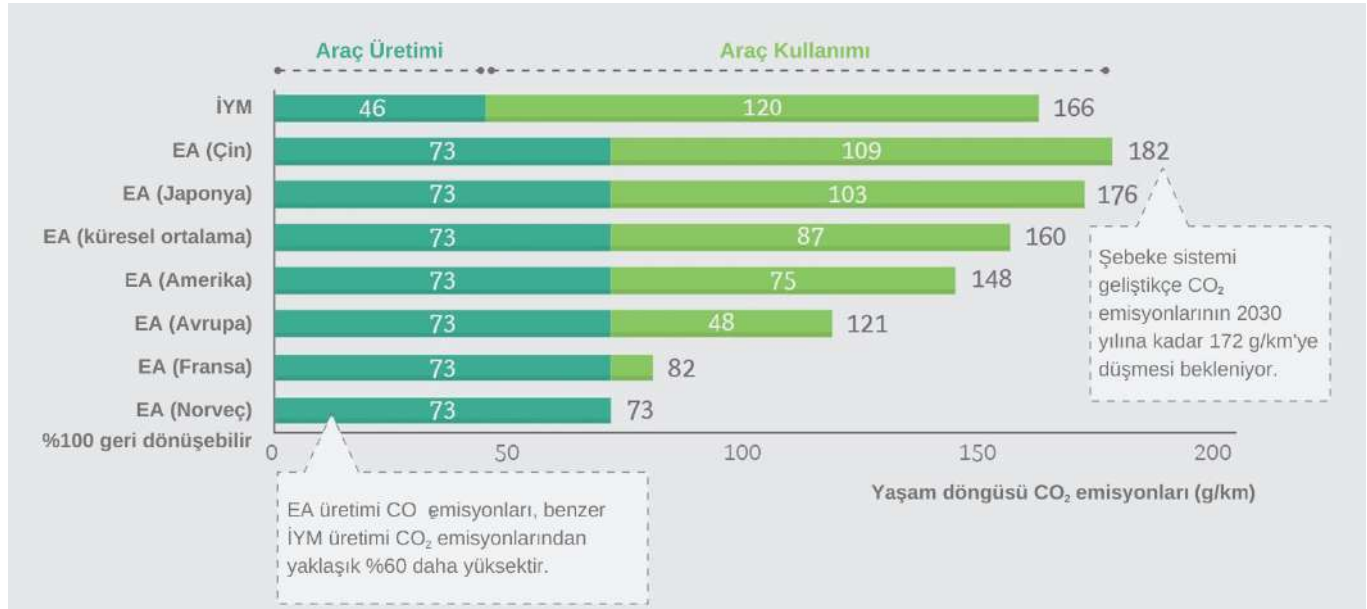
Şekil 6: Türkiye'de Üretilen EA ve İYM Araçların YDD Sonuçları (Üçtuğ, 2022). (CF: Karbon Ayak İzi (Carbon Footprint); AP: Asidifikasyon Potansiyeli (Acidification Potential); EP: Ötrofikasyon Potansiyeli (Eutrophication Potential); ODP: Ozon Tabakası İncelme Potansiyeli (Ozone Layer Depletion Potential); POCP: Fotokimyasal Ozon Oluşumu Potansiyeli (Photochemical Ozone Creation Potential); HTP: İnsan Toksikite Potansiyeli (Human Toxicity Potential)).

Çalışmada elde edilen bulgulara göre, elektrikli araçların yaşam döngüsü aşamalarına bakıldığında, hammadde tedariki (%52,7) ve tüketimi ile bertaraf (%43,9) aşamalarının toplam çevresel etkiler içinde en yüksek paya sahip olduğu belirtilmektedir. Üretim aşamasının etkisi ise daha düşük bir seviyede (%3,2) bulunmuştur. Nakliye aşamasının etkisinin ise oldukça düşük bir paya sahip olduğu (%0,2) tespit edilmiştir (Üçtuğ, 2022).

Elektirikli araçların çevresel etkileri incelendiğinde, kullanım esnasında tüketilen elektrik ve otomobil lastiklerinin en büyük etkiyi yarattığı görülmektedir. Toplam karbon ayak izinin %82'si, toplam asidifikasyon potansiyelinin %94'ü, toplam ötrofikasyon potansiyelinin %63'ü, toplam ozon tabakası incelleme potansiyelinin %93'ü ve toplam fotokimyasal ozon oluşumu potansiyelinin %75'i bu iki faktörden kaynaklanmaktadır. Sadece insan toksisitesi potansiyeli açısından en büyük etki, araç üretiminde kullanılan çelikten gelmektedir (Üçtuğ, 2022).

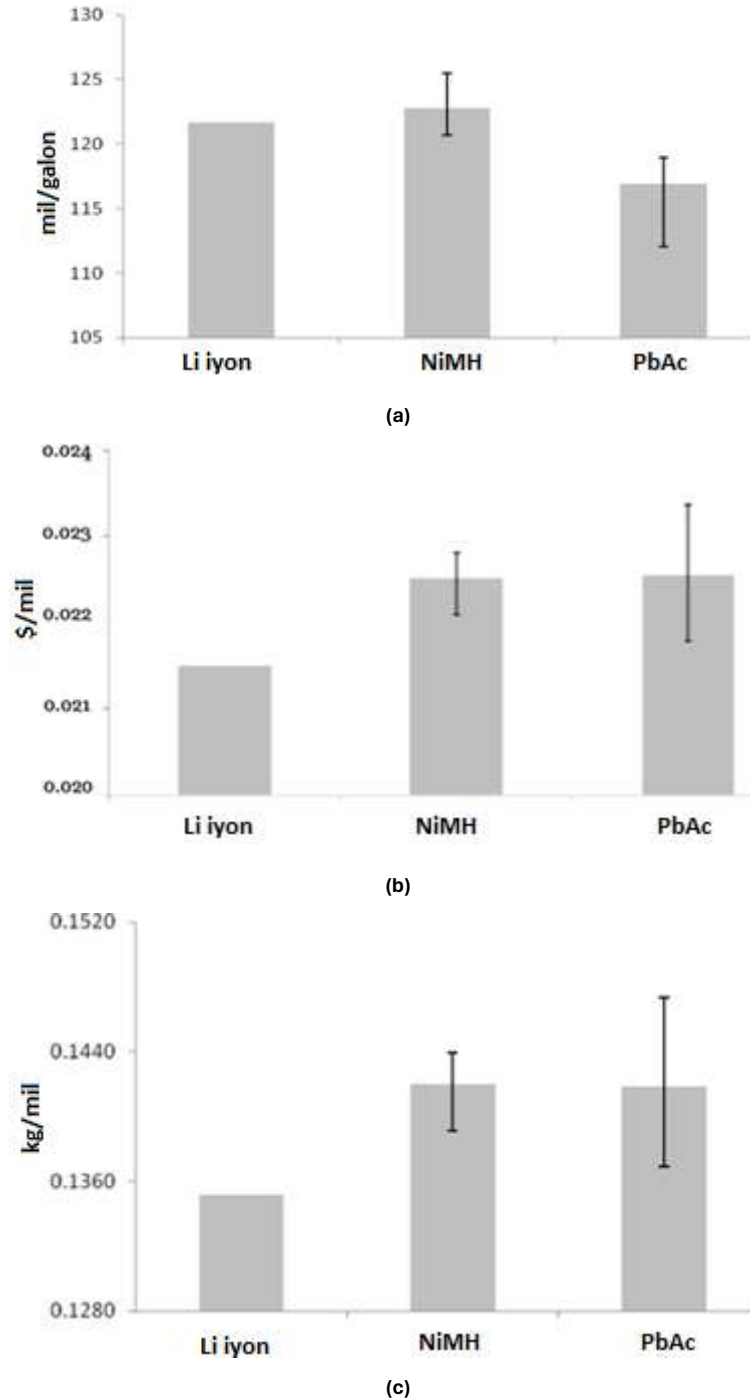
Aynı çalışmada, Türkiye'de elektrik üretiminin büyük bir kısmının (%57,6) fosil yakıtlardan kaynaklandığı ve özellikle yerel linyitin düşük kalitesi nedeniyle SO₂ gibi zararlı gazların açığa çıktığı belirtilmektedir. Bu durumun, Türkiye'deki şebeke elektriğinin çevresel etkilerini, özellikle asidifikasyon potansiyelini, nispeten yüksek kıldığı ifade edilmektedir (Üçtuğ, 2022). EA ve İYM araçların çevresel etkilerini değerlendirirken, o ülkenin elektrik şebekesindeki enerji kaynaklarının dağılımı kritik bir rol oynamaktadır. Yenilenebilir enerjinin elektrikteki payının yüksek olduğu ülkelerde, EA'ların genellikle İYM'lere kıyasla daha çevre dostu olduğu görülmektedir. Bu ülkelerde elektrikli araç kullanımı, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve daha sürdürülebilir bir ulaşım sistemine katkı sağlamada önemli bir rol oynamaktadır. Söz konusu çalışma 2022 yılında yapıldığından ve Türkiye'de yenilenebilir enerjinin elektrikteki payı hızla arttığından, bu artış devam ettiği takdirde önümüzdeki yıllarda ülkemizde EA'ların İYM araçlara göre daha çevre dostu olacağı öngörülmektedir.

2020 yılında yapılan diğer bir çalışmada farklı ülkelerde İYM ve EA'lar araç üretimi ve araç kullanımı aşamalarında oluşan CO₂ emisyonları açısından karşılaştırılmıştır (Mosquet vd., 2020). Küresel ortalamalar incelendiğinde hem İYM hem de EA'larda CO₂ emisyonunun büyük bir kısmının aracın kullanım aşamasında olduğu Şekil 7'da görülmektedir. Ayrıca genel olarak EA üretim aşaması İYM araç üretimine göre yaklaşık %60 daha fazla CO₂ emisyonu oluşturmaktadır. Çin ve Japonya'da EA'ların İYM'lere oranla daha yüksek toplam CO₂ emisyonuna sebep olduğu görülmekle birlikte, Norveç, Fransa, Avrupa, Amerika ve küresel ortalamalarda EA'ların İYM'lere oranla daha düşük CO₂ emisyonu oluşturduğu anlaşılmaktadır. EA kullanımı aşamasında oluşan CO₂ emisyonları ülkelerde ciddi farklılık göstermektedir. Buradaki kritik husus ülkenin enerji üretiminde fosil yakıtlara olan bağımlılık derecesidir.



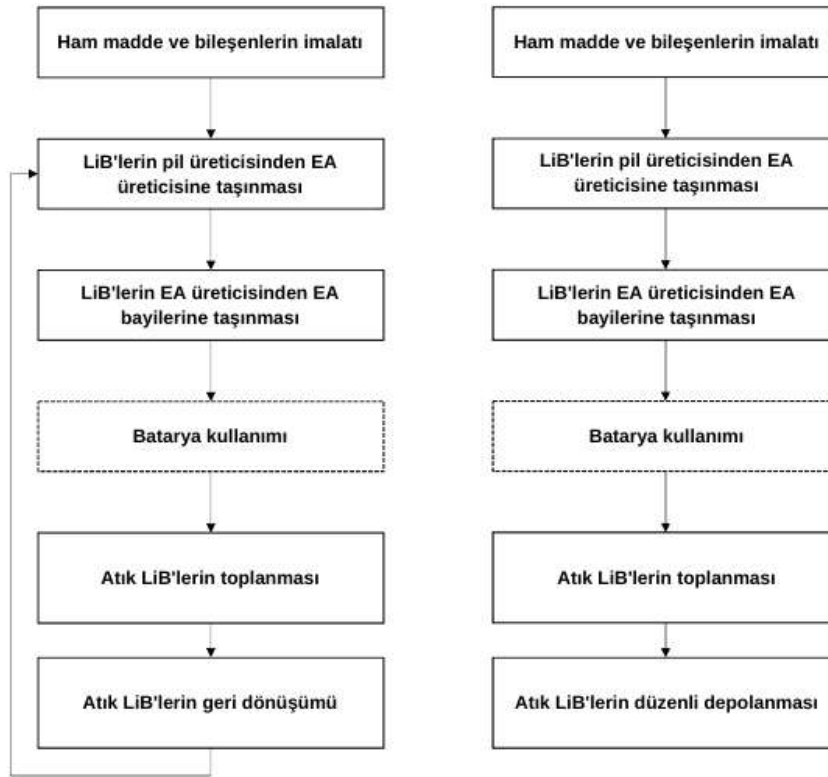
Şekil 7: İYM Araçların ve EA'ların CO₂ Emisyonu Açısından Karşılaştırması (Mosquet vd., 2020).

Shahi ve Wang (2010) tarafından yapılan bir çalışmada farklı batarya türleri için yakıt tüketimi, işletme maliyeti ve işletme sera gazı emisyonu karşılaştırılmıştır (Şekil 8). Yakıt tüketiminde, en yüksek Nikel Metal Hidrit (NiMH) bataryalar olurken, LiB ikinci sırada yer almaktadır (Şekil 8a). LiB, NiMH batarya ve kurşun asit bataryalara göre daha düşük işletme maliyeti (Şekil 8b) ve işletme sera gazı emisyonlarına (Şekil 8c) sahiptir (Shahi ve Wang, 2010).



Şekil 8: Farklı Batarya Türleri İçin Yakıt Tüketimi (a), İşletme Maliyeti (b) ve Sera Gazı Emisyonu (c) Karşılaştırması (Shahi ve Wang, 2010). (Li-ion: Lityum iyon; NiMH: Nikel Metal Hidrit; PbAc: Kurşun Asit).

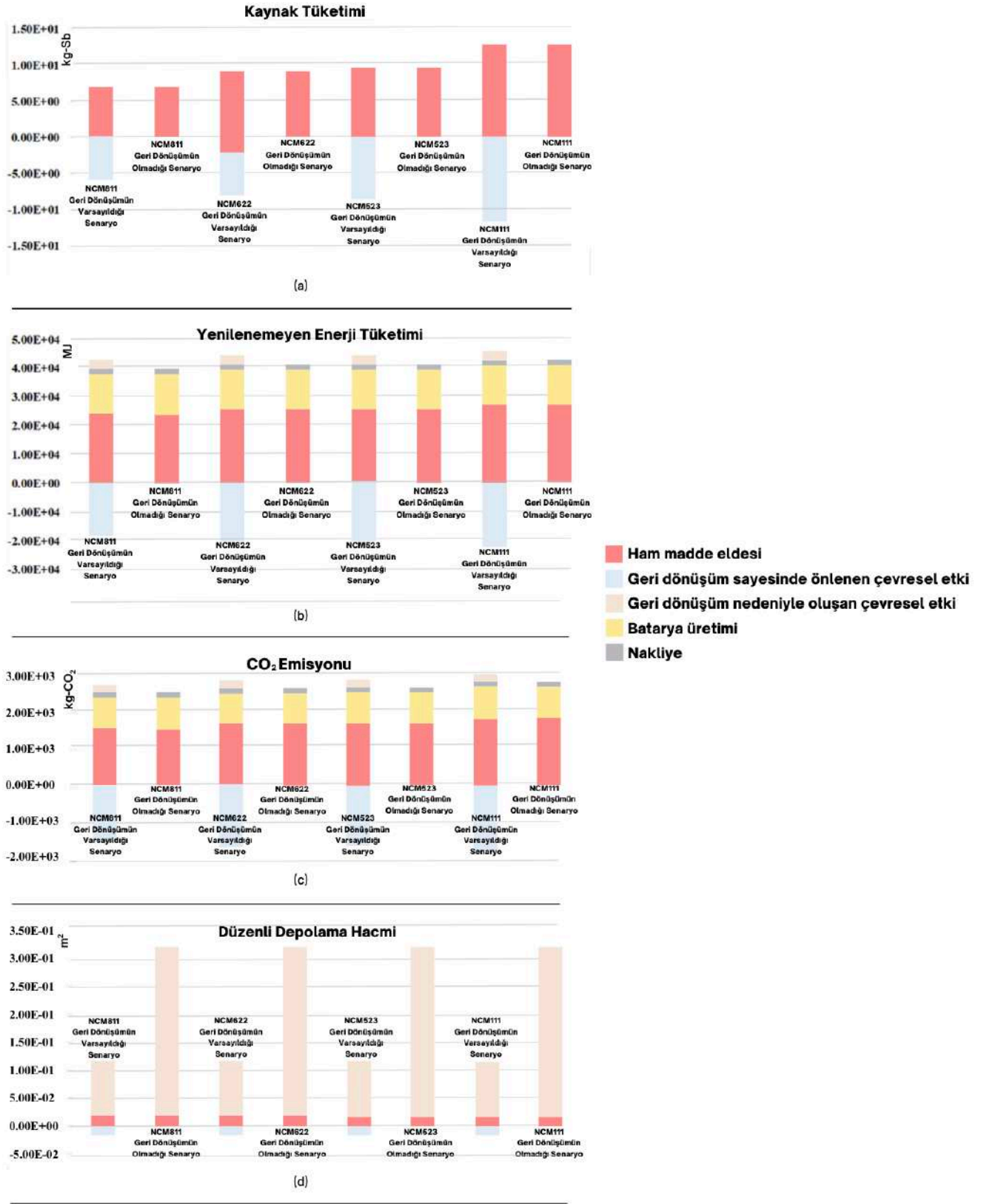
Wang ve Yu (2021) EA bataryalarının geri dönüşüm ve düzenli depolama (geri dönüşüm olmayan) senaryolarını karşılaştırmıştır (Şekil 9). Her iki senaryoda, LiB üretimi için gerekli bileşenlerin parça üreticileri tarafından üretileceği, LiB üreticisine taşınarak LiB'lerin üretileceği, sonrasında elektrikli araç üreticilerine gönderilerek elektrikli araçlarda montaj sonrası satış bayilerine taşınacağı öngörülmüştür. Geri dönüşüm olmayan senaryoda LiB'ler işlevlerini tamamladıklarında, atık LiB'lerin geri dönüşüm süreçleri olmaksızın düzenli depolamaya gönderileceği varsayılmaktadır. Öte yandan, geri dönüşüm senaryosunda, LiB'ler atık haline geldiğinde, toplama sonrasında yetkili atık LiB geri dönüşüm firmaları, atık LiB'lerden nikel, kobalt, manganez, alüminyum ve bakır gibi malzemeleri geri kazanmak için hidrometalurjik geri dönüşüm süreçleri gerçekleştirilecektir. Geri dönüştürülmüş malzemeler, yeni LiB'ler üretmek için kullanılacaktır (Wang ve Yu, 2021).



Şekil 9: EA LiB'i için Geri Dönüşüm ve Düzenli Depolama Senaryoları (Wang ve Yu, 2021).

Araştırmada 4 farklı Nikel Kobalt Magnezyum (NCM) tipi batarya incelenmiştir; NCM 523, NCM 111, NCM 622 ve NCM 811. NCM 523 için 523, katodundaki nikel, kobalt ve manganez oranını (5:2:3) ifade etmektedir. Ayrıca NCM 523'teki lityum oranı, NCM 111, NCM 622 ve NCM 811'deki lityum oranının ortalamasıdır. LiB'lerin geri dönüşüm senaryosu ve geri dönüşüm öngörülme senaryosu için kaynak tüketimi ve yenilenemeyen enerji tüketimi etkileri Şekil 10a ve Şekil 10b'de gösterilmektedir.

Şekil 10c'de görüldüğü üzere, geri dönüşüm öngörülme senaryoda bile LiB'lerin çevresel etkileri, NCM 111'den NCM 811'e gelişimi ile birlikte azalmaktadır. Örneğin, toplam CO₂ emisyonu NCM 111'de 2.740 kg iken NCM 811 için 2.460 kg'a düşmekte, batarya hammaddelerinin üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonunun toplam emisyon içindeki payı da %65'ten %61'e azalmaktadır. Bununla birlikte, toplam CO₂ emisyonu miktarı azaldığından, bataryaların EA'lara montajı sürecindeki CO₂ emisyonunun miktarı değişmemekle birlikte, toplam emisyon içindeki oranı %30'dan %34'e çıkmıştır. CO₂ emisyonunun geri kalanı, esas olarak LiB'lerin taşınmasından kaynaklanmaktadır. Kaynak tüketimi NCM 111'de 12,7 kg iken NCM 811'de 6,8 kg'a düşmektedir ve kaynak tüketiminin neredeyse tamamı batarya hammaddelerinin üretim sürecinde gerçekleşmektedir. Yenilenemeyen enerji tüketimi NCM 111'de 42.400 MJ'den NCM 811'de 39.100 MJ'ye gerilemiş olup, batarya hammaddelerinin üretim sürecinde yenilenemeyen enerji tüketimi oranı %64'ten %61'e gerilerken, %32-35'lik kısmı ise bataryaların üretim sürecinde tüketilmektedir. Bununla birlikte, gerekli düzenli depolama hacmi (0,3 m³) değişmemiştir (Şekil 10d). Bunun nedeni geri dönüşüm olmayan senaryoda, tüm atık LiB'lerin aynı ağırlığa sahip olduğu ve yalnızca düzenli depolamada bertaraf edileceğinin varsayılmasıdır. Bununla birlikte, batarya teknolojilerinin gelişimi incelendiğinde, atık LiB'lerin geri dönüşüm sürecinin olması veya olmaması, LiB'lerin toplam çevresel etkisi üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olacaktır. Örneğin, geri dönüşüm senaryosunda, LiB'lerin CO₂ emisyonu yaklaşık 1.200 kg, kaynak tüketimi yaklaşık 1 kg, düzenli depolama hacmi yaklaşık 0,1 m³ ve yenilenemeyen enerji tüketimi yaklaşık 23.500 MJ'dir. Bu da atık LiB'lerin geri dönüşümünün LiB'lerin yaşam döngüsündeki çevresel etkilerini önemli ölçüde azaltacağını göstermektedir (Wang ve Yu, 2021). Bu nedenle LiB'lerin çevresel etkilerini azaltmak amacıyla, üretiminde gerekli metal kaynağı sağlamak için atık LiB'lerin toplanması ve uygun şekilde geri dönüştürülmesi konusunda daha etkili ve verimli çalışmalar yapılması gerekmektedir.



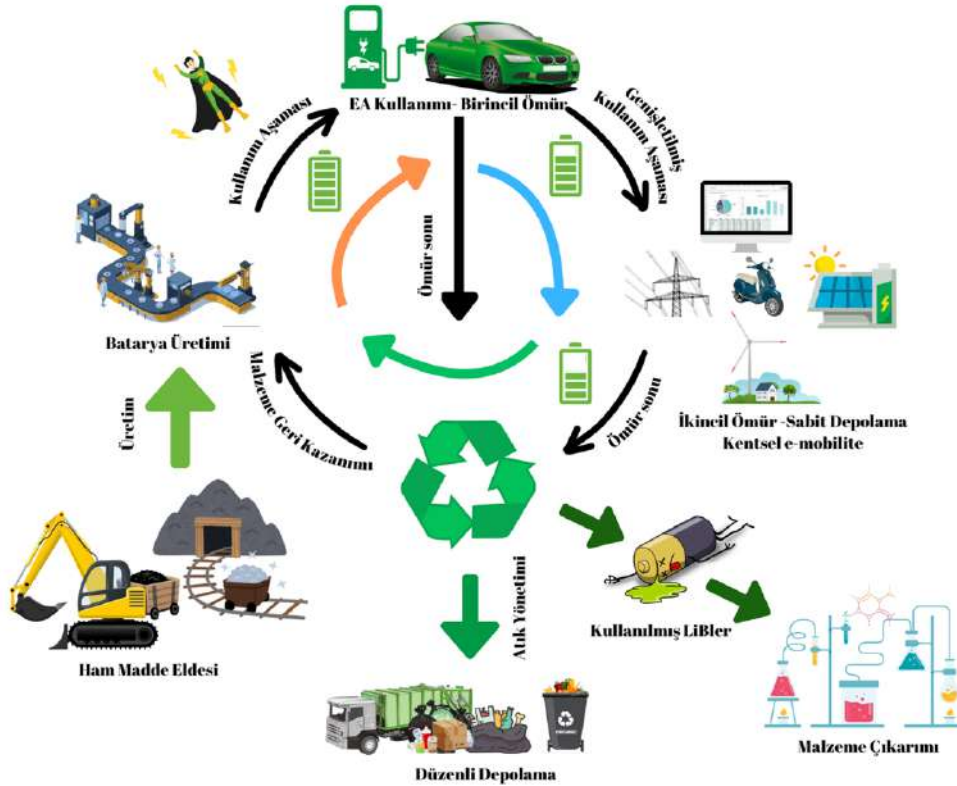
Şekil 10: Farklı LiB'lerin Geri Dönüşüm/Geri Dönüşüm Olmaması Senaryolarına göre (a) Kaynak Tüketimi (b) Yenilenemeyen Enerji Tüketimi (c) CO₂ Emisyonu ve (d) Düzenli Depolamada kapladıkları hacimlerin karşılaştırması (Wang ve Yu, 2021).

Batarya türleri karşılaştırılırken ve YDD yapılırken daha uzun süreli batarya kullanımı ve ikincil ömrünü tamamlamış bataryaların değerlendirilmesi için geliştirilen yöntemler de öne çıkmaya başlamıştır. Bunlardan biri de atık bataryaların kademeli kullanımıdır. Kademeli Kullanım, Mevcut En iyi Teknoloji-MET (Best Available Technique-BAT) olabilecek bir uygulama olan yaklaşımdır. Atık elektrikli araç LiB'lerin kademeli kullanımı, elektrikli araç LiB'lerin ömrünü uzatarak çevresel etkiyi büyük oranda azaltabilir ve dünya çapında giderek daha fazla dikkat çeken elektrikli araç LiB'lerin maliyetini düşürerek ekonomik avantajları artırabilir. Çin'de Ulusal Elektrik Şebeke Kuruluşu, LiB ve elektrikli araç üreticileri, atık elektrikli araç LiB'lerinin kademeli kullanımına ilişkin araştırma ve uygulamaya katılmıştır. Zhengzhou şehrinde bulunan, atık elektrikli araç LiB'lerinin enerji depolamada kademeli kullanımına ilişkin tanıtım projesi başarıyla tamamlanmış ve projede 45.000 kW-sa'den fazla elektrik üretilmiştir (Xu vd., 2017).

Ömrünü tamamlamış elektrikli araçlardan geri kazanılan LiB paketleri, enerji sistemlerini ve malzeme verimliliğini iyileştirmek için potansiyel teknolojik, ekonomik ve çevresel fırsatlar sunar. Batarya grupları, örneğin yük dengeleme, mesken veya ticari alanlar için enerji depolama sistemleri sağlamak üzere bir "akıllı şebekenin" parçası olarak sabit depolama uygulamalarda yeniden kullanılabilir (Ahmadi vd., 2017).

Ömrü sona eren (End-of-life; EOL) bataryaların ikincil kullanım için yeniden kullanılması, toplam hizmet ömürlerini artırır, bu da kaynak tüketimini ve atık bertarafını yavaşlatır. İkincil kullanımdan sonra bataryaların geri dönüştürülebilirliği artmaktadır. Değerli katot malzemelerin geri dönüştürülmesi ve bunların yeni batarya üretiminde kullanılmasıyla, doğal kaynaklara olan talep azaltılabilir (Aichberger ve Jungmeier, 2020). Batarya geri dönüşümünün faydalarını ortaya koymak için Hao vd. (2017), geri dönüşüm içeren ve içermeyen elektrikli araç üretiminin enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını karşılaştırmıştır. Sonuçlar, geri dönüşümün karbon emisyonlarını azaltabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada çelik, alüminyum ve bataryaların katot malzemelerinin geri dönüşümünün karbon emisyonlarındaki toplam azaltmanın sırasıyla %61, %13 ve %20'sini oluşturduğu belirtilmiştir. Mevcut geri dönüşüm süreci temel olarak pirometalurji, hidrometalurji, doğrudan rejenerasyon ve biyoliç dahil olmak üzere katot malzemelerinden yüksek değerli metallerin geri kazanılmasına odaklanmaktadır (Xia ve Li, 2022).

Özetle, elektrikli araç bataryalarının yeniden kullanımı önemli maliyet ve çevresel faydaları sağlamaktadır. Bu nedende, artan ikincil kullanım yollarını, geliştirilmiş geri dönüşüm tekniklerini ve insan ve çevre sağlığına yönelik riskleri en aza indiren nihai bertaraf yollarını içeren bir ömrünü tamamlamış batarya yönetim sistemi oluşturmak gereklidir (Şekil 11).



Şekil 11: Ömrünü Tamamlamış EA Bataryalarının Yönetimi.

Mevcut bataryalarla ilgili sorunların (batarya şarj süresi, batarya performansı, bataryanın çevresel etkileri vb.) üstesinden gelmek ve çevre dostu olmalarını sağlamak için yeni nesil batarya teknolojileri geliştirilmektedir. Halihazırda, elektrikli araçlar için LiB'lerin performansını iyileştirmek amacıyla Li açısından zengin yüksek kapasiteli katot malzemelerin (LNM'ler) yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Kobaltlı katotlarla karşılaştırıldığında, Lityum açısından zengin malzemelerin insan sağlığı ve ekosistem kalitesi üzerinde daha az etkisi vardır (Xia ve Li, 2022). Lityum kükürt (Li-S) bataryaların gelecekte elektrikli araçlara da uygulanabileceğini belirten Deng vd. (2017), Li-S bataryaların kapsamlı bir çevresel etki değerlendirmesini yaparak Li-S bataryalarla korunan grafen-kükürt kompozit katotların ve lityum metal anotların kullanımının geleneksel NMC-grafit bataryalara göre daha çevre dostu olduğunu ve çevresel etkilerinin %9-90 oranında azaldığını bulmuştur. Pozitif elektrot malzemelerinde manganez, nikel ve kobalt gibi ağır metallere kaçınılması ve batarya üretim sürecinde daha düşük enerji tüketimi nedeniyle, lityum oksit (Li-O₂) batarya sisteminin yaşam döngüsünde daha düşük çevresel etkileri vardır (Xia ve Li, 2022). Sodyum Metal Klorür (Zebra) ve NMC 111 bataryalarının üretim aşamasının çevresel etkileri karşılaştırıldığında, NMC 111 bataryalarının üretim aşamasının etkisinin Zebra bataryalara göre daha yüksek olduğu bulunmuştur (Xia ve Li, 2022). Silisyum nanoteller (SiNW'ler) ve silisyum nanotüpler (SiNT'ler), şarj ve deşarj işlemleri sırasında yüksek özgül kapasiteye ve düşük hacim genleşmesine sahip olan ve elektrikli araç uygulamaları için faydalı olan yeni nesil LiB'ler için gelecekte merkezi rol oynayabilecek anot malzemeleri olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, SiNW- ve SiNT bazlı LiB'ler, üretim süreçlerinde birçok toksik kimyasal kullanılır ve nanopartiküller yayılma riski bulunmaktadır. Aynı kapasiteye sahip NMC-SiNW ve NMC-SiNT'nin çevresel etkisinin karşılaştırılması, NMC-SiNW bataryaların NMC-SiNT bataryalara göre daha yüksek kaynak tüketimine ve çevresel etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Xia ve Li, 2022). Geleneksel NMC grafit bataryalarla karşılaştırıldığında, NMC-SiNW'nin üretim süreci büyük malzeme girdileri ve enerji gereksinimleri gerektirir (Xia ve Li, 2022).

4. ÖNERİLER

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi, elektrikli araçlar bataryalarının çevresel etkilerini ortaya koymak açısından mutlaka dikkate alınması gereken önemli bir unsurdur. Elektrikli araçlar için farklı ülkelerde, farklı üreticilerin yaptığı YDD analizlerinde birbirinden farklı sonuçlar elde edilebilmektedir. Çünkü, sistem sınırları, elektrikli araç bataryalarının yaşam döngüsü boyunca değerlendirilen çevresel etkileri belirlemede önemli bir rol oynar. Hammadde temini, üretim süreçleri veya kullanım ömrü sonunda bertaraf gibi belirli aşamaların dahil edilip edilmemesi gibi sistem sınırlarını belirleyen farklı seçimler, YDD sonuçlarında değişikliklere yol açabilir. Bu nedenle, kapsamlı ve doğru bir değerlendirme yapmak için sistem sınırlarının dikkatle tanımlanması önemlidir.

Bunlara ek olarak, elektrot aktif maddelerin üretiminde kullanılan hammaddelerin dünyanın farklı bölgelerinden gelmesi gibi etmenlerin YDD sonuçlarını etkileyeceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Yapılan envanter analizi, batarya üretiminde kullanılacak hammaddelerin detaylı bir şekilde belirlenmesini ve mevcut kaynakların etkili bir şekilde değerlendirilmesini sağlamalıdır. Veri toplama sürecinde, tedarik zinciri boyunca hammaddelerin izlenmesi, üretim aşamalarının belirlenmesi ve YDD için standart prosedürlerin uygulanması önemlidir. Bu nedenle, batarya üretiminde kullanılacak hammaddelerin tedariki ve kullanımıyla ilgili kararlar, sadece çevresel etkileri azaltmakla kalmayıp aynı zamanda ekonomik ve sosyal faktörleri etkilediğinden, bu bütüncül yaklaşım, elektrikli araç teknolojisinin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına katkıda bulunmaktadır.

Ayrıca, YDD'de dikkate alınan etki kategorilerinin seçimi, elektrikli araç bataryalarının toplam çevresel etkilerinde farklı sonuçlara yol açabilir. Sera gazı emisyonları, kaynak tüketimi, asidifikasyon ve toksisite gibi etki kategorileri sonuçları, belirli değerlendirme hedefleri ve öncelikler doğrultusunda değişiklik gösterebilir. İlgili etki kategorilerinin seçilmesi, elektrikli araç bataryalarının yaşam döngüsünde belirli çevresel sorunları vurgulamaya ve iyileştirme alanlarını belirlemeye yardımcı olabilir. Enerji kaynağı olan elektrik şebekesi, batarya kimyası ve batarya üretim yöntemleri gibi faktörler, elektrikli araç bataryalarının çevresel performansını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu dış etkilerin dikkate alınması ve hesaba katılması, elektrikli araç bataryalarının çevresel etkilerinin kapsamlı ve doğru bir değerlendirmesini sağlar.

Elektrikli araç bataryalarının sağlam ve anlamlı bir YDD analizinin yapılması için öncelikle farklı üretim ve atık yönetimi senaryolarının Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri (Multiple Criteria Decision Making) ile değerlendirilmesi, hassasiyet analizlerinin yapılması, belirsizliklerin dikkate alınması, varsayımların ve yöntemlerin şeffaf bir şekilde raporlanması, yaşam döngüsü maliyet analizlerinin yapılması oldukça önemlidir. Bu yaklaşım, paydaşların sonuçların değişkenliğini daha iyi anlamalarını sağlayacak ve EA bataryası üretimi, kullanımı ve bertarafı ile ilişkili çevresel etkileri en aza



indirgemek için doğru kararlar vermelerini sağlayacaktır. Çevresel sürdürülebilirlik sonuçlarının ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik ile birlikte değerlendirilmesi de karar verici ve politika yapıcılar için önemli sonuçlar sunacaktır.

Ülkemizde YDD analizlerinin yapılmasına yönelik insan ve bilgi alt yapısı artmakta olup, AB’de ve ülkemizde üreticilerin ve kullanıcıların YDD analizleri konusundaki farkındalığı da artmaktadır. Yeni mevzuatlara uyum sürecinde güvenilir verilerin toplanıp, doğru analizlerin yapılabilmesi, denetlenebilir ve sürdürülebilir sistemlerin kurulması gereklidir. Bu konuda ülkemizde ilgili Bakanlıkların birlikte ve eş zamanlı olarak çalışması, sanayi ve akademi ile iş birlikleri kurması ve yetki ve sorumluluk alanlarındaki süreçleri etkin yönetmesi gerekmektedir. Üreticiler de bu çalışmalara veri sağlayarak katkıda bulunmalıdır.

Elektrikli araç batarya ikincil kullanımı ve geri dönüşümü, ömrünü tamamlamış bataryaların çevresel etkilerini azaltmak için önemli bir strateji olma yolunda yaygınlığını artırmaktadır. Bu yaklaşım, YDD çalışmalarında olumlu sonuçlar göstermekte ve yapılan literatür çalışmalarıyla desteklenmektedir. İkincil kullanım ve geri dönüşüm stratejileri, hammaddelerin ve enerjinin yeniden kullanılmasına olanak tanır, böylece çevresel kaynakları korur ve enerji verimliliğini artırır. Ayrıca, atık miktarını azaltarak atık yönetimini iyileştirebilir ve toprak, su ve hava kalitesinin korunmasına katkı sağlayabilir. Bu sayede elektrikli araç batarya ikincil kullanımı ve geri dönüşümü, çevresel etkileri azaltma ve sürdürülebilirlik açısından önemli olmaktadır.

Sonuç olarak, elektrikli araç bataryalarının YDD analizlerinin yapılması, elektrikli araç bataryalarının çevresel performansları hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Ancak, sistem sınırları, etki kategorileri, fonksiyonel birim gibi faktörlere bağlı olarak sonuçların değişkenliği, sürdürülebilir kararlar ile doğru ve anlamlı sonuçlar elde etmek için değerlendirme parametrelerinin dikkatle belirlenmesi gereklidir.

KAYNAKLAR

- Ahmadi, L., Young, S. B., Fowler, M., Fraser, R. A., and Achachlouei, M. A., 2017. A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems. *International journal of life cycle assessment*, 22(1), 111-124.
- Aichberger, C., and Jungmeier, G., 2020. Environmental life cycle impacts of automotive batteries based on a literature review. *Energies*, 13 (23), 6345, 1-27.
- Baumann, M., Peters, J., Zimmermann, B., Braun, J., and Weil, M., 2017. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 67, 491-506.
- Cihansar, İ., 2022. Biyogazdan enerji üretiminin çevresel etkilerinin yaşam döngüsü değerlendirme yöntemiyle belirlenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir, 77.
- Cumhurbaşkanı Kararı, 2023. 22 Haziran 2023 tarih ve 32229 Sayılı Resmi Gazete ve 3350 sayılı karar (İthalat Rejimine Kararda Değişiklik), RG, 22 Haziran 2023, Sayı 32229.
- Çokaygil, Z. ve Banar, M., 2005, Yaşam döngüsü analizi ve standartlar açısından bir değerlendirme, VI. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, Poster Bildiri. İstanbul.
- Demirer, G.N., 2011. Yaşam Döngüsü Analizi. Sürdürülebilir üretim ve tüketim yayınları, Pratik yaşam döngüsü analizi kılavuzu, AB sürecinde işletmeler ve kamu için yaşam döngüsü analizi yöntem ve örnekleri, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Deng, Y., Li, J., Li, T., Gao, X., and Yuan, C., 2017. Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles. *Power Sources*, 343, 284-295.
- Hao, H., Mu, Z., Jiang, S., Liu, Z., and Zhao, F., 2017. GHG emissions from the production of lithium-ion batteries for electric vehicles in China. *Sustainability*, 9(4), 1-12.
- ISO 14040, Environmental management:-life cycle assessment-principles and framework. International Standards Organization, ISO 14040: 2006, Geneva.
- Martinez-Laserna, E., Sarasketa-Zabala, E., Stroe, D.-I., Swierczynski, M., Warnecke, A., Timmermans, J.M., Goutam, S. and Rodriguez, P., 2016. Evaluation of lithium-ion battery second life performance and degradation. ECCE 2016 - IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Proceedings.
- Mosquet, X., Arora, A., Xie, A., and Renner, M., 2020. Who will drive electric cars to the tipping point? BCG Boston Consulting Group.
- Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A., Söderman, M., and Van Mierlo, J., 2014. Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles-what can we learn from life cycle assessment? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 1866-1890.



OSD, 2020. Türkiye otomotiv ana sanayii yaşam döngü değerlendirmesi raporu. Otomotiv Sanayi Derneği, İstanbul.

Özdemir, A., 2019. Yaşam döngüsü değerlendirme ve sürdürülebilirlik ilişkisi bağlamında sosyal yaşam döngüsü değerlendirmesinin (S-LCA) yeri. Eskişehir Technical University. Journal of Science and Technology B- Theoretical Sciences, 7(2), 166-183.

Reinhardt, R., Christodoulou, I., Gass´o-Domingo, S., and Amante-García, B., 2019. Towards sustainable business models for electric vehicle battery second use: a critical review. Journal of Environmental Management, 245, 432–446.

Shahi, S., K., and Wang, G., G., 2010. Plug-in hybrid electric vehicle battery selection for optimum economic and environmental benefits using pareto set points and PSAT. Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Montreal, Quebec, Canada. August 15–18, 701-713.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB), 2004. Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü Yönetmeliği. Resmî Gazete, 25569, 31 Ağustos 2004, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7118&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB), 2019. Geri Kazanım Katılım Payına İlişkin Yönetmelik. Resmî Gazete, 30995 (4.Mükerrer), 31 Aralık 2019, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=34147&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>

Temporelli, A., Maria Leonor, C. ve Pierpaolo, G., 2020. Life cycle assessment of electric vehicle batteries:an overview of recent literature. Energies, 13(11), 1-14.

Üçtuğ, F. G., 2022. Türkiye’de üretilen elektrikli ve içten yanmalı motorlu araçların karşılaştırmalı çevresel yaşam döngü değerlendirmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10(4), 1701-1714.

Wang, S., and Yu, J., 2021. A comparative life cycle assessment on lithium-ion battery: Case study on electric vehicle battery in China considering battery evolution. Waste Management & Research, 39(1), 156-164.

Winslow, K. M., Laux, S. J. ve Townsend, T. G., 2018. A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries. Resources, Conservation & Recycling, 129, 263-277.

Xia, X., and Li, P., 2022. A review of the life cycle assessment of electric vehicles: Considering the influence of batteries. Science of The Total Environment, 814, 1-14.

Xu, C., Zhang, W., He, W., Li, G., Huang, J., and Zhu, H., 2017. Generation and management of waste electric vehicle batteries in China. Environmental Science Pollution Research, 24, 20825-20830.

Zahedi, R., Moosavian, S.F., and Aslani, A., 2022. Environmental and damage assessment of transparent solar cells compared with first and second generations using LCA approach. Energy Science and Engineering, 10, 4640–4661.

İnternet Kaynakları

[1] <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>, 14.04.2024.

[2] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614>, 14.04.2024.

[3] https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, 14.04.2024.

[4] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_7588, 14.04.2024.



SEKTÖREL BAKIŞ: ELEKTRİKLİ ARAÇLAR DÜNYASI



S. Eserdağ¹ [+], İ. K. Yıldırım², H. Ölmez³, G. Umdu¹, S. Mutlucan¹, İ. Bulur¹, G. Gediz İliş⁴

ÖZET

Elektrikli araçlar, son yıllarda otomotiv sektöründe önemli bir değişimi başlatarak sektörün dönüşümünde kilit bir rol oynamaya başlamıştır. Dünyanın önde gelen otomobil üreticileri, çevre dostu ve ekonomik bir ulaşım alternatifi sunmak adına elektrikli araç modellerini piyasaya sürmektedir.

Bu bölümde, elektrikli araç tanımlamaları, pazarının büyüklüğü, dağılımı ve trendleri ile ilgili istatistiksel veriler paylaşılacak; özellikle Li iyon batarya içeren elektrikli araç teknolojilerinin geçmişi, bugünü ve geleceği hakkında bilgiler verilecektir.

Dünya genelinde iklim değişikliği, toplulukların ve ülkelerin yeni regülasyonlar ortaya çıkarmasına neden olan büyük bir tehdit oluşturmuştur. Bu regülasyonların ortak amacı, ulaşım sektöründeki CO₂ emisyonunu azaltmak için sıfır emisyon teknolojilerini desteklemektir, bu da otomotiv sektöründe önemli değişikliklere yol açmıştır.

Ülkemizde devlet tarafından yapılan girişimler sayesinde, elektrikli araç üretimi gerçekleştirilmiş ve bu pazarda varlık gösterilmiştir. Elektrikli araç üretimiyle birlikte, bu üretimi destekleyen ekosistem oluşmaya başlamış ve süreklilik için çeşitli destekler devam etmektedir. Bu ekosistemin gelişerek sürdürülebilir hale gelmesi ile ülkenin pazardaki hakimiyetinin güçlenmesi ve yeni teknolojilerin kullanıcısı olmaktan çıkıp, tasarımcısı ve üreticisi olması yönünde güçlenmesi sağlanacaktır.

Özette, dünya genelindeki değişen dinamiklere paralel olarak Türkiye, elektrifikasyon, yerlilik ve pazar payı artışı gibi hedeflere odaklanmaktadır. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın belirlediği yol haritasında, elektrikli araçlarda yerliliği artırmak ve pazar payını yükseltmek için çeşitli eylem planları bulunmaktadır. Türkiye'nin bu süreçte elektrikli araç ve batarya yatırımlarıyla değer zincirine entegrasyonu stratejik önem taşımaktadır.

[+] seserdag@incigsyuasa.com

1 İnci GS Yuasa Akü San. ve Tic. A.Ş., Merkez, 45030 Manisa, Türkiye.

2 TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., 16110 Bursa, Türkiye.

3 TEMSA Ulaşım Araçları A.Ş., Üsküdar, 34398 İstanbul, Türkiye

4 Gebze Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çayyova, 41400 Kocaeli, Türkiye

1. OTOMOTİV SEKTÖRÜNDEKİ GELİŞMELER

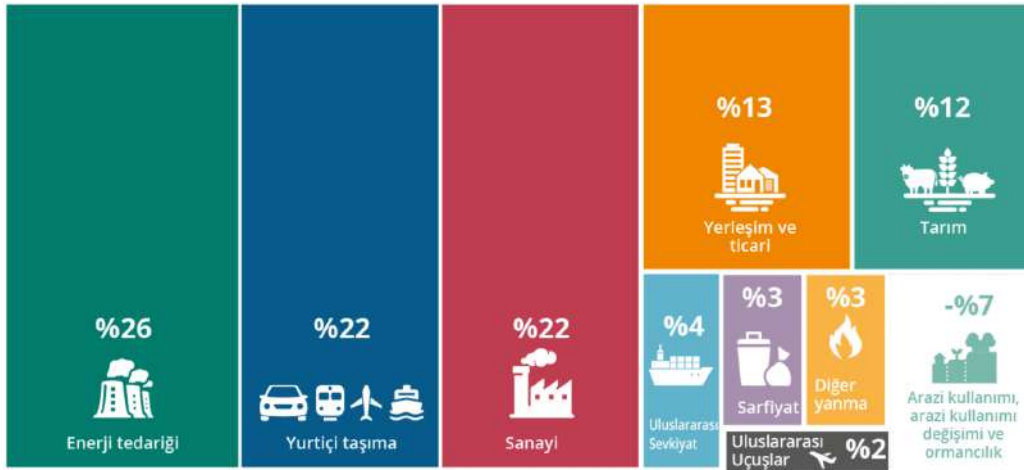
Otomotiv sanayisi, ülke ekonomilerine önemli katkılar sağlayan kilit bir sektördür. Avrupa örneğinde görüldüğü gibi, bu sektörün Gayri Safi Milli Hasılasına (GSMH) 1 trilyon € fazla katkı sağlaması ve 13,8 milyon kişiye kaliteli istihdam olanağı sunması, otomotiv endüstrisinin değer zincirine dahil olan tüm ülkeler için geçerlidir. Bu nedenle birçok ülke, otomotiv sanayine yapılan yatırımlar konusunda birbirleriyle rekabet etmektedir. Bu yatırımlar, üretimi destekleyen diğer sanayi kollarının da gelişmesine olanak tanırken teknoloji ile yeni uygulamaların transferini sağlayarak ülkelerin zaman içinde uygun bir ortam yaratmalarına yardımcı olacaktır (Int. Kyn. 1).

Dünya, küresel olarak bir yapısal dönüşüm geçirmektedir. Bu dönüşüm, iklim krizinin varlığı ve insan davranışlarını değiştirme gerekliliği gibi faktörlerle birleşerek tüm sektörleri derinden etkilemektedir. Ülkeler, bu değişen dinamiklere yanıt olarak yeni global regülasyonlar üretmektedir ve bu regülasyonlardan en çok etkilenen sektörlerden biri otomotiv sektörüdür.

Özellikle otonom araçların kullanımı, elektrikli araç üretimi ve karbon nötr olma hedefleri, şirketlerin faaliyetlerini bu yeni regülasyonlara uygun hale getirmeleri için motive etmektedir. Bu regülasyonlar, sürdürülebilirlik, elektrifikasyon ve güvenlik gibi alanlarda sektördeki gelişmeleri hızlandırmaktadır. Bu bağlamda, otomotiv şirketleri bu regülasyonlara uyum sağlamak ve geleceğe yönelik stratejiler geliştirmek için çeşitli alanlarda çalışmalar yürütmektedir.

Elektrikli araç satışlarının küresel olarak arttığı bir dönemde, Uluslararası Enerji Ajansı tarafından yapılan projeksiyonlara göre, 2030'da elektrikli araç satışlarının küresel payının % 35'e yükselmesi beklenmektedir. Çin, bu alanda liderliğini korumaya devam ederken, ABD'nin pazar payının % 20'ye çıkması ve Avrupa'nın mevcut %25'lik payını sürdürmesi öngörülmektedir. Elektrikli araç talebindeki artış, enerji piyasaları ve iklim hedefleri üzerinde büyük etkiler yaratmaktadır. Bu talep artışıyla birlikte, petrol talebinin günlük 5 milyon varilin üzerinde azalması ve 700 milyon ton CO₂ eşdeğer emisyonun engellenmesi beklenmektedir (Int. Kyn. 2).

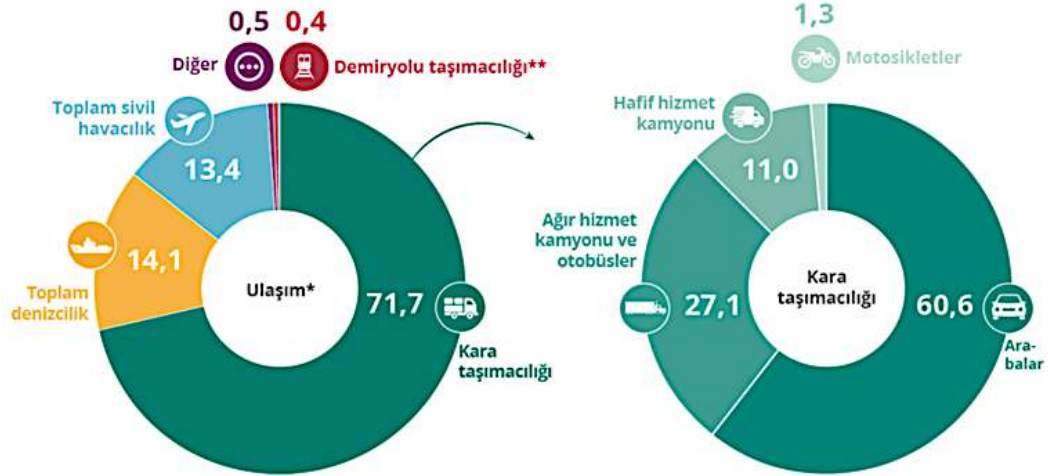
Avrupa ve ABD, elektrifikasyon hedeflerini desteklemek üzere CO₂ standartları ve yasal düzenlemeleri benimsemektedir. Bu bağlamda batarya üretimi, 2030 için belirlenen hükümet taahhütlerini karşılamak üzere planlanması gereklidir.



Şekil 1. Avrupa Birliği'ndeki Sera Gazı Emisyonu Kaynakları (Int. Kyn. 3)

Avrupa Çevre Ajansı'nın 2022 analizine göre, Avrupa'da sera gazı emisyonunu artıran en önemli kaynaklar %26 enerji tedarigi, %22 yurtiçi taşıma ve sanayi oluşturmaktadır (Int. Kyn. 3).

Avrupa düşük karbonlu bir enerji geleceğine doğru ilerlemektedir. Avrupa Birliği'nin (AB) sera gazı emisyonlarını 1990 seviyelerine kıyasla %20 oranında azaltmak, yenilenebilir enerji kullanım oranını % 20'ye çıkarmak ve enerji verimliliğini % 20 oranında iyileştirmek şeklindeki ilk üç iklim ve enerji hedefine ulaştığı 2020 yılı önemli bir dönüm noktası olmuştur. 2030 ve 2050 hedeflerine ulaştırılması, AB Üye Devletlerinin eylemlerinde daha da iddialı olmalarını gerektirecektir. Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında, Avrupa İklim Kanunu'nda 2030 yılına kadar en az % 55'lik yeni bir net azaltım hedefinin yanı sıra 2050 yılına kadar artık emisyonun eşdeğer miktarda CO₂ giderimi ile dengelenmesi anlamına gelen iklim nötrlüğüne ulaşma taahhüdü öngörülmektedir (Int. Kyn. 4).



Şekil 2. Avrupa Birliği'ndeki Ulaşım Kaynaklı Sera Gazı Emisyonları (Int. Kyn. 5)

Avrupa Birliği, taşımacılıktan kaynaklanan sera gazı emisyonunu, 1990'a kıyasla 2050'ye kadar, %90 oranında azaltma konusunda iddialı bir hedef belirlemiştir. Ancak şu ana kadar bu hedef doğrultusunda ilerleme kaydetmek zor olmuştur. Avrupa Çevre Ajansı verileri, AB'de son 30 yılda sera gazı emisyonlarının arttığı tek büyük ekonomik sektörün ulaştırma sektörü olduğunu göstermektedir (Int. Kyn. 4).

Halihazırda ulaştırma kaynaklı emisyonlar şu anda, AB'nin toplam sera gazı emisyonlarının dörtte birinden fazlasını teşkil etmektedir. Bu emisyonların neredeyse dörtte üçü kara yolu taşımacılığından kaynaklanmaktadır ve kara yolu taşımacılığı kaynaklı emisyonların yarısından fazlası otomobillerden kaynaklanmaktadır. Mevcut politika önlemleriyle emisyonlarda bir azalma öngörülse de AB'nin 2050 iklim nötrlük hedefine ulaşmak için yeterli değildir. Bu durum, ulaşım sektöründe daha temiz enerji kaynaklarına yönelik yeni stratejilere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇ TANIMLAMALARI VE TASARIMLARI

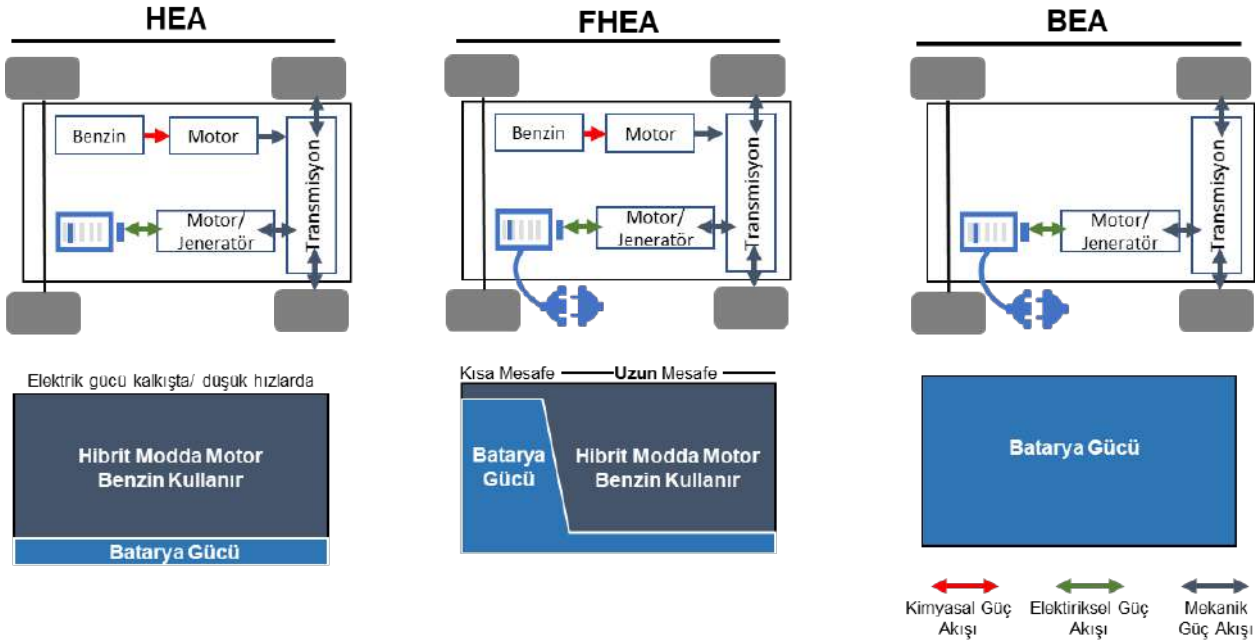
Elektrikli araç tanımlamaları TS 13909 Elektrikli araçlar ve elektrikli araç şarj sistemleri - Temel terimler ve tanımlar standardında 21 Mayıs 2021' de yayınlanmıştır (Int. Kyn. 6).

Günümüzde Tablo 1' de kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü yeniden şarj edilebilir elektrik araç tasarımları mevcuttur. 1900'lü yılların başlarından bu yana otomobillerin çalıştırılması için gerekli enerjisini sağlamak üzere araçlarda enerji depolama kurşun-asit akü olarak bilinen bataryalarla ile yapılmaktadır. Son yıllarda ise bataryalar, yüksek performans gösteren ve aracın sürüşü esnasında kullanılan içten yanmalı motorlardaki yakıtın yerini alan, araca enerji ve güç sağlayarak, emisyonu azaltan yeni tasarımlar olarak ortaya çıkmışlardır. Tablo 1'de bu tasarımların Türkçe ve İngilizce karşılıkları verilmiştir.

Tablo 1. Elektrikli araç tasarımları ve kısaltmaları

Araç Tasarımı (TR)	Kısaltma (TR)	Araç Tasarımı (ENG)	Kısaltma (ENG)
Bataryalı Elektrikli Araç	BEA	Battery Electric Vehicle	BEV
Hibrit Elektrikli Araç	HEA	Hybrid Electric Vehicle	HEV
Soketli/Fişli Hibrid Elektrikli Araç	FHEA	Plug in Hybrid Electric Vehicle	PHEV

Tablo1 'de verilen araçlardan elektrikli araçların şematik gösterimi Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Motor ve Aktarma Organlarına Göre Araç Tipleri.

Bataryalı Elektrikli Araç (BEA), sadece elektrik motoru ve batarya ile çalışan elektrikli araçlardır. Tüm enerjilerini bataryanın şarj edilmesi ile almaktadır. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA), içten yanmalı motor ve destek için elektrik motoru ve batarya kullanan araçlardır. Dışarıdan elektrik ile şarj edilmezler. Fişli Hibrit Araçlar (FHEA), elektrik motoru ve içten yanmalı motorla birlikte ya da ayrı çalışabilen, şarj olabilen araçlardır.

İçten yanmalı motora sahip bir araç, yaklaşık 30.000 parçaya sahiptir. Sadece hareketli parçalar sayıldığında ise parça sayısı 10.000 civarındadır. Eğer işlevsel üniteler yani sistemler olarak sınıflandırılırsa parça sayısı yaklaşık 1.500 adettir. Elektrikli araçlarda ise hareketli parçaların büyük çoğunluğu bulunmadığından içten yanmalı motora sahip bir araca göre parça sayısı %50'ye kadar azalmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, hibrit sistemler, IYM (Internal Combustion Engine, ICE – İçten Yanmalı Motor, IYM) ve BEA'lara göre çok daha karmaşık yapıya sahip olduğundan detaylı bir yönetim sistemi gereksinimi ortaya çıkmaktadır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilite Araç ve Teknolojileri Yol Haritası, 2022)

Tüm bu elektrikli araç sistemlerinde ticari olarak hali hazırda Li iyon batarya teknolojileri hakimdir. Dünyada gerek içten yanmalı araç üreticileri gerekse devlet teşvikleri ile sadece elektrikli araç üretimi yapmak üzere kurulmuş şirketler mevcuttur. Bu şirketler var olan batarya teknolojilerini kendi tasarımlarına adapte ederek yeni araç modellerini yaygınlaştırmakta ve müşterisi ile buluşturmaktadır.

3. ELEKTRİKLİ ARAÇ PAZAR GELİŞİMİ

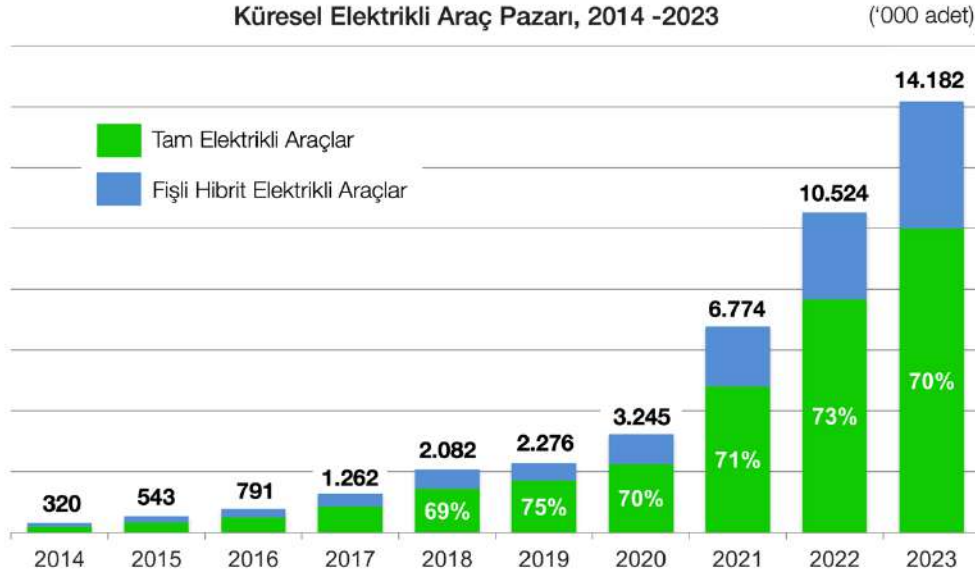
Elektrikli araç kavramı genel olarak ulaşımdaki emisyonları azaltarak dünyanın sera gazı etkisi nedeniyle ısınmasını önlemek üzere oluşturulmuştur. Pazarda yer alan müşterinin elektrikli araçlarda önceliklendirdikleri özellikler, ülkelerin kültürlerine, demografik yapıya, yaşa, cinsiyete göre değişmekle birlikte aranılan özellikler; pil ömrü ve dayanıklılığı, şarj altyapısı, performans ve kullanım, devlet teşvikleri ve indirimleri, maliyet, güvenlik, çevresel etki, marka itibarı, görsel tasarım (stil), hızlı şarj edebilme ve satış sonrası hizmet çözümleri gelmektedir.

Elektrikli araçların satışlarının hızla arttığı bu dönemde, küresel çapta sürdürülebilirlik ve düşük karbon emisyonu hedefleriyle birlikte otomobil endüstrisindeki dönüşüm oldukça önem kazanmıştır. International Energy Agency (IEA) verilerine göre, 2022'de 10 milyondan fazla elektrikli araç satılmıştır ve bu, küresel emisyonları 80 milyon ton karbon dioksit eşdeğerinde azaltmıştır. Bu, elektrikli araçların çevresel etkilerini azaltmada önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir (Int. Kyn. 2).

Elektrikli araç satışları 2014 yılından bu yıla hızla artmış ve 2023'ün sonunda 14.128.000'e ulaşmıştır. Bu değer küresel araba satışlarının %18'ini oluşturmaktadır. Elektrikli araçların pazar payı, 2020'den bu yana neredeyse 4 katına çıkarak

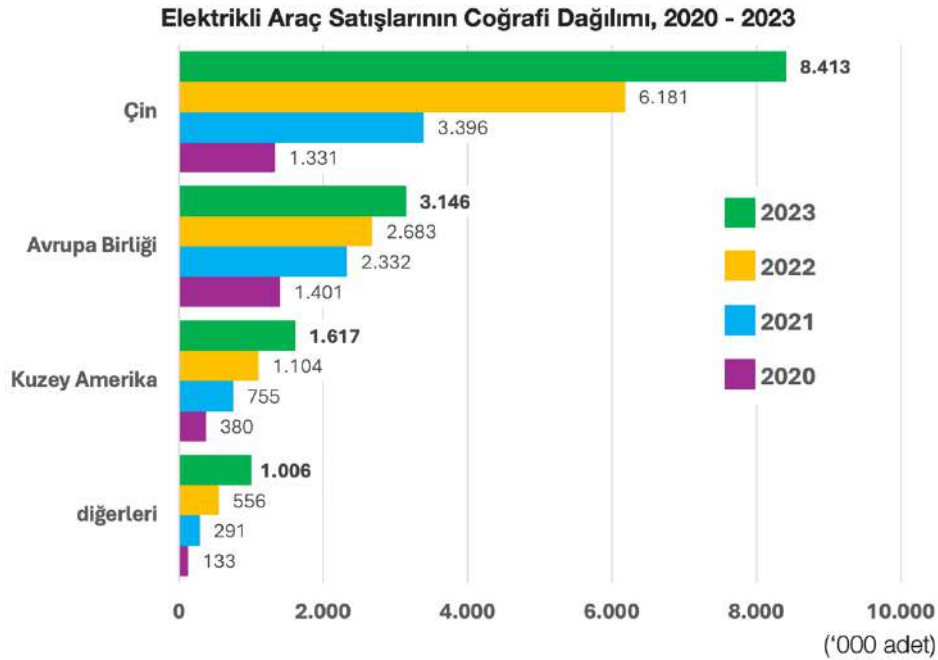


büyük bir büyüme göstermiştir (Şekil 4). Bu trend, otomobil endüstrisindeki dönüşümün hızlandığının ve gelecekte daha sürdürülebilir bir ulaşım sistemine geçiş fikrinin kabul edildiğinin göstergesidir.



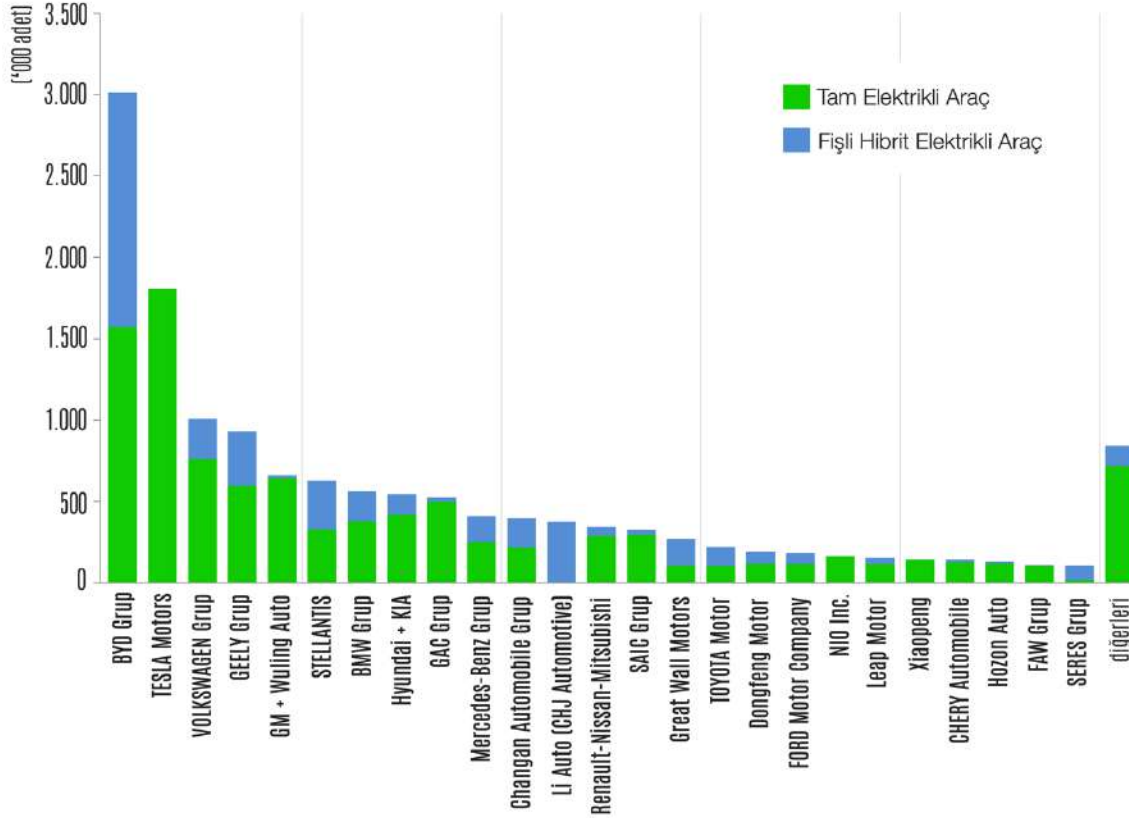
Şekil 4. 2014-2023 Yılları Arasındaki Elektrikli Araç Satışları (Bu grafik ve değerler, Çalışma Grubu tarafından IEA, EVvolumes.com gibi sitelerin materyalinden türetilen bir çalışmadır ve Çalışma Grubu, türetilen bu çalışmadan tek başına sorumludur).

Elektrikli araç satışlarının coğrafi dağılımı incelendiğinde Çin'in diğer coğrafyalara oranla oldukça yüksek değerlerle ilk sırada olduğu görülmektedir. Bu durum Çin devletinin bu teknolojiye 2000'li yılların başında yatırım yapmış olması sonucu bugün hem Ar-Ge, hem ürün, hem proses konusunda sahip olunan bilgi ve tecrübe ile ilişkilidir. Elektrikli araç üreten ülkeler, yaptıkları yatırımların sonucunda ortaya çıkan teknolojilerini satarak yarattıkları değerlerin karşılığını hem ülkelerindeki hem de dünyadaki sera gazı emisyon değerlerinin azaltılmasını sağlayarak sosyal ve finansal anlamda almaktadırlar.



Şekil 5. 2020-2023 Yılları Arasındaki Elektrikli Araç Satışlarının Coğrafi Dağılımı (Bu grafik ve değerler, Çalışma Grubu tarafından IEA, EVvolumes.com gibi sitelerin materyalinden türetilen bir çalışmadır ve Çalışma Grubu, türetilen bu çalışmadan tek başına sorumludur).

Elektrikli araç satışlarının dağılımı, araç üreticileri esas alınarak incelendiğinde ise, otomotiv sektöründe yer almayan ancak elektrikli araç modelleri üreterek ulaşım sektörüne giren BYD ve Tesla'nın, 2023 yılında önde gelen 20 elektrikli araç üreticisinin satışlarına göre öne çıktığı Şekil 6'da görülmektedir. Bu iki marka, 2023 yılında ürettikleri değişik modellerle toplam elektrikli araç satışlarının yaklaşık %30'unu gerçekleştirmiştir.



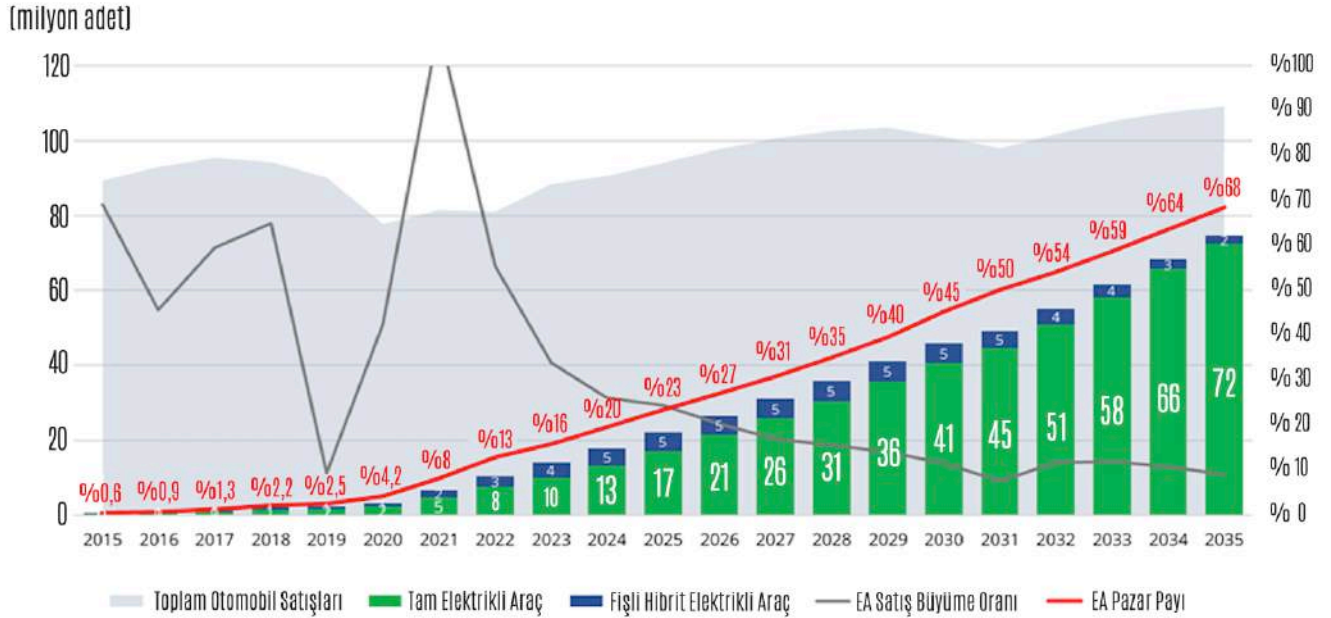
Şekil 6. 2023 yılındaki küresel EA satışlarının otomotiv şirket veya gruplarına göre dağılımı (Bu grafik ve değerler, Çalışma Grubu tarafından IEA, EV volumes.com gibi sitelerin materyalinden türetilen bir çalışmadır ve Çalışma Grubu, türetilen bu çalışmadan tek başına sorumludur).

4. ELEKTRİKLİ ARAÇ PAZARI GELECEK TAHMİNLERİ

Otomotiv sektöründe gelecek tahminleri incelendiğinde 2030 yılında dünya genelinde satılan her üç otomobilden birinin elektrikli araç olması beklenmektedir. Toplamda 2030 yılında 46 milyon civarında elektrikli araç üretileceği tahmin edilmektedir (Bknz. Şekil 7). Lider pazarların Çin ve Avrupa olduğu öngörülmekte, Çin'in 19 milyon adet ve Avrupa'nın 12 milyon adetlik satış ile öne çıkacağı belirtilmektedir. Bu bölgelerdeki BEA araçların pazar payının % 50'nin üzerinde olması beklenmektedir. Kuzey Amerika, Avrupa ve Çin'e kıyasla 5 yıl gecikmeli olarak 3. en büyük pazar olacağı öngörülmektedir. Bu, elektrikli araçların küresel olarak yaygınlaşması ve farklı coğrafyalarda benimsenmesi sürecinin farklı hızlarda ilerlediğini göstermektedir.

Tüm bu veriler, otomobil endüstrisindeki dönüşümün ivme kazandığını ve elektrikli araçların giderek daha yaygın hale geldiğini göstermektedir. Bu durum, sürdürülebilir bir geleceğe doğru atılmış önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Elektrikli araç satışlarındaki artış, araç üreticilerinin BEA modellerini piyasaya sürmeleri, genişleyen şarj altyapısı ve kamu destek mekanizmalarının devreye girmesiyle birlikte önemli bir ivme kazanmış durumdadır. 2023 yılında gerçekleşen satışların %15'ten fazlası, ağırlıklı olarak BEA ve hibrit araçlardan oluşmuştur. Bu oranın 2020'de sadece % 4 olduğu düşünüldüğünde, elektrifikasyona geçişin hızlandığı söylenebilir. Kısa vadede, makro ekonomik koşullar ve bazı ülkelerde devlet desteklerinin azalması gibi faktörlerle araç satışlarındaki artış trendi yavaşlayabilir. Ancak uzun vadede, 2035'e kadar araç satışlarının ağırlık olarak BEA tarafından gerçekleşmesi beklenmektedir (Bknz. Şekil 7).



Şekil 7. Globaldeki BEA ve FHEA Beklentileri (Int. Kyn. 7)

Şekil 7'de küreseldeki BEA ve FHEA talep beklentilerinde artış görülmektedir. BEA artışının FHEA'ya oranla oldukça yüksek olduğu da dikkat çekmektedir.

5. OTOMOTİV FİRMALARINDA ELEKTRİKLİ ARAÇ STRATEJİLERİ

Ülkeler, sanayilerindeki elektrifikasyon geçişini başarıyla yönetmek, rekabetçiliklerini korumak ve yeni döneme uyum sağlamak amacıyla çeşitli ve farklı desteklerden oluşan politikaları hayata geçirmektedirler. Buradaki temel hedef, elektrifikasyon etrafında oluşan değer zincirinin mümkün olduğunca tercih ettikleri coğrafyalarda oluşmasını sağlamak ve diğer coğrafyalara olan bağımlılıklarını asgari düzeye indirmektir. Jeopolitik alandaki gelişmeler de bu trendi güçlendirmektedir. Her durumda, bu değişim temel olarak yeni ekonomik büyüme kaynaklarını da beraberinde getirmektedir.

Elektrifikasyon dönüşümü, sanayide beklenen değer, kişi ve/veya eşyanın güvenli, konforlu ve uygun maliyetli mobilitayı (hareketlilik) sağlama anlayışını temel olarak değiştirmiştir. Gelecekte otomotiv sanayisi, mobilita (hareketlilik) ihtiyacını sürdürülebilirlik, paylaşımlı ve otonom olma, dijital dünya ile fiziksel dünyanın sınırlarının kalktığı bir alan etrafında oluşturmak durumundadır.

Bu dönüşüm, küresel değer zinciri oluşturma kapasitesine sahip firmaların iş yapış biçimlerini yeniden yapılandırmalarını gerektirmektedir. Bu yapılandırmayı özel kılan, araç üreticilerinin daha önce herhangi bir tecrübe ve kapasiteye sahip olmadıkları sanayi kollarını değer zincirlerine dahil etmek zorunda kalmalarıdır. Bu yapılandırma, yazılım, maden ve batarya gibi alanları üst düzeyde bir araya getirmektedir. Firmalar, bu kapasiteleri kendi bünyelerinde geliştirmeye çalışırken aynı zamanda yaptıkları iş birlikleri ile öğrenme ve tedarik süreçlerini kısaltmayı hedeflemektedirler.

Bağlantılı hizmetler, otonom araçlar, paylaşımlı mobilita ve elektrifikasyon teknolojileri (CASE trendleri), geleneksel OEM'lerin elektrikli araç devrimine katılmaları konusunda baskı yaratmıştır. Birçok şirket elektrikli araç ürün çeşitliliğini artırma planlarını paylaşmıştır. Bu planların çoğu uzun vadeli olsa da yatırımlar elektrikli araç pazarında şimdiden somut sonuçlar vermeye başlamıştır.

Tablo 2'de, başlıca otomotiv üreticilerinin elektrikli araç üretimine yönelik yatırım hedeflerini içeren son haberler yer almaktadır.

Bölüm 12. Sektörel Bakış: Elektrikli Araçlar**Tablo 2.** Otomobil Sektörünün Elektrikli Araç Üretimi Üzerine Yatırım Hedefleri (Reuters'in ilgili şirketlerle ilgili haberlerinden alınmıştır)

Üretici	Haberin Tarihi	Haber	Kaynak
Volkswagen	14/03/2023	2023 ile 2027 yılları arasında 180 milyar € (192,6 milyar \$) yatırım yapma planlarını duyurdu ve bu yatırımın üçte ikisinden fazlası "elektrifikasyon ve dijitalleşmeyi" hedefliyor. Alman otomotiv devi bu ayın başında 2022 yılının tamamında bir önceki yıla göre %13 artışla 22,5 milyar € işletme karını açıkladı; batarya ve elektrikli araç (BEA) teslimatları ise %26 arttı.	Int. Kyn. 8
Mercedes Benz	22/02/2022	Mercedes-Benz elektrifikasyon hedefini 5 yıl erteledi ve yatırımcılara içten yanmalı motorlu modellerini geliştirmeye devam edeceğine dair güvence vererek, pille çalışan otomobillere yönelik iştahın beklenenden daha zayıf olduğu belirtildi. 2021'de Mercedes, birçok emsalleri gibi elektrikli araçların geleceği konusunda oldukça olumlu olduğunu belirtip içten yanmalı motoru aşamalı olarak kaldırarak 10 yılın sonuna kadar yalnızca elektrikli araçlar satmasını sağlayacak bir stratejiye 40 milyar € (yaklaşık 43 milyar \$) taahhüt etmişti.	Int. Kyn. 9
Toyota	06/02/2024	ABD pazarı için yeni, üç sıralı bataryalı elektrikli SUV'un montajı da dahil olmak üzere elektrifikasyon çalışmaları için Kentucky tesisine 1,3 milyar \$ yatırım yapacağını duyurdu. Şirket 14 Aralık 2021'de 2030 yılına kadar otomobillerini elektrikli hale getirmek için 8 trilyon yen (70 milyar \$) taahhüt etti; ve bu miktarın yarısının bataryalı elektrikli araç (BEA) serisinin geliştirilmesi için olduğu belirtildi.	Int. Kyn. 10
Ford	04/04/2024	Elektrikli araç talebindeki yavaşlamanın küresel çapta baskı yaratması nedeniyle Kanada'da planlanan üç sıralı elektrikli araçların ve Tennessee'de inşa edilen yeni nesil elektrikli kamyonetin piyasaya sürülmesinin ertelendiğini açıkladı. 2023 yılında EA işinde yaklaşık 4,7 milyar \$ kaybeden ve bu yıl 5 milyar ila 5,5 milyar \$ kaybedeceğini öngören Ford, Şubat ayında yeni nesil elektrikli araçların "yalnızca karlı olabilecekleri zaman" piyasaya sürüleceğini söyledi. Yönetim Kurulu Başkanı Bill Ford, Detroit Otomobil Fuarı'nda yaptığı açıklamada, Ford Motor Co'nun elektrikli araçlara yönelik planlanan yatırımlarını 2022 yılına kadar önemli ölçüde 11 milyar \$ çıkaracağını ve model yelpazesinde 40 hibrit ve tamamen elektrikli araca sahip olacağını söyledi. 16 Ocak 2018 Ford yöneticileri, yatırım rakamının daha önce açıklanan 2020 yılına kadar 4,5 milyar \$ hedefin çok üzerinde olduğunu ve bu yatırımın özel elektrikli araç mimarileri geliştirme maliyetlerini de içerdiğini söylemiş ve Ford'un mühendislik, araştırma ve geliştirme harcamaları, mevcut son yılın tamamı olan 2016 yılı için, 2015'teki 6,7 milyar \$'dan 7,3 milyar \$'a yükseldiğini belirtmiştir.	Int. Kyn. 11
BMW	10/01/2023	BMW Münih'teki ana tesisini 2027'nin sonundan itibaren yalnızca elektrikli araçlar üretecek şekilde dönüştürmek için 650 milyon € (711 milyon \$) yatırım yapmayı planladığını belirtmiştir.	Int. Kyn. 12
Stellantis	12/02/2024	Elektrikli araç portföyünü büyütme için elektrikli tahrik modüllerinin üretim kapasitesini artırmak amacıyla Macaristan'daki Szentgotthard tesisine 103 milyon € (111,02 milyon \$) yatırım yapacağını duyurdu. Bu yatırım, Stellantis'in Fransa'daki Tremery-Metz ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Kokomo, Indiana'dan sonra EDM üretim tesisine yaptığı üçüncü yatırımdır. Ayrıca Stellantis, İtalya'nın Mirafiori Kompleksi'ndeki tesisinde hibrit ve fişli hibrit araçlara yönelik yeni nesil elektrikli çift kavramalı şanzımanların (eDCT'ler) 2024 üretimini artıracığını duyurdu. Hollanda merkezli şirket, genişlemenin kendisini 2030 yılına kadar Avrupa'da bataryalı elektrikli araçlardan %100 satış yönündeki elektrifikasyon hedeflerine yaklaştırmasını bekliyor. Önümüzdeki on yılda elektrifikasyon çalışmalarına 50 milyar \$ yatırım yapacağını ilan etti. Stellantis araçları için içten yanmalı motorlar üreten Szentgotthard fabrikasındaki genişleme, önemli bileşenlerin işlenmesini ve 3'ü 1 arada EDM'lerin son montajını ve test edilmesini içerecektir. Tesiste EDM üretiminin 2026 sonlarında başlaması beklenmektedir.	Int. Kyn.13
Honda	07/012024	Honda Kanada'da yaklaşık 2 trilyon yen (13,83 milyar \$) değerindeki bir projeye muhtemelen kendi bünyesinde pil üretimini de içerebilecek bir elektrikli araç tesisi kurmayı düşünüyor. Proje Honda'nın en büyük yatırımlarından biri olabileceği belirtiliyor.	Int. Kyn. 14

**Tablo 2.** Devamı. (Reuters'in ilgili şirketlerle ilgili haberlerinden alınmıştır)

Üreticisi	Haberin Tarihi	Haber	Kaynak
Nissan	27/03/2024	Japon Nissan Motor, Renault'nun (RENA.PA) yatırımı için elektrikli araç (EA) ünitesi Ampere'ye yeni birim açtı ve aynı zamanda Honda Motor (7267) ile ortaklığını değerlendirdi. Renault'nun başkanı Şubat ayında yaptığı açıklamada, kararın Nissan veya uzun süreli ortağı olan Mitsubishi'nin yatırımlarını geciktirmeyeceğini ve yeni bir pencere açacağını söyledi.	Int. Kyn. 15
Renault	29/03/2024	2026'dan itibaren yeni nesil elektrikli minibusler üretmek için kuzey Fransa'daki Sandouville'de bulunan montaj tesisine 300 milyon € (323,25 milyon \$) yatırım yapmayı planlıyor. Yapılan açıklamada şirketin önümüzdeki dört yıl içinde tesisteki 1.850 personele 550 personel daha ekleyeceği belirtildi. Özellikle paketlerin son kilometre teslimatı için tasarlanan hafif minibus inşa etme projesinde İsveçli Volvo ve Fransız nakliye ve lojistik devi CMA CGM ile ortak girişim olan Renault'nun elektrikli araç birimi Flexis'in bir parçasında yer alacaktır.	Int. Kyn. 16
GM	15/02/2024	Kanadalı madenci Nouveau Monde Graphite, General Motors'un bir birimi ile uzun süreli bir tedarik anlaşması imzalamayı kabul ettiğini belirterek, otomobil üreticisinden 150 milyon \$ özsermaye yatırımı alacağını belirtti. Kanadalı firma, Becancour tesisinin ikinci aşamasından tam üretime ulaştığında 6 yıllık bir başlangıç dönemi için yılda 18.000 ton rafine grafit sağlayacaktır.	Int. Kyn. 17
Hyundai	27/03/2024	Elektrikli araç üretimini ve yeni mobilite işini artırmak ve ayrı olarak 80.000 yeni çalışana işe almak için Güney Kore'de üç yıl içinde 68 trilyon won (51 milyar \$) yatırım yapacağını duyurdu. Yatırımın yarısından fazlasının (35,5 trilyon won) yeni Ar-Ge altyapısı ile elektrikli araçlara yönelik montaj hatlarına tahsis edileceği belirtildi.	Int. Kyn. 18
Mazda	29/03/2024	Mazda Motor, Panasonic ile batarya tedarik anlaşması imzaladıklarını açıkladı.	Int. Kyn. 19
Tesla	05/04/2024 04/04/2024 24/01/2024	Tesla, uzun süredir vaat edilen ucuz otomobili iptal etti. Ancak, küçük araç platformunda otonom robotaksi geliştirmeye devam edeceğini söyledi. Tesla, Çinli elektrikli araç üreticilerinin pazarı 10.000 \$ gibi düşük fiyatlı otomobillerle doldurmasıyla dünya çapında şiddetli bir rekabetle karşı karşıya ve teslimatı daha uzun sürebilecek sürücüsüz robotaksi planı, daha zorlu ve risikli mühendislik çalışmaları gerektiriyor. Tesla'nın bu yılın sonlarında Hindistan'a ihracat yapmak üzere Almanya'daki fabrikasında sağdan direksiyonlu otomobil üretimine başladığını söyledi. Yaklaşık 2 milyar dolarlık bir yatırım gerektirecek yerel bir otomobil üretim tesisi için bu ayın sonlarında Tesla yetkililerinin Hindistan'ı ziyaret etmesi bekleniyor. İki kaynak, Tesla'nın Model 2'yi hurdaya çıkarma kararını çok sayıda çalışanın katıldığı bir toplantıda öğrendiklerini ve içlerinden birinin toplantının Şubat ayının sonlarında gerçekleştiğini söylediğini söyledi. Tesla yetkilileri tarafından, tedarikçilere 2025 ortalarında "Redwood" kod adlı yeni bir kitlesel pazar elektrikli aracının üretimine başlamak istediği belirtildi. Teksas fabrikasında yeni nesil elektrikli araç üretimine başlanması planlanmaktadır. Meksika ve Kuzey Amerika dışında başka bir fabrika inşa edileceği belirtildi.	Int. Kyn. 20 Int. Kyn. 21 Int. Kyn. 22
BYD	29/03/2024	Çinli elektrikli araç üreticisi BYD Vietnam'da EA fabrikası kurma planlarını yavaşlattığını söyledi. Vietnam hükümeti Mayıs ayında, BYD'nin kuzey Vietnam eyaleti Phu Tho'da elektrikli araç üretimi ve montajı için bir fabrika kurmaya karar verdiğini, şirketin halihazırda aynı bölgede Apple için tablet üreten tesise sahip olduğunu bildirdi. BYD ile uzun görüşmelerin ardından Gelex'in Phu Ha sanayi parkında elektrikli araç fabrikası için 100 hektarlık (250 dönüm) arazi ayırdığı belirtildi.	Int. Kyn. 23 Int. Kyn. 24
Chery	04/04/2024	Vietnam ticaret bakanlığı otomobil üreticisi Chery'nin yerel bir şirketle 800 milyon \$ yatırımla bir tesis kurmak üzere ortak girişim anlaşması imzaladığını ve Vietnam'da tesis kuran ilk Çinli elektrikli araç üreticisi olduğunu söyledi. Bakanlık, imza töreninin ardından yaptığı açıklamada, Chery'nin ve Vietnamlı şirket Geleximco tarafından ortaklaşa kurulacak üretim tesisinin Tayland Binh kıyı eyaletinde olacağını bildirdi.	Int. Kyn. 25
Geely	03/04/2024	Çinli otomobil üreticisi Geely'nin birinci sınıf elektrikli araç markası Zeekr, New York'taki ilk halka arzda 500 milyon \$ kadar artırma planlarını yeniden başlattı.	Int. Kyn. 26







Tablo 2'den de görüleceği üzere otomobil sektöründeki firmaların elektrikli araçlarla ilgili kararları oldukça dinamik olarak değişim göstermektedir. Otomotiv sektörüne sadece elektrikli araç üreterek giriş yapmış firmaların yanında fosil yakıtlı araç üreticilerinin de kendi araç filolarında olması için çaba içerisinde oldukları görülmektedir. Bu çaba fosil yakıtlı araç üreticileri için yeni bir teknolojik alana giriş anlamında olduğundan, bazıları batarya üretici firmalardan doğrudan batarya tedariklerini yaparken, son yıllarda batarya ve batarya paketi üretimi konusunda da sadece ürün tedarik zihniyetinden çıkıp, tasarımdan üretime iş ortaklığı yapma konusunda girişimlerde buldukları, hatta bazı üreticilerin kendi bünyelerinde üretim yapmak üzere çalıştıkları da bilinmektedir. Otomotiv sektörü, yeşil mutabakat ve döngüsel

Bölüm 12. Sektörel Bakış: Elektrikli Araçlar








ekonomi kavramının getirdiği regülasyonlar ile tedarik zincirinin uçtan uca yönetimi kavramına, kritik mineral, madenler ve geri dönüşüm teknolojilerine sahip olma stratejilerini de eklemiştir.

Tablo 3. Otomobil Sektörünün Elektrikli Araç Üretimi Üzerine Vizyonları ve Elektrikli araç modelleri.

Üretici	Filolarındaki Hibrit ve Tam Elektrikli Araçlar	Kaynak
BMW Grup	(BMW, Mini, Rolls Royce)	
BMW	 <p>BEA: i3, i3S, iX serisi, i5 serisi, i4 serisi, i7 serisi, iX1, iX2, iX3 FHEA: 2 serisi, 3 serisi, 5 serisi, 7 serisi, X1 plug-in, X2 plug-in, X3 plug-in, X5 plug-in, XM plug-in hybrid</p>	Int. Kyn. 27
	<p>2022 yılında elektrikli araç toplam araç üretimi içindeki oranı %18,1 olmuş, 2025 yılında bu değerin %30, 2030'da >% 50 üzerinde olması planlanmıştır.</p>	
Rolls Royce	 <p>Rolls Royce Spectre</p> <p>BEA: Spectre</p>	Int. Kyn. 28
	<p>Rolls-Royce bugüne kadar elektrifikasyon stratejisini üç basit ifadeyle açıkladı:“Marka bu on yılda (2020 - 2030) tamamen elektrikli bir otomobil tanıtacak. Bu araba herhangi bir türde hibrit değil, saf bir BEV olacak. Yalnızca zamanı geldiğinde piyasaya sürülecek ve her ögesi Rolls-Royce'un teknik, estetik ve performans standartlarını karşılayacak.”</p>	
General Motors Group	(Chevrolet, Cadillac, Buick, GMC, Hummer, Holden, Oldsmobile, Pontiac, Baojun, Wuling)	
GM Chevrolet	 <p>BEA: Equinox EV, Blazer EV, 2023 Bolt EUV, 2023 Bolt EV, Silverado</p>	Int. Kyn. 29
	<p>“GM tamamen elektrikli bir geleceğe doğru ilerliyor. Herkesi bir EA'ca oturtmak için gereken her şeyin peşinden agresif bir şekilde gidiyoruz çünkü sıfır emisyonlu bir gelecek inşa etme yolunda anlamlı bir etki yaratmak için yollarda milyonlarca EA'ya ihtiyacımız var. GM, her stil ve fiyat noktasına uygun elektrikli araçlar tasarlayacak, tasarlayacak ve üretecek konumdadır ve piller, yazılım, araç entegrasyonu, üretim ve müşteri deneyimi alanlarında hızla rekabet avantajı yaratıyoruz.”</p>	
GM Cadillac	 <p>BEA: Celestiq, Lyriq, Escalade IQ</p>	Int. Kyn. 30
	<p>“Cadillac, önümüzdeki yıllarda daha fazla elektrikli araç sunmayı ve müşterilerinin çeşitli tercihlerini karşılamak için ürün gamını çeşitlendirmeyi planlıyor. Cadillac EV ailesine sedanların, SUV'ların ve hatta amiral gemisi elektrikli spor otomobillerin katılması bekleniyor.</p> <p>Cadillac, batarya teknolojisi ve yenilenebilir enerji firmalarıyla stratejik ortaklıklar araştırıyor ve sürdürülebilir bir otomotiv geleceğine olan bağlılıklarını daha da vurguluyor.”</p>	
GM Buick	 <p>BEA: Wildcat EV, Electra E5</p>	Int. Kyn. 31 Int. Kyn. 32
	<p>Kuzey Amerika'da, Buick'in ilk elektrikli aracının 2024'te satışa sunulması bekleniyor; on yılın sonuna kadar ABD ve Kanada'da tamamen elektrikli bir serinin planlanması planlanıyor. Tüm Buick EA'lar Electra adını taşıyacağından, elektrikle geçiş, aileye yeniden bir isim kazandıracak.</p>	
GM GMC	 <p>BEA: Hummer Truck EV1 x, EV2x, EV3x, EV 3x omega edition, Sierra EV denali Edition, (Gelecek araç) Acadia</p>	Int. Kyn. 33

**Tablo 3.** Devamı. (Reuters'in ilgili şirketlerle ilgili haberlerinden alınmıştır)

Üretici	Filolarındaki Hibrit ve Tam Elektrikli Araçlar	Kaynak
FORD	 FORD Kuga pHEV Mustang Mach-E FORD F150 Lightning FORD Explorer FORD E-Transit BEA: Mustang Mach-E, F-150 Lightning, E-transit FHEA: Kuga, Escape, Explorer	Int. Kyn. 34
	<p>Şirket, en ikonik ürünlerini (Mustang, F-150 ve Transit) elektrikli hale getirerek işe başlamış ve bu, Ford'un 2022'de ABD'nin 2 numaralı EA markasına hızla yükselmiştir. Pek çok modelde de elektrifikasyona geçiş projeleri devam etmektedir.</p>	
Honda	 Honda Prologue Honda e Honda e:Ny1 BEA: Honda e, e:Ny1, (Gelecek araç) Prologue HEA: Accord, CR-V-e :HEV, ZR-V e: HEV, HR-V e: HEV, Jazz e: HEV	Int. Kyn. 35
	<p>Motosiklet, otomobil ve güç ürünlerinin tüm alanlarında elektrifikasyonu güçlü bir şekilde destekliyoruz. 2030 yılına kadar hedefimiz, yılda 2 milyondan fazla ünite üreten küresel bir BEA üretim sistemi kurmaktır. 2040 yılına kadar küresel satışlarımızın %100'ünün elektrikli ve yakıt hücreli araçlardan oluştuğu bir satış oranı hedefliyoruz.</p>	
Hyundai Motors	(Hyundai, Genesis ve KIA)	
Hyundai	 Hyundai Ioniq 5 Hyundai Ioniq 6 Hyundai Kona BEA: Ioniq 5, Ioniq 6, Kona Electric FHEA: Ioniq Plug in Hybrid, Santa Fe, Tucson	Int. Kyn. 36
	<p>Hyundai Motor Way, Hyundai'nin 2030 yılına kadar küresel pazara iki milyon elektrikli araç sunmayı amaçlayan temel elektrifikasyon stratejisini oluşturuyor. Bu kapsamlı strateji, Entegre Modüler Mimarinin (IMA) benimsenmesini, elektrikli araç üretim yeteneklerinin güçlendirilmesini, pil yeterliliğinin yükseltilmesini ve tüm sektörleri kapsayan bir değer zinciri.</p>	
KIA	 KIA EV6 KIA EV5 KIA EV9 GT-Line KIA Niro EV BEA: EV5, EV6, Niro, EV9 GT FHEA: Sportage plug-in, Ceed plug-in, Niro, Sorento	Int. Kyn. 37
	<p>Kia, her yıl düzenlenecek 'EA Günü'nde küresel EA stratejisini sunuyor.</p> <p>Kia, entegre uygulama, çevrimdışı merkezler ve üretken yapay zeka teknolojisiyle müşteri deneyimini geliştirmeyi amaç edinerek bugün ortaya çıkan ürün ve girişimlerle 2026 yılına kadar yıllık 1 milyon elektrikli araç satış hedefine ulaşmak ve bunu 2030 yılına kadar yılda 1,6 milyon adede çıkarmayı hedefliyor.</p> <p>Kia, EV6 ve EV9 gibi mevcut modellerin yanı sıra popüler B ve C segmentleri için özel olarak tasarlanmış gelecekteki teklifleri de içeren, fiyatı 30.000 ila 80.000 ABD Doları arasında değişen geniş kapsamlı bir EA serisi geliştirme planını duyurdu. Marka, elektrikli araçların yaygın şekilde benimsenmesini hızlandırmak için fiyatları 35.000 ila 50.000 dolar arasında değişen EV5, EV4 ve EV3 gibi daha küçük EV'leri piyasaya sürmeyi hedefliyor.</p> <p>Elektrikli araçların benimsenme oranlarının daha yavaş olduğu gelişmekte olan pazarlarda, ilk lansman EV6 ve EV9'a odaklanacak ve daha sonra EV5, EV4 ve EV3 gibi stratejik modellerin piyasaya sürülmesi planlanacak. Bu yaklaşım, ürün sunumlarını çeşitlendirmeyi ve çeşitli müşteri tercihlerine hitap etmeyi amaçlamaktadır.</p> <p>Markanın küresel EA üretim tesislerini 2025 yılına kadar toplam sekize çıkarma hedefiyle EA üretimi ve pil tedariki için güvenilir bir sistem kurma çabaları sürüyor. Bu tesisler, Kore'nin hizmet vereceği araştırma, geliştirme, üretim ve tedariki kapsayacak. merkezi merkez olarak. Avrupa'da küçük ve orta ölçekli elektrikli araçların üretimine odaklanılacak, Çin'de ise orta ve büyük boyutlu elektrikli araçlara ağırlık verilecek. Gelişmekte olan pazarlara özel olarak stratejik olarak tasarlanmış EA modelleri Hindistan'da üretilecek. Kia ayrıca Enflasyon Azaltma Yasası'na (IRA) yanıt olarak Kuzey Amerika'da çeşitli EA modelleri sunmayı planlıyor. Ayrıca marka, küresel EA üretim ağıyla senkronize, istikrarlı bir küresel pil tedarik sistemi sağlamak için aktif olarak pil ortak girişimleri kuruyor.</p>	
Jaguar Land Rover	 Jaguar I-pace Jaguar E-pace Jaguar F-pace Jaguar XE BEA: Jaguar I-pace FHEA: Jaguar F-pace, E-pace ve XE	Int. Kyn. 38
	<p>JLR, modern lüks elektrikli ilk geleceği hızlanırken önümüzdeki beş yıl içinde 15 milyar sterlin yatırım yapacak</p>	

Tablo 3. Devamı. (Reuters'in ilgili şirketlerle ilgili haberlerinden alınmıştır)

Üretici	Filolarındaki Hibrit ve Tam Elektrikli Araçlar	Kaynak
Mazda	<p>Mazda CX-90 Mazda CX-60 Mazda MX-30</p>	<p>BEA: MX-30 FHEA: CX-60, CX-90</p> <p>Int. Kyn. 39</p>
Mercedes Benz	<p>Mercedes EQE Mercedes EQE SUV Mercedes EQS Mercedes EQS SUV Mercedes EQA Mercedes EQB SUV Mercedes EQC</p>	<p>BEA: EQA, EQB, EQC, EQE, EQE SUV, EQS, EQS SUV FHEA: GLC, GLE, GLA, AMG GT 4 kapı Coupe, E serisi, CLA, S serisi, B serisi, SL serisi</p> <p>Int. Kyn. 40</p>
Toyota	<p>Toyota bZ4X C-HR Hybrid Prius pHEV Toyota RAV4 pHEV</p>	<p>BEA: bz4x FHEA: Prius, RAV4 Prime HEA: Land Cruiser, Sequoia, Highlander, Corolla, Camry, RAV4, Venza, Tundra, Sienna, Crown</p> <p>Int. Kyn. 41</p>
TESLA	<p>TESLA Model 3 TESLA Model S TESLA Model X TESLA Model Y</p>	<p>BEA: Model S, Model X, Model 3, Model Y, Cyber Truck, Semi</p> <p>Int. Kyn. 42</p>
BYD	<p>Dolphin Yuan Plus / Atto 3 Tang Seal Han</p>	<p>BEA: Song, Qin Plus, Dolphin, Seal, Seagull, Han, Atto3, Tang FHEA: Han, Song, Qin Plus, Tang</p> <p>Int. Kyn. 43</p>
Chery	<p>Little Ant Chery EQ1 Chery Omoda 5</p>	<p>BEA: Little Ant, Tiggo 8 Pro, Omoda E5 EQ1</p> <p>Int. Kyn. 44</p>

Tablo 3. Devamı. (Reuters'in ilgili şirketlerle ilgili haberlerinden alınmıştır)

Üretici	Filolarındaki Hibrit ve Tam Elektrikli Araçlar	Kaynak
R-N-M Alliance	(Renault, Mitsubishi, Nissan, Dacia, Infiniti, Alpine, Venucia)	
Nissan	 Nissan Ariya Nissan Leaf BEA: Leaf, Ariya	Int. Kyn. 45
Renault	 Captur E-Tech Megane E-Tech Renault ZOE Twingo ZE BEA: ZOE, Megane E-Tech, Twingo ZE, Kangoo ZE FHEA: Captur E-Tech, Clio E-Tech	Int. Kyn. 46
Mitsubishi	 Mitsubishi Outlander Mitsubishi eK-X EV Mitsubishi Minicab EV Mitsubishi Eclipse Cross FHEA: Eclipse Cross, Outlander HEA: eK X EV, Minicab EV	Int. Kyn. 47

Elektrikli araçlar yalnızca aktarma organlarının verimliliğini artırmakla kalmıyor ve şarj sırasında yenilenebilir enerjiden faydalanabiliyor; aynı zamanda Nissan, bunlarla birlikte pil üretimi sırasında madenlerden yeni çıkarılan kaynakları azaltarak ve pilin yeniden kullanımını teşvik ederek yaşam döngüsü CO₂'sini önemli ölçüde azaltmayı hedefliyor. Ayrıca elektrikli araçların enerji depolama cihazı olarak kullanılmasıyla toplumun yenilenebilir enerji kullanımının desteklenmesine de katkı sağlanacak.

Satış filusunda %65'ten fazla elektrikli ve elektrikli araçların yer alması ve 2030 yılında Renault marka karmasının %90'a kadar elektrikli araçlar içermesi 2025 yılında Avrupa pazarındaki en yeşil karışım filosu olması hedeflenmektedir. Renault ElectricCity: Grubun Normandiya'daki e-güç aktarma organı MegaFactory ile birlikte Kuzey Fransa'da kompakt, verimli, yüksek teknoloji bir elektrik ekosistem olacağı bildirilmektedir.

2024'ten itibaren en son teknolojiye sahip, uygun maliyetli, düşük karbonlu pillerin üretimini desteklemek amacıyla Douai'de bir gigafabrika inşa etmek için Envision AESC ile stratejik bir ortaklık. 2022 yılına kadar yüksek performanslı, yerel kaynaklı ve sürdürülebilir bir bataryayı ortaklaşa geliştirmek amacıyla Fransız start-up Verkor ile ortak bir proje.

Gelecekteki BEA'ların %100'ünü kapsayan standartlaştırılmış bir hücre ayak izi, 2030 yılına kadar paket düzeyinde maliyetleri %60 oranında azaltmak amacıyla tüm segmentlerde piyasaya sürüldü.

Maliyetlerde %30 ve enerji israfında %45 tasarruf sağlayan son derece kompakt bir e-güç aktarma organı, 20 km'ye kadar ekstra EA menzili sağlar.

Elektrikli araç değer zincirindeki 10 yıllık deneyiminden yararlanan Renault Grubu'nun batarya stratejisi, İttifak içinde rekabetçiliği ortaya çıkarmak için cesur standartlaştırma seçimlerine yol açtı. NMC bazlı kimya (Nikel, Manganez ve Kobalt) ve benzersiz hücre ayak izi ile Grup, tüm segmentlerde gelecekteki BEA lansmanlarının %100'ünü kapsayacak. 2030 yılına kadar ittifak çapında bir milyona kadar elektrikli araçla tüm segmentleri kapsayacak. Bu kimya seçimi, diğer kimya çözümleriyle karşılaştırıldığında %20'ye kadar daha fazla menzil ve çok daha iyi bir geri dönüşüm performansı ile kilometre başına oldukça rekabetçi bir maliyet oranı sunuyor.

Hücre düzeyinde Grup şu stratejileri yürütecektir:

- Renault Grubu, EA stratejisinin bir parçası olarak, 2024 yılında Douai'de 9 GW sa kapasiteli bir giga fabrika geliştirecek ve 2030 yılına kadar 24 GW sa'ye ulaşmayı hedefleyen Envision AESC ile ortaklık kuruyor. Renault ElectricCity'ye yakın olan Renault Grubu'nun ortağı, en son teknolojiyi üretecektir. Geleceğin Renault 5'i de dahil olmak üzere elektrikli modeller için uygun maliyetli, düşük karbonlu ve güvenli piller.







- Renault Grubu ayrıca Fransız start-up Verkor'un %20'nin üzerinde hissesine sahip olmak için bir Mutabakat Zaptı imzaladı. İki ortak, Renault serisinin C ve daha yüksek segmentlerinin yanı sıra Alpine modellerine de uygun, yüksek performanslı bir aküyü birlikte geliştirmeyi planlıyor. Ortaklık, 2022'den itibaren pil hücreleri için Fransa'da bir pilot üretim hattının geliştirilmesini ve modül prototiplemeyi içeriyor. 2026'dan itibaren ikinci bir adımda Verkor, Fransa'da 10 adet başlangıç kapasitesiyle yüksek performanslı piller için ilk gigafabrikayı kurmayı hedefliyor. Renault Grubu için GWh, potansiyel olarak 2030 yılına kadar 20 GWh'ye yükselecek.

Grup, 10 yıldan daha kısa bir süre içinde, Tam Katı Hal Pillerin gelişine hazırlanırken 2025'te 100 \$ /kW sa'nin ve hatta 80 \$/kW sa'nin altında bir hedefle, paket düzeyinde maliyetlerini adım adım %60 oranında düşürmeyi planlıyor.







Önümüzdeki beş yıl içinde (dokuz xEV dahil) 16 model piyasaya sürülecek. Hedefler ise;

- Ar-Ge ve CAPEX harcamaları açısından son altı yıla kıyasla 2028'e kadar olan altı yılda yatırımı %30 artırmak.
- 15 GW. sa pil tedariki sağlamak için 2030 yılına kadar toplam 210 milyar yen yatırım yapmak.
- Ortaklıklar (alliance) ile bağlantının daha da güçlendirmek (karşılıklı olarak tamamlayıcı OEM ürünleri vb.)
- Bir otomobil üreticisine özgü varlıkları (enerji yönetimi, pilin yeniden kullanımı, veri satışları vb.) kullanarak yeni iş zorluklarının üstesinden gelmek.





Tablo 3. Devamı. (Reuters'in ilgili şirketlerle ilgili haberlerinden alınmıştır)

Üretici	Filolarındaki Hibrit ve Tam Elektrikli Araçlar	Kaynak
Stellantis Grup	<p>(Abarth, Alfa Romeo, Chrysler, Citroën, Dodge, DS automobiles, Fiat, Jeep, Lancia, Maserati, Opel, Peugeot, Ram Trucks, Vauxhall)</p> <p>Küresel otomobil endüstrisi elektrifikasyona doğru ilerliyor ve Stellantis, ileri teknolojiyi uygun fiyatlarla sunan ikonik markalarımız için heyecan verici, sınıfında lider araçlar sunmak amacıyla kapsamlı bir elektrifikasyon stratejisini tam uygulama modundadır.</p> <p>Bu on yılın sonuna kadar Avrupa'daki satışların %100'ünün ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki satışların %50'sinin bataryalı elektrikli araçlar (BEA) olmasını hedefliyoruz. Ayrıca 75'ten fazla elektrikli araç modeli sunmayı ve 2030 yılına kadar dünya çapında yıllık 5 milyon adet BEA satışına ulaşmayı planlıyoruz.</p>	Int. Kyn. 48
Alfa Romeo	 <p>Tonale</p> <p>FHEA: Tonale</p>	Int. Kyn. 49
Chrysler	 <p>Airflow Pacifica</p> <p>FHEA: Pacifica BEA: (Gelecek araç) Airflow</p> <p>Chrysler mühendisleri ve tasarımcıları radikal fikirler üzerine çalışıyorlar: 2028'e kadar inovatif, sorunsuz elektrikli araç ürün serisi üretme hedeflerindedir.</p>	Int. Kyn. 50
Opel	 <p>Grandland pHEV Zafira-e Life Astra-e Corsa-e Mokka-e</p> <p>BEA: Corsa-e, Mokka-e, Combo-e life, Zafira-e life FHEA: Grandland, Astra, Astra sports BEA: (LCV) Combo-e, Vivaro-e, Movano-e</p> <p>Opel teklifinde hâlihazırda on iki elektrikli versiyon yer alıyor. Tüm hafif ticari araç serisi için 2024 yılına kadar her modelin elektrikli versiyonu çıkarılması, 2028 yılına kadar Avrupa'da tamamen elektrikli olması planlanıyor, Opel Crossland ve Insignia'nın halefleri de pille çalışıyorlar. On yılın ortasında tamamen elektrikli tahrike sahip yeni Opel Manta ve 2025'ten itibaren Kaiserslautern'deki ACC dev fabrikasında yüksek performanslı pillerin üretimi gerçekleştirilecektir. Opel, Ampera ve Ampera-e ile Avrupa'da elektrikli mobiliteye öncülük etmektedir.</p>	Int. Kyn. 51
Citroën	 <p>e-Berlingo e-C4X e-C4 e-C3 Aircross</p> <p>BEA: Ami, e-C3, e-C4, e-C4X, e-Berlingo, e-Spacetourer FHEA: C5 Aircross</p> <p>Citroën elektrikli araç çağına giriyor ve iz bırakmayı hedefliyor. Citroën, 1919'dan beri sürüşü herkes için erişilebilir hale getiriyor ve 100 yılı aşkın bir süre sonra, mümkün olduğunca çok insanın erişebileceği çok yönlü bir ürün yelpazesiyile elektrikli sürüş çağına girdi. Hareketlilik ihtiyaçlarınız değişiyor ve sorumlu seyahat sizin için giderek daha önemli hale geliyor. Citroën şimdi tamamı SİZDEN ve günlük sürüş alışkanlıklarınızdan ilham alan şarj edilebilir hibrit araçlar ve %100 elektrikli modeller yaratıyor.</p>	Int. Kyn. 52
Dodge	 <p>Hornet R/T</p> <p>FHEA: Hornet R/T</p>	
DS Automobiles	 <p>DS4 e-Tense DS7 e-Tense DS9 e-Tense</p> <p>BEA: DS3 Crossback e-Tense FHEA: DS4, DS7, DS9</p> <p>Marka, otomotiv endüstrisindeki derin değişiklikleri öngörmek amacıyla, Saldırı stratejisi benimsiyor ve 2024 yılına kadar yüzde 100 elektrikli olmayı hedefliyor.</p>	Int. Kyn. 53






**Tablo 3.** Devamı. (Reuters'in ilgili şirketlerle ilgili haberlerinden alınmıştır)

Üretici	Filolarındaki Hibrit ve Tam Elektrikli Araçlar	Kaynak
Fiat	 FIAT 600 FIAT 500e Panda hybrid	BEA: 600, 500e FHEA: 500x, Panda, Tipo, 500 Collezione Int. Kyn. 54
	<p>Herkes için sürdürülebilir mobiliteye yönelik yolculuğumuz, 2023'ten itibaren her yıl yeni bir aracı piyasaya sürme hedefiyle devam ediyor. 2027'den itibaren tamamen elektrikli bir seriye ulaşmak için her modelde bir elektrik motoru bulunacak.</p>	
Jeep	 Wrangler 4xe pHEV Renegade e-hybrid Compass e-hybrid Avenger BEV	BEA: Avenger BEV FHEA: Compass e-hybrid, Grand Cherokee 4xe, Wrangler 4xe HEA: Compass S, Renegade e- hybrid Int. Kyn. 55
	<p>Jeep® markası küresel Sıfır Emisyon SUV lideri olma yolundaki tamamen elektrikli ürün atağının bir sonraki aşamasını ortaya koyuyor. Marka, 2025 yılına kadar Kuzey Amerika ve Avrupa'da dört adet tamamen elektrikli SUV tanıtacak, elektrikli modeller, Wagoneer 4xe araçları da dahil olmak üzere tüm ABD portföyünde sunulacak, 2030 yılına kadar ABD'deki satışların %50'si ve Avrupa'daki satışların %100'ü elektrikli araçlar olacak, marka, tamamen yeni, tamamen elektrikli iki küresel SUV'un tanıtımını yapıyor.</p>	
Lancia	 Ypsilon	BEA: Ypsilon Int. Kyn. 56
Maserati	 Grecale Folgore	BEA: Grecale Folgore, GrandTurismo Folgore HEA: Levante hybrid Int. Kyn. 57
	<p>Maserati CEO'su Davide Grasso: "Modena kalbimizden güç alarak, elektrifikasyonda değişime öncülük etmek için tam gaz gidiyoruz; iki ikonik modelimiz halihazırda %100 elektrikli versiyonlarıyla satın alınabiliyor ve bir diğeri de bu yıl yolda. Tercih edilen müşterilerimize şimdiye kadarki en güçlü Maserati'yi sunarak sürüş keyfinin sınırlarını yeni bir döneme taşıyacağız.</p>	
Peugeot	 e-208 e-2008 e-3008 e-5008	BEA: e-208, e-2008, e-3008, e-5008 FHEA: 308, 308SW, 3008, 408, 508, 508SW Int. Kyn. 58
	<p>PEUGEOT elektrifikasyon için cesur hedefler belirleme yolunda ilerliyor: 2023: PEUGEOT serisindeki her model ELEKTRİKLİ olacak. 2025: Peugeot tamamı %100 elektrikli filoya sahip olacak. 2030: Avrupa'da satılan Peugeot'ların %100'ü %100 elektrikli olacak. Peugeot E-Lion Projesini duyuruyor.</p>	
Ram Trucks	 RAM 1500 REV RAM Promaster	BEA: RAM 100 REV, Ram 1500 Ram Charger, Ram Promaster EV Int. Kyn. 59

Tablo 3. Devamı. (Reuters'in ilgili şirketlerle ilgili haberlerinden alınmıştır)

Üretici	Fitolarındaki Hibrit ve Tam Elektrikli Araçlar	Kaynak
Volkswagen Grup	(Audi, Bentley, Lamborghini, Porsche, Bugatti, Skoda, SEAT, Cupra, Ducati, Scania, MAN, Volkswagen)	
Audi	 <p>BEA: e-tron GT quattro, RS e-tron GT, Q4 e-tron, Q4 Sportback e-tron, Q6 e-tron, Q8 e-tron, Q8 Sportback e-tron FHEA: A3, A6, A7, A8, Q3, Q5, Q7, Q8</p>	Int. Kyn. 60
Audi	<p>Plan elektrikli araç filosunu sürekli olarak genişletmektedir: 2026'dan itibaren Audi pazara yalnızca tamamen elektrikli modelleri sunacaktır. Audi bu nedenle 2027 yılına kadar tüm ana segmentlerde en az bir elektrikli araç sunmayı planlıyor. Elektrifikasyona yönelik yol haritası aynı zamanda içten yanmalı motorlu araçların üretiminin 2033 yılına kadar kademeli olarak durdurulmasını da içeriyor.</p> <p>Bu net strateji, Audi'nin ürün ve hizmetlerin yanı sıra üretim açısından da şirketin gücünü yoğunlaştırmasına olanak tanıdı. Audi, kurumsal stratejisinin bir parçası olarak tüm üretim tesislerini adım adım elektrikli otomobil üretmeye hazırlıyor. Şirket aynı zamanda yatırım planlamasında da açık bir şekilde elektrikli mobiliteye odaklanıyor: Yaklaşık 28 milyar Euro tutarındaki Audi, 2023'ten 2027'ye kadar olan dönem için ön harcamalarının üçte ikisini gelecekteki elektrifikasyon ve dijitalleşme alanlarına yatıracak.</p> <p>Çin'in Changchun metropolünde tamamen elektrikli Audi modelleri için son teknolojiye sahip bir fabrikayla Audi, Çin pazarında tamamen elektrikli bir geleceğin temellerini atıyor. Yıllık 150.000 araçtan fazla kapasiteye sahip olan üretim tesisi, 2024 yılı sonundan itibaren Çin'deki Audi ürün portföyünün elektrifikasyonuna büyük katkı sağlayacak.</p>	Int. Kyn. 60
Bentley	 <p>FHEA: Bentayga, Flying Spur</p>	Int. Kyn. 61
Bentley	<p>"2025'ten itibaren her yıl bir tane olmak üzere beş adet tamamen elektrikli Bentley aracının piyasaya sürülmesini öngören 'Beşte Beş' planının duyurulması ile strateji o zamandan beri hızlandı. 2026 yılına gelindiğinde elektrifikasyonu benimsemiş olacağız ve 2030 yılına kadar yalnızca şarj edilebilir hibrit araçlar ve akülü elektrikli araçlar üreteceğiz."</p>	Int. Kyn. 61
Volkswagen	 <p>BEA: e-Golf, e-up!, ID.3 pro, ID.4, ID.5, ID.7, ID.Buzz FHEA: Golf, Passat, Tiguan, Tourage, Transporter</p>	Int. Kyn. 62
Volkswagen	<p>Volkswagen, en geniş elektrikli model yelpazesini sunuyor: Hedef fiyatı 25.000 Euro'nun altında olan giriş seviyesi elektrikli otomobilden yeni ID.7 sedana kadar marka, her segmente uygun bir araca sahip olacak. Şirket halihazırda 2026 yılına kadar on yeni elektrikli model piyasaya sürüyor.</p> <p>2030 gibi erken bir tarihte Volkswagen'in Avrupa'daki satışlarının en az yüzde 70'inin tamamen elektrikli araçlardan oluşması planlanıyor. Şirket, ABD ve Çin'de aynı dönemde yüzde 50'nin üzerinde elektrik payına ulaşma hedefini belirtti. Wolfsburg'daki ana tesis önümüzdeki yıllarda elektrikli mobilité için yüksek verimliliğe sahip bir tesis dönüştürülecek. Şirket, bu dönüşümün bir parçası olarak ilk etapta yaklaşık 460 milyon euro yatırım yapıyor.</p>	Int. Kyn. 62
Porsche	 <p>BEA: Taycan, Taycan 4S, Macan FHEA: Cayenne</p>	Int. Kyn. 63
Porsche	<p>Porsche, sürdürülebilir mobilitenin öncüsü olarak görülüyor. Ve şimdi, elektromobilité çağına girerken, spor otomobil markası bir üst vitese geçiyor. Şirket, 2025 yılında yeni otomobillerinin yarısından fazlasını, tamamen elektrikli veya plug-in hibrit olarak elektrikli güç aktarma organlarıyla teslim etmeyi hedefliyor. 2030 hedefi ise yeni teslimatların yüzde 80'inden fazlasının BEA modelleri olması.</p> <p>Porsche ürün yelpazesinin ilerici elektrifikasyonuna, pil hücresi teknolojisi alanındaki büyük çalışmalar da eşlik ediyor. Şirket, Cellforce ortak girişimiyle yeni yüksek performanslı hücrelerin geliştirilmesine yatırım yapıyor. Porsche Werkzeugbau, son teknoloji ürünü, güçlü batarya modüllerinin verimli üretimini ilteriye taşıyor. Aynı zamanda Porsche, şarj altyapısını genişletme konusunda da kararlıdır; örneğin, yalnızca Porsche müşterileri için Avrupa'da kendi markalı hızlı şarj istasyonlarından oluşan bir ağ kurmak gibi.</p>	Int. Kyn. 63

**Tablo 3.** Devamı. (Reuters'in ilgili şirketlerle ilgili haberlerinden alınmıştır)

Üretici	Filolarındaki Hibrit ve Tam Elektrikli Araçlar	Kaynak
Škoda	 Enyaq RS Enyaq Coupe Enyaq iV Citigo-e iV	BEA: Enyaq iV, Enyaq Coupe, Enyaq RS iV, Citigo-e iV FHEA: Octavia, Superb
	ŠKODA CEO'su şirketin iddialı planını şöyle özetliyor: "2030 yılına kadar Avrupa'nın en çok satan beş markasından biri olmak istiyoruz." Bu, yeni ŠKODA FABIA gibi uygun fiyatlı modeller sunulurken elektrikli otomobil yelpazesinin genişletilmesiyle başarılanacak. Schäfer, "2030 yılına kadar portföyümüze en az üç tamamen elektrikli model daha ekleyeceğiz" dedi.	Int. Kyn. 64
Seat ve Cupra	 Cupra Formentor Cupra Tavascan VZ Cupra Born EV	BEA: Cupra Formentor, Tavascan VZ, Born EV FHEA: Seat Leon, Tarraco
	SEAT S.A.'nın ana fabrikası 2025 yılından itibaren tamamen elektrikli araçlar üretmeye başlayacak. Martorell, Grubun bu elektrikli otomobiller için üretim merkezlerinden biri olacak ve İspanya'daki elektrikli araç değer zincirinin önemli bir parçası olacak. SEAT S.A. ayrıca genel merkezi Martorell'de bir batarya sistemi montaj tesisi açacak. 300 milyon € ek bir yatırımla tesis inşa edilecek ve tesis aynı zamanda PowerCo'nun Sagunto, Valensiya'daki dev fabrikada üreteceği hücrelerin montajında da kullanılacak. Şirketin İspanya'nın elektrifikasyonuna ve elektrikli mobilite alanında önde gelen bir Avrupa merkezine dönüşmesine yönelik bir adım, 2021 yılında öncü bir batarya araştırma ve geliştirme merkezi olan Test Center Energy'nin (TCE) açılmasıyla atıldı. TCE, akü ve şarj sistemlerinin performansını doğrulamak ve garanti etmek için yılda 6.000'e kadar farklı test gerçekleştirerek elektrikli ve şarj edilebilir hibrit otomobiller için enerji sistemlerini test ediyor ve geliştiriyor. Toplamda, 350 hanenin tüm elektrikli cihazları aynı anda açması veya 100.000'den fazla cep telefonunun aynı anda şarj etmesi için gereken güce eşdeğer olan 1,3 megavatlık test kapasitesine sahip. "Hızlı İleri projesinin bir parçası olarak PowerCo, 2023 yılında Sagunto'da (Valencia) pil hücreleri için bir dev fabrika inşa etmeye başladı." Yıllık üretim kapasitesi başlangıçta 40 GW sa olup gelecekte 60 GW sa'ye çıkma potansiyeli bulunmaktadır. Hücre fabrikası Valencia'nın hemen yakınındaki Sagunto'da yaklaşık 130 hektarlık bir alan üzerine inşa ediliyor. PowerCo fabrikasına paralel inşa edilmesi planlanan tedarikçi parkı ile birlikte alan 200 hektara ulaşılıyor. Gigafabrika, diğerlerinin yanı sıra Martorell ve Pamplona'daki araç fabrikalarına birleşik hücreler tedarik edecek.	Int. Kyn. 65
Geely Grup	(Geely, Volvo Cars, Zeekr, Lotus, Smart, Lynk and Co, Polestar, Proton, LEVC, Farizon)	
Geely	 Galaxy L7 Galaxy L6 Galaxy E8 Geometry C Geometry E	BEA: Geometry C, E, Galaxy L6, L7, E8
	Int. Kyn. 66	
Volvo Cars	 Volvo XC90 Volvo XC60 Volvo XC40 Volvo EX30 Volvo EX90	BEA: EX90, EX30, C40, XC40 FHEA: XC90, XC 60, S/V60, S/V90
	Int. Kyn. 67	
TOGG	 T10X	BEA: T10X
Int. Kyn. 68	Ülkenin ilk tamamen yerli otomobilini inşa eden TOGG konsorsiyumu, Çinli şirketin pil hücrelerinin TOGG ürünleri yelpazesinde kullanılması için Farasis ile ortaklık anlaşması imzaladığını söyledi. Türkiye, konsorsiyumun ilk otomobil modelini geçen yılın sonunda tanıtmıştı ve 13 yıl içinde 22 milyar liraya (3,7 milyar dolar) mal olması beklenen projede, sonunda yılda 175.000 adet elektrikli araç üretmeyi hedefliyor.	



Tablo 3'te otomotiv sektöründe etkili olan şirketlerin elektrikli araç pazarında almak istedikleri pozisyona göre vizyonları ve hali hazırda pazarda var olan elektrikli araç modelleri özetlenmiştir. Tablo 3'ten görüleceği üzere artık pazarda her segmentte elektrikli araç bulmak mümkündür. Bu araç modellerinin sürekliliği otomotiv üreticileri için oldukça önemlidir. Hali hazırda otomotiv üreticileri için pazara elektrikli araç sunabilme probleminin dışında müşteri ile doğrudan ilişkide öngörülen en kritik yönetim alanları;

- Araç garanti ve sigorta,
- Batarya şarj istasyonlarına erişim,
- Batarya sağlığı ve performans sürekliliği,
- Araç ve batarya bakım-onarım hizmetlerinin sürekliliği,
- Batarya değişim ve geri dönüşümü,
- İkinci el pazarındaki garanti ve sürekliliğinin yönetimi olarak sıralanabilir.

Firmalar bu problemlere değişik çözüm önerileri sunmaktadırlar. Ancak bu çözümlerin kalitesi ve sürekliliği müşteri tarafından henüz yeterince tecrübe edilmemiştir. Her ülke kültürünün farklı olduğu düşünüldüğünde otomobil firmalarının müşteri beklentilerine yönelik çözümleri de coğrafyaya bağlı olarak değişiklik gösterebilecektir.

Doğrudan elektrikli araç üreten firmaların yanısıra çoğu büyük içten yanmalı motor kullanan Orijinal Ekipman Üreticisi (OEM), ürün hatlarını elektrikleştirmeyi, iş süreçlerini karbonsuzlaştırmayı ve bu alana önemli yatırımlar yapmayı hedeflemektedir. OEM'lerin 2030'a kadar elektrikli araçlara geçişi planladıkları anlaşılmaktadır. Bu değişim, milyarlarca dolarlık yatırımları içermektedir ve OEM'ler aynı zamanda iş süreçlerini karbonsuzlaştırarak karbon nötr hale getirme hedefleri görülmektedir.

Türkiye otomotiv sanayisi küresel değer zincirlerinde önemli bir konumda bulunmaktadır. Bu sektör, ülkemizdeki sanayi altyapısının oluşmasına ve gelişmesine önemli katkılarda bulunmuştur ve bulunmaya devam etmektedir. Türkiye, 7 küresel marka tarafından ihracat üssü olarak konumlandırılmıştır. Özellikle ticari araç segmentinde faaliyet gösteren yerli sermayeli firmalar, otomotiv sanayisinin önemli eksenlerinden birini oluşturmaktadır. Türkiye'nin otomotiv sanayisi, montaj sanayisi olarak başlamış ancak zaman içinde küresel otomotiv sanayisi için üretim ve mühendislik merkezlerinden biri haline gelmiştir. 2022 sonu itibarıyla Uluslararası Motorlu Araç Üreticileri Organizasyonu (OICA) (Int. Kyn. 69) verilerine göre dünya genelinde 13. büyük otomotiv üreticisi ülke olmuş, Avrupa coğrafyasında ise Türkiye 4. büyük araç üreticisi konumundadır. 2020'de kurulan Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu (TOGG) her ne kadar kendisini otomotiv sanayi içinde konumlandırmaya da diğer araçlarla aynı temel fonksiyonu sağladığı için, bu gelişmenin son halkasını oluşturmaktadır.

Türkiye otomotiv sanayisi, küresel elektrifikasyon sürecinden etkilenmekte ve yerli üreticiler kendi ürün çeşitlerine hibrit (HEA), fişli hibrit (FHEA) ve bataryalı elektrikli araçları (BEA) dahil etmektedir. Ancak, bu geçişin ülkede araç üretiminin sağladığı katma değeri aşağı yönlü etkileme riski vardır. Elektrikli araç mimarisindeki değişim ve özellikle bataryanın aracın toplam değeri üzerindeki ağırlığı, bu süreci hızlandırmaktadır. Elektrifikasyona geçişte özellikle batarya yatırımları stratejik bir adım olarak öne çıkmaktadır. Birçok ülke, kendi rekabetçiliklerini bu alanda güçlendirmeyi hedeflemektedir. Mevcut kapasiteye ek yatırımların yapılması, ülke rekabetçiliğini artırabilecek ve batarya ile ilgili bir ekosistemin oluşmasına katkıda bulunabilecektir.

Türkiye'nin elektrikli araç ve teknoloji hedefleri, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından belirlenmiştir. Bu hedefler arasında 2030'a kadar elektrikli araçlarda % 75 yerlilik oranına ulaşmak ve aynı yıl içinde elektrikli araçların pazar payını % 35'e çıkarmak bulunmaktadır. Bu hedeflere ulaşabilmek için altyapı oluşturmak, elektrikli araç alımlarını ve kullanımını desteklemek, ilgili yatırımları teşvik etmek ve Türkiye'yi bölgesel bir batarya merkezi haline getirmek amacıyla çeşitli eylem planları bulunmaktadır.

Sonuç olarak, elektrikli araçlar, otomotiv sektöründe önemli bir değişimi temsil etmektedir. Avrupa ve ABD'de elektrikli araç talebi artarken, dünya genelinde 2030'a kadar her üç otomobilden birinin elektrikli olması beklenmektedir. Bu değişim, çevresel etkileri azaltma ve sürdürülebilirlik hedefleri etrafında şekillenmektedir. Türkiye ise yerli üretimi teşvik ederek bu dönüşüme katkı sağlamayı hedeflemektedir. Türkiye otomotiv sektörü de global trendlere uyum sağlamak ve elektrikli araç üretimine odaklanmak için çaba harcamaktadır. Özellikle TOGG gibi yerli girişimler, elektrikli araçlar ve sürdürülebilir mobilite (hareketlilik) konusunda stratejik adımlar atmaktadır.

6. ÖNERİLER

Dünyada savunma ve havacılık sektöründen sonra hayatımızı doğrudan etkileyip dünya ekonomisine yön veren sektörlerinden biri olan otomotiv sektöründe, büyük dönüşüm elektrikli araçlarla başlamıştır. Bu dönüşüm otomotiv sektöründe fosil yakıt yerine alternatif yakıtların kullanımını gerekli hale getirmiştir. Bu dönüşümle beraber hayatımızda alternatif yakıtlarla ulaşımaya hazır olmalıyız. Ayrıca, otomotiv sanayi kendi değer önermesinin yeniden tanımlandığı bir değişim süreci içindedir. Bu değişim aracın tüm hayat döngüsünü kapsarken, tüketiciye yönelik sunduğu faydayı da yeniden tanımlanmaktadır. Bu kapsamda elektrifikasyon aracın mimarisine ve kullanım alışkanlıklarına yaptığı etki nedeni ile değişimin en önemli dikeylerinden birini oluşturmaktadır. Elektrifikasyon ile beraber son yüzyılda kurulmuş olan değer zincirinde yapısal bir dönüş başlamıştır.

Bu değişim otomotiv sanayinin küresel değer zinciri içinde yer alan tüm ülkeler için sonuçlar doğuracağı açıktır. Pek çok ülke bu dönüşüm içinde mevcut yerini kaybetmemek ve/veya bu dönüşümden daha güçlü çıkmak için politikalar tasarlamakta ve bunları hayata geçirmektedir.

Ülkemizde otomotiv sanayi değerlendirildiğinde, Türkiye otomotiv sanayinin elektrifikasyona geçişte rakip ülkeler ile kıyaslandığında geriden geldiğini görmekteyiz. Özellikle Macaristan, Polonya ve Çek Cumhuriyeti bölge olarak burada ciddi bir değer zincirini oluşturmayı şimdiden başarmıştır. Bu gelişme Türkiye'nin otomotiv sanayinin uzun dönemde değer yaratma kapasitesi açısından önemli bir risk teşkil etmektedir. Aynı zamanda, Türkiye; üretim kapasitesi ve güçlü yerli tedarikçi alt yapısıyla değerlendirildiğinde küresel otomotiv sanayi içinde son derece güçlü bir pozisyona ulaşma kapasitesine sahiptir. Bu kapasite otomotiv sanayinin yeniden yapılanmasında Türkiye'nin en büyük kozunu oluşturmaktadır.

Buradan hareketle oluşturulan politikaların yeni gelişen bu rekabeti ve onunla beraber oluşan riskleri ama aynı zamanda fırsatları yönetecek şekilde kurgulanması gerekliliği büyük önem arz etmektedir. Dönüşümün çok hızlı olduğu böyle bir dönemde politikaların sürekli ve düzenli olarak gözden geçirilme ihtiyacı stratejik bir öneme sahiptir.

TOGG yerli üretim ile tedarik zincirinde biraz daha geniş bir alan kapsasa da batarya kimyası, batarya ve batarya paketi gibi elektrikli araç performansına bağlı parçalarda ve dolayısıyla markanın pazarda sürekliliğinde dış teknolojilere bağımlıdır.

Ayrıca, ülkemizde varolan otomobil üreticilerinin yabancı sermaye ortaklıkları ile kurulu olmaları nedeniyle Ar-Ge ve inovasyon stratejilerinde de bağımlı olarak hareket ettikleri bilinmektedir.

Günümüzde, insan sermayesinin çalışkan, üretken ve zeki olmasının önemli bir değer olduğu gerçeği daha da belirgin hale gelmiştir. Bu bağlamda, özgüvenimizi toplamak ve iş birliği yaparak, otomotiv sektöründe olduğu gibi diğer sektörlerde de hedef odaklı iş ortaklıkları oluşturarak ve yaratılacak yeni fon ve finansmanlarla dışa bağımlılığın önüne geçmek mümkündür.

Bu dönemin temel özelliklerinden biri de kritik hammadde ve teknolojilere erişim konusudur. Tedarik zincirlerinin devamlılığı ve güvenliği açısından bu kaynaklara ulaşım büyük önem arz etmektedir. Türkiye'nin hem kritik hammaddelere hem de teknolojilere erişiminin hangi koşullarda olacağı ülkenin küresel otomotiv sanayi içindeki pozisyonu açısından belirleyici olacaktır. Buradan hareketle ülkenin toplam kapasitesi esas alınarak bu alanlarda rekabet avantajı oluşturma yetisine sahip başlıklar hızla belirlenmeli ve bu alanlara yatırım yapma iştahını destekleyecek mekanizmalar hızla hayata geçirilmelidir.

KAYNAKLAR

[1] <https://www.acea.auto/fact/facts-about-the-automobile-industry/>, 10.04.2024.

[2] IEA (2023), Global EV Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0., 10.04.2024.

[3] Infographic; <https://www.eea.europa.eu/signals-archived/signals-2022/infographics/what-are-the-sources-of/view>, 10.04.2024.

[4] https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en, 10.04.2024.



[5] Infographic; <https://www.eea.europa.eu/signals-archived/signals-2022/infographics/greenhouse-gas-emissions-from-transport/view>, 10.04.2024.

[6] <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?053107106111065067115113049116090107100056052055108081090071086075069085047110067109075073081116103090081086073108065117084119100109067072079090043071070050102116054100097105104080102043072076>, 12.04.2024

[7] EVs Forecast to Account For Two Thirds Of Global Light-Vehicle Sales In 2035, November 21, 2023 - By Neil King, Forecasting Lead At EV-Volumes, <https://www.ev-volumes.com/news/evs-forecast-to-account-for-two-thirds-of-global-light-vehicle-sales-in-2035/>. 31.03.2024

[8] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/volkswagen-invest-around-180-bln-eur-through-2028-handelsblatt-2024-02-06/>

[9] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/mercedes-benz-hits-cars-returns-forecast-inflation-supply-chain-costs-bite-2024-02-22/>, 10.04.2024.

[10] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/toyota-invest-13-bln-kentucky-facility-new-ev-suv-2024-02-06/>

[11] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/ford-will-delay-some-north-american-ev-production-2024-04-04/>
<https://www.reuters.com/article/idUSKBN1F30YV/>

[12] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/bmws-munich-plant-produce-exclusively-electric-cars-2027-2024-01-10/>

[13] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/stellantis-invest-111-mln-hungary-facility-produce-electric-drive-modules-2024-02-12/>

[14] <https://www.reuters.com/world/americas/honda-weighs-14-bln-plan-ev-production-canada-nikkei-2024-01-07/>

[15] <https://www.reuters.com/markets/deals/nissan-will-invest-renault-ev-unit-even-though-ipo-scrapped-ceo-says-2024-03-27/>

[16] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/renault-invest-320-million-hire-550-workers-make-electric-vans-northern-france-2024-03-29/>

[17] <https://www.reuters.com/markets/commodities/gm-invest-150-million-canadian-miner-agrees-supply-deal-2024-02-15/>

[18] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/lg-group-invest-744-bln-over-next-5-years-2024-03-27/>

[19] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/mazda-panasonics-energy-unit-sign-auto-battery-supply-agreement-2024-03-29/>

[20] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/tesla-begins-making-cars-germany-export-india-this-year-sources-2024-04-04/>

[21] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/tesla-scraps-low-cost-car-plans-amid-fierce-chinese-ev-competition-2024-04-05/>

[22] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/tesla-plans-build-new-electric-vehicles-mid-2025-sources-2024-01-24/>

[23] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/chinas-byd-slows-down-plans-ev-factory-vietnam-industrial-park-says-2024-03-28/>

[24] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/chinese-electric-vehicle-maker-byd-targets-20-jump-annual-sales-2024-03-27/>

[25] <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/chinas-chery-set-up-800-mln-automobile-factory-vietnam-2024-04-04/>

[26] <https://www.reuters.com/markets/emerging/chinas-zeekr-renews-plans-raise-up-500-million-us-ipo-sources-say-2024-04-03/>

[27] [https://www.bmw.com.tr/tr/all-models.html?tl=grp-wdpl-bcom-mix-mn-.nscf.-.-&filters={%22fuelTypes%22:\[%22pluginHybrid%22,%22fullElectric%22\]}](https://www.bmw.com.tr/tr/all-models.html?tl=grp-wdpl-bcom-mix-mn-.nscf.-.-&filters={%22fuelTypes%22:[%22pluginHybrid%22,%22fullElectric%22]})

[28] <https://www.press.rolls-roycemotorcars.com/rolls-royce-motor-cars-pressclub/article/detail/T0345592EN/rolls-royce-and-electric-power:-a-prophecy-a-promise-and-an-undertaking?language=en#:~:text=To%20date%2C%20Rolls%2DRoyce%20has,a%20hybrid%20of%20any%20kind.>

[29] <https://www.chevrolet.com/electric/lineup>

[30] https://www.cadillac.com/?evar25=gm_com_eyebrow

[31] <https://www.buick.com/discover/future-vehicles>



- [32] <https://www.buick.com/discover/news/electric-vehicle-future#:~:text=In%20North%20America%2C%20Buick's%20first,will%20carry%20the%20name%20Electra.>
- [33] <https://www.gmc.com/electric/hummer-ev/pickup-truck>
- [34] <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/media-kits/2021/electric-vehicles.html.html>
- [35] https://global.honda/en/sustainability/integratedreport/pdf/Honda_Report_2023-en-cs.pdf
- [36] <https://www.hyundai.com/worldwide/en/company/innovation/electrification>
- [37] <https://press.kia.com/eu/en/home/media-resouces/press-releases/2023/Kia-accelerates-popularization-of-EVs.html#:~:text=The%20brand's%20goal%20is%20to,products%20and%20initiatives%20revealed%20today.>
- [38] <https://www.jaguarlandrover.com/news/2023/04/jlr-invest-ps15-billion-over-next-five-years-its-modern-luxury-electric-first-future>
- [39] <https://insidemazda.mazdausa.com/the-mazda-way/mazdas-approach-to-electrification/>
- [40] <https://group.mercedes-benz.com/innovation/drive-systems/electric/eq-basics.html>
- [41] <https://newsroom.toyota.eu/toyotas-new-battery-and-fuel-cell-electric-vehicles-to-reinforce-multi-pathway-approach-to-carbon-neutrality/>
- [42] https://www.tesla.com/ns_videos/Tesla-Master-Plan-Part-3.pdf
- [43] <https://www.byd.com/eu>
- [44] <https://www.cheryinternational.com/pc/news/news1/20240103/detail-2331.shtml>
- [45] https://www.nissan-global.com/EN/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/ZERO_EMISSION/
- [46] <https://media.renaultgroup.com/renault-eways-electropop-a-historic-acceleration-of-renault-groups-ev-strategy-to-offer-competitive-sustainable-popular-electric-vehicles/>
- [47] https://www.mitsubishi-motors.com/en/newsroom/newsrelease/2023/20230310_1.html
- [48] <https://www.stellantis.com/en/technology/electrification>
- [49] <https://www.alfaromeo.com/>
- [50] <https://www.chrysler.com/chrysler-innovation/future-of-chrysler.html>
- [51] <https://www.media.stellantis.com/em-en/opel/press/opel-to-become-purely-electric-in-record-time>
- [52] <https://www.citroen.co.uk/electric-for-all.html>
- [53] <https://www.dsautomobiles.co.uk/ds-experience/electric-hybrid/e-tense.html#:~:text=E%2DENSE%20technology%20is%20available,become%20100%25%20electric%20by%202024.>
- [54] <https://www.fiat.co.uk/news/fiat-electrification>
- [55] <https://www.jeep.com/grand-chokeee/grand-chokeee-4xe.html>
- [56] <https://www.lancia.com/ypsilon/edizione-limitata-cassina>
- [57] <https://www.maserati.com/global/en/news/maserati-electrification-and-sustainable-growth>
- [58] <https://www.peugeot.fr/nos-vehicules/gamme/vehicules-hybrides-2.html>
- [59] <https://www.ramtrucks.com/electric.html>
- [60] <https://www.audi.com/en/sustainability/environment-resources/electrification.html#:~:text=Audi%20thus%20intends%20to%20offer,with%20combustion%20engines%20by%202033.>
- [61] <https://www.bentleymotors.com/en/about-bentley/beyond-100/bentley-brand-manifesto.html>
- [62] <https://www.vw.com/en/models.html?---=%7B%22filter-service%22%3A%22%2F%22%7D>
- [63] <https://media.porsche.com/mediakit/battery-electric-vehicle-workshop/en/bev-workshop/at-a-glance-e-mobility-at-porsche>
- [64] <https://www.skoda-storyboard.com/en/skoda-world/next-level-strategy-2030/>
- [65] [https://www.seat-mediacycenter.com/electrification/Transformation-on-site-Facilities#:~:text=SEAT%20S.A.'s%20main%20factory,E2E\)%2C%20digitalization%20and%20sustainability.](https://www.seat-mediacycenter.com/electrification/Transformation-on-site-Facilities#:~:text=SEAT%20S.A.'s%20main%20factory,E2E)%2C%20digitalization%20and%20sustainability.)
- [66] <https://global.geely.com/>



[67] <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/277409/volvo-cars-to-be-fully-electric-by-2030>

[68] <https://www.reuters.com/article/idUSKBN2751BW/>

[69] <https://www.oica.net/category/production-statistics/2022-statistics/>, 12.04.2024

SEKTÖREL BAKIŞ: ŞARJ İSTASYONLARI ve ŞEBEKE YÖNETİMİ



S. Yanık¹[+], O. Ögünçlü¹, H. C. Çıtak², A. E. Bayraktaroğlu¹, O. Hüsrevoğlu³

ÖZET

İklim değişimi ile mücadelede küresel olarak karbondan arındırmayı hızlandırmak için elektrikli araçlar ekosisteminin ve tedarik zincirinin gelişmesi önemlidir. Şarj istasyonları ve altyapısı elektrikli araçların yaygınlaşması için en kritik faktörlerin arasında yer almaktadır. Türkiye’de elektrikli araçlara geçişte müşterilerin önem verdiği faktörlerin başında şarj altyapısı, şarj süresi, araç fiyatı ve menzili gelmektedir.

Şarj altyapısına verilen önem dikkate alınarak bu bölümde elektrikli araç şarj istasyonlarını ve altyapısını sistem bakış açısı ile tanımlamak, şarj istasyonlarının elektrikli araç kullanımının yaygınlaşmasındaki rolü ve elektrik şebekesi ile etkileşiminde ortaya çıkan zorlukları ve fırsatları incelemek amaçlanmıştır. Öncelikle, şarj istasyonlarını tanımlarken bileşenleri, yaşam döngüsü, çeşitli sınıflandırmaları, tedarik zincirindeki üreticileri, kurulum süreci, operasyon ve yönetim süreçleri detaylı olarak incelenmiştir. Sonrasında ise şarj istasyonlarının oluşturduğu şarj altyapısının hem sayısal hacmi ve kapasitesi hem de şarj istasyonu güvenilirliği, kullanıcı deneyimi, verimliliği gibi kalitatif boyutları için Türkiye’deki ve dünyadaki mevcut durumu ve gelecek için gereksinimlerin hangi faktörlere ve yönelimlere göre belirlenebileceği araştırılmıştır. Ayrıca, elektrikli araç, şarj altyapısı ve elektrik şebekesi arasındaki etkileşimin boyutları ve bu boyutların ekonomik şekilde tasarlanması için ne tür yaklaşımlar kullanılabileceği özetlenmiştir. Son olarak, şarj istasyonları ve altyapısının geliştirilmesi ve yönetiminin mevcut ihtiyaçlara ve gelecek gelişmelere cevap verebilmesi için öneriler sunulmuştur.

[+] sedayanik@itu.edu.tr

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Maçka, 34367 İstanbul, Türkiye

2 E-Autotrek, Kozyatağı, İstanbul, Sarı Kanarya Sokak, ByOfis, Kadıköy, 34752 İstanbul, Türkiye.

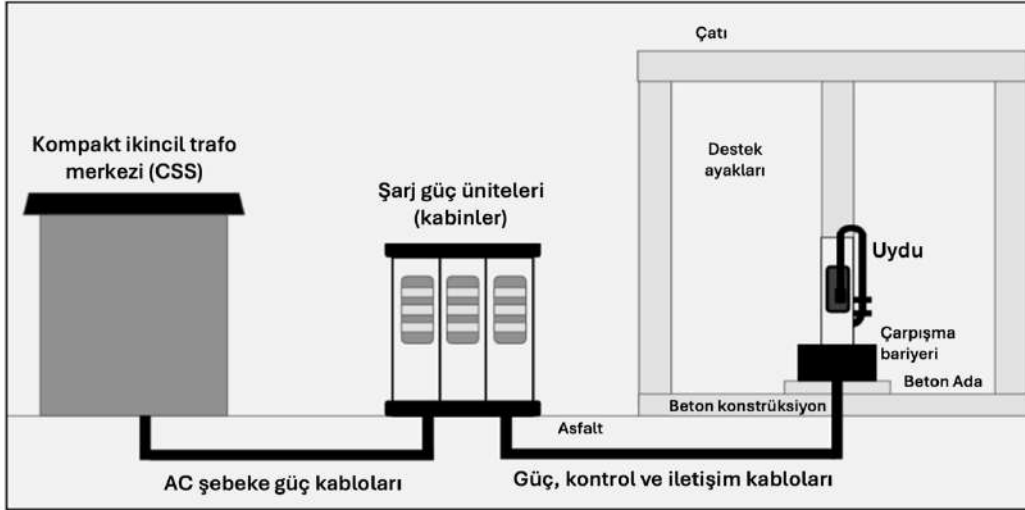
3 Elektronik Şarj Sistemleri A.Ş Maslak Mah. Eski Büyükdere Cad. Giz 2000 Plaza Kat:15 Daire: 57, Sarıyer, 34485 İstanbul, Türkiye.

1. ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONU TANIMI VE ÖZELLİKLERİ

Lityum iyon batarya içeren elektrikli araç (EA) şarj istasyonlarının (Şİ) ve noktalarının temel fonksiyonu araç besleme ekipmanı olarak elektrikli araca elektrik enerjisini sağlamak ve bataryayı şarj etmek başka bir deyişle dolu konuma getirmektir. Bu istasyonlar, genellikle kamuya açık alanlara veya özel alanlara yerleştirilir. Batarya şarj istasyonları, genellikle alternatif akım (AC) veya doğru akım (DC) şarj cihazlarından oluşur. EA kullanıcıları çoğunlukla ev tipi prizlere benzer konektörler aracılığıyla AC şarj tipini tercih etmektedirler. Fakat bu yöntem yalnızca düşük ve orta menzilli yolculuklar için gerekli olan güç ihtiyacını karşılamaktadır. Buna alternatif olarak daha yüksek güç seviyelerinde çalışan AC hızlı şarj istasyonları geliştirilmiş olup ticari alanlarda veya kısa süreli duraklamalarda kullanılmaktadır. Benzer bir şekilde yüksek güç seviyeleriyle çalışan DC şarj istasyonları, uzun menzilli yolculuklarda EA'ların hızlı bir şekilde şarj edilmesine olanak sağladığı için kullanıcıların tercihi olmaktadır. Bunun en karakteristik uygulaması Tesla'nın geliştirdiği süper şarj istasyonlarında görülebilmektedir (Int. Kyn. 1). Manyetik rezonans veya indüksiyon gibi teknolojiler kullanarak enerji transferi sağlayan kablosuz şarj sistemleri, araçları fiziksel kablolar olmadan şarj etme imkanları sunmaktadır, bu şarj sistemleri henüz gelişme aşamasındadır.

1.1. DC Şarj İstasyonu Sistemi ve Bileşenleri

Şarj istasyonunu öncelikle bir sistem olarak değerlendirmek ve bileşenleri ile tanımlamak gerekir. Dahlberg ve Rodriguez (2023)'in çalışmasında tanımlanan, örnek bir DC şarj istasyonundaki bileşenler Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu sistemde, elektrik şebekesinden gelen AC güç ilk olarak kompakt ikincil trafo merkezine (CSS) iletilir. Bu enerji daha sonra daha düşük bir voltaja dönüştürülerek şarj güç ünitelerine dağıtılır. Şarj güç üniteleri AC gücünü DC güce dönüştürerek kablolar aracılığıyla uydulara dağıtır. Merkezde sekiz uydu bulunmaktadır. Uydular, destek direkleri ve çarpışma bariyeri ile çevrili beton adalar üzerine konumlandırılmıştır. Beton adalar ve şarj için yer alan park yerleri bir çatı ile örtülmüştür. Park alanı da beton bloklardan oluşmaktadır. Merkez alanının geri kalanı asfaltla kaplanmıştır. Bileşenlerin detaylı açıklamaları şöyledir:



Şekil 1. Bir şarj istasyonu ve bileşenleri

- **Kompakt ikincil trafo merkezi (Compact Secondary Substation-CSS):** Kompakt bir ikincil trafo merkezinin amacı, orta voltajlı bir sistemden düşük voltajlı enerji sağlamaktır. Tipik bir CSS, orta gerilim (Medium Voltage-MV) şalt sistemini, dağıtım transformatörlerini, alçak gerilim (Low Voltage-LV) panolarını, bağlantıları ve yardımcı ekipmanı içerir. Bu, beton, metal levha veya camla güçlendirilmiş plastikten yapılmış bir mahfazanın içine yerleştirilmiştir (Raghavan vd., 2023). Farklı durumlara özel, istasyonlarda farklı kilo volt amper (kV. A) gücüne sahip trafo merkezleri kullanılabilir.
- **AC şebeke güç kabloları:** Bu kablolar enerjiyi CSS'den şarj güç ünitesine aktarmak için kullanılır. Şarj etmek için kullanılan tipik güç kabloları bakır veya alüminyumdan yapılır. Kablonun boyutu ve uzunluğu, şarj merkezinin gücüne ve düzenine bağlıdır.
- **Şarj güç ünitesi (kabin):** Bir şarj güç ünitesi (kabin), AC enerjiyi DC enerjiye dönüştürerek uydulara dağıtır. Şekil 1'de sunulan görseldeki kurulumda üç dolap mevcuttur, farklı durumlarda dolap sayıları farklılık gösterebilir.

Yine görseldeki durum için her dolapta her biri 50 kW'lık dört dahili güç modülü bulunur. Bu kurulumu kullanan maksimum güç 600 kW'tır ve sekiz adede kadar dinamik çıkış sağlayabilir.

Şarj güç ünitesinin içinde Şekil 2'de görüldüğü gibi dört güç modülü, bir dinamik güç dağıtım modülü, bir kontrol modülü ve bir şebeke modülü bulunmaktadır. Bu bileşenler aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır.

Güç modülü: Bir güç modülü birçok elektronik bileşeni barındırır. Elektrikli araç şarjı genellikle bir transformatör, doğrultucu, filtre, invertör, güç anahtarları ve bir soğutma sistemi içerir. Güç modülünün tasarımına ve kullanımına bağlı olarak bu bileşenler şarj sisteminin diğer bölümlerine yerleştirilebilir. Bir güç modülü, tasarıma bağlı olarak genellikle 25-50 kW güce sahiptir.

Dinamik güç dağıtım modülü: Güç kanallarını şarj noktalarına yönlendirir ve yeniden yönlendirir. Bir soğutma sistemi ve elektronik bileşenler içerir. Tüm bu bileşenler bir kutunun içinde yer alır ve şarj güç ünitesine entegre edilir.

Kontrol modülü: İletişim sisteminden bir kontrol modülü sorumludur. Bazı şarj sistemleri iletişim sistemini bir iletişim kabini olarak veya bu durumda şarj güç kabini içinde bir kontrol modülü olarak bulundurabilir. Ethernet bağlantı noktası, USB bağlantı noktası ve anten kablosu konnektörleri gibi iletişim kablolarının bağlı olduğu tüm bağlantı noktalarını içerir.

Şebeke modülü: AC şebeke güç kablolarının bağlandığı bölmedir. Ana şalter ve voltaj kontrolü için minyatür devre kesici gibi bazı güvenlik özelliklerine sahiptir.



Şekil 2. Bir şarj güç ünitesi (kabin) iç yapısı.

- **Güç, kontrol ve iletişim kabloları:** Güç kabloları enerjiyi kabinlerden uydulara aktarır. Kontrol ve iletişim kabloları kabin ile uydu arasındaki iletişimi yönetmek için kullanılır.
- **Uydu:** Şekil 1'de verilen görseldeki kurulumda, spesifik model S-C-5E-S olmak üzere sekiz tek uydu kullanılır. Bu uydu tipinde yalnızca bir şarj kablosu ve bir araç konektörü, yani araca takılan bir tutamak bulunur. Şarj kablosu bir yay tarafından desteklenmektedir.
- **Çarpışma bariyeri:** Çarpışma bariyeri, uyduyu bir aracın olası çarpma etkisinden korumak için kullanılan bir bileşendir. Şekil1'de verilen tasarımda her uydu bir çarpışma bariyerine sahiptir ve bariyerler ince metal levhalardan oluşur ve beton adanın üzerinde uydunun yanında bulunur.
- **Beton ada:** Beton ada, uydunun, çarpışma bariyerlerinin ve çatının destek direklerinin bulunduğu betondan yapılmış bir yapıdır. Beton adanın kenarları ince bir çelik levha çevrilidir.
- **Çatı:** Çatı, şarj ekipmanlarına ve araçlara barınak ve koruma sağlayan bir yapıdır. Örnekte verilen tasarımda her beton adanın çatısında, şarj uydusunu çevreleyen iki destek direği bulunur. Çatı yapılandırılmış lamine ahşaptan yapılmıştır.

- **Beton süzgeçler ve asfalt:** Beton drenajlar, özellikle yoğun trafik için tasarlanmış, iyi drenaj özelliklerine sahip beton bloklardır. Bu beton drenajlar şarj park yerlerine ve bitişik alana yerleştirilir. Araçların şarj alanına giriş çıkışları için şarj alanının bir kısmı da asfalt yolla kaplanır.

1.2. AC Şarj İstasyonu Sistemi ve Bileşenleri

AC şarj istasyonlarının bileşenleri ise Şekil 3'te gösterilmektedir. Bu tip şarj üniteleri elektrik enerjisini araç bataryalarına aktarmak için evlerdeki prizlerden uygun konnektörler (adaptörler) ve kablolar kullanarak şarj işlemini sağlamaktadır.



Şekil 3. AC şarj ünitesinin bileşenleri (Tüm hakları Easby Electronics: Leading Electronic Components Supplier & Distributor ait olup kurumdan izin alınarak uyarlanmıştır, Int. Kyn. 2)

1.3. AC ve DC Şarj İstasyonu Soketleri

AC ve DC şarj istasyonu bileşenlerinden biri olan soketlerin dünyada kullanılan türleri ve standartları da oldukça çeşitlidir. Şarj istasyonlarında elektrikli araçların şarj girişi ile şarj istasyonunun çıkışı arasında uyumluluğu sağlayan fişlere soket denmektedir. Şarj istasyonları temel olarak AC ile 43 kW'a kadar, DC ile 350 kW'a kadar hızlı şarj sağlayabilen iki farklı tür akıma sahip soket içermektedir. Şekil 4'de elektrikli araç şarj soket tipleri verilmiştir.

- **AC Tip 1**, tek fazlı bir sokettir ve Amerika ve Asya'daki elektrikli araçlar için standarttır. EA'nın şarj gücüne ve şebeke kapasitesine bağlı olarak 7,4 kW'a kadar bir hızda şarj sağlar. J1772 olarak da adlandırılan bu soketler sadece elektrikli araçlar için değil, aynı zamanda elektrikli bisikletler ve hatta bazı hafif elektrikli araçlar için de kullanılabilir. Dolayısıyla bu soket çok sayıda şarj istasyonunda yaygın olarak bulunmakta ve elektrikli araç kullanıcılarına ortak çözüm olarak kolaylık sağlamaktadır (Falvo vd. 2022)
- **Mennekes (AC Tip 2)** fişler, üç fazlı fişlerdir ve akımın geçmesine izin veren üç ek kabloya sahiptir. Doğal olarak, EA daha hızlı şarj edilebilir. Evde, en yüksek şarj gücü oranı 22 kW iken, halka açık şarj istasyonları EA şarj gücüne ve şebeke kapasitesine bağlı olarak 43 kW'a kadar şarj gücüne sahip olabilir. Bu soketler güvenli bir tasarıma sahip olup kullanıcı dostu deneyim sunmaktadır. Mennekes soketler, üzerinde bulunan kilitleme mekanizması takılıken soketin güvenli bir şekilde bağlı kalmasını sağlamaktadır. Ayrıca Mennekes soketlerin dayanıklılığı ve su geçirmezliği de her hava koşulunda güvenle kullanılmasına olanak vermektedir (Falvo vd. 2022)
- **GB/T:** Hem AC, hem de DC destekli güç kaynakları ile entegre çalışan soketler, Çin'de yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca GB/T şarj soketleri 237,5 kW seviyesinde DC şarj hizmeti sunabilmektedir. Üstelik GB/T'ler bugün Tesla'nın fabrikasının da bulunduğu Çin'deki Tesla otomobillere bile entegre çalışabilmektedir.

Ek olarak bir başka Asya ülkesi olan Hindistan'daki en yaygın kullanılan soketlerden de biri olarak ön plana çıkmaktadır (Zhang, 2012).

- **CCS 1:** Combo 1 şarj soketi olarak da bilinmektedir, hem alternatif akım (AC) hem de doğru akım (DC) şarjı desteklemektedir. CCS 1, AC şarj soketlerine DC akım taşıyarak şimdiye kadar 170 kW'a kadar bir hızda şarj sunabilen ilk soket olarak bilinmekte ve bu durum daha hızlı şarj edilen ve daha uzun sürüş mesafesi sunan bir elektrikli araç deneyimi sağlamaktadır.
- **DC CHAdeMO:** Bu hızlı şarj sistemi Japonya'da geliştirilmiş olup çok yüksek şarj kapasitelerine ve çift yönlü şarja imkan verir. 100 kW'a kadar şarj imkanı mevcuttur. DC CCS: CCS fişi, hızlı şarj amacıyla iki ek güç kantağına sahip tip 2 fişin geliştirilmiş bir versiyonudur. AC ve DC şarjı destekler. 350 kW değerine kadar şarj imkanı mevcuttur (Zhang, 2012).
- **CCS 2:** Combo 2 şarj soketi olarak da bilinmektedir. Hem hızlı AC şarjı hem de yüksek hızlı DC şarjı destekleyen çok yönlü bir çözüm olarak CCS1'in de ötesine geçmektedir. Dolayısıyla aracı hızlı bir şekilde şarj etmek CCS 2 ile daha basit ve etkili hale gelmektedir. Bu soket, elektrikli araçları daha verimli ve çevre dostu bir geleceğe taşıyan önemli bir bileşen olarak ön plana çıkmaktadır. 250 kW'dan, 500 kW'a kadar şarj gücü bulunan bu soketler, şirketlere göre şu anda mevcut en hızlı şarj desteğini sağlamaktadır (Zhang, 2012).
- **Tesla:** Hızlı şarj kapasitesiyle öne çıkan Tesla, kendine ait 3 pimli bir şarj soketi ile entegre şekilde çalışmaktadır. Hem AC hem de DC tipi şarjlarla uyum gösteren şarj soketi tüm dünya genelinde kullanılmaktadır. DC hızlı şarj istasyonlarında kullanılabilen kendi geliştirdiği hızlı şarj (Supercharger) ağına sahip olup bu ağ, Tesla sahiplerine sürüş molası yaparken araçlarını hızlıca şarj etme fırsatı sunmaktadır. Şarj süresini kısaltmak ve yolculuklara konfor katmak için tasarlanmış olan Tesla şarj soketi, gelecekteki taşıtlarının güç kaynaklarına ilham verici durumdadır. Tesla elektrikli şarj istasyonlarında, bu soket ile 250 kW'a kadar hızlı şarj hizmeti sunmaktadır. Ek olarak Tesla, üretildiği ülkelere göre farklı şarj soketleri ile de entegre çalışabilmektedir (Int. Kyn. 3).



	Tip 1, J1772	Tesla	CHAdeMO	CCS*	Tip 2	CCS (2)	GB/T
Amerika	AC/DC	AC/DC	DC	DC			
Avrupa	AC	AC/DC	DC		AC	DC	
Japonya	AC		DC				
Çin							AC/DC

*CCS (Birleşik Şarj Sistemi, Combo Charging System)

Şekil 4. Elektrikli araç şarj soket tipleri (Dini vd.,2023)

2. ŞARJ İSTASYONU TEDARİKÇİLERİ

Dünyada şarj istasyonu üretimi yapan birçok firma bulunmaktadır. Örnek olarak, ABD'de ChargePoint, Tesla, EVgo gibi firmalar, Avrupa'da ise ABB, Siemens gibi firmalar şarj istasyonları üretmektedir. Aynı zamanda, Çin'de ise State Grid Corporation of China, China Southern Power Grid gibi devlet şirketleri de şarj istasyonları üretmektedir.

ABB, elektrik aracı şarj teknolojisi ve sistemleri konusunda dünya çapında lider konumdadır. Avrupa, Asya ve Amerika gibi farklı bölgelerde şarj istasyonları üretmekte olan bir firmadır. ABB'nin yatırım ve Ar-Ge faaliyetleri, şarj istasyonlarının geliştirilmesi ve daha etkili hale getirilmesi için yoğun bir şekilde devam etmektedir. Örneğin, ABB'nin yaptığı yatırımlar arasında, hibrit ve elektrikli araçlar için şarj istasyonlarının geliştirilmesi, DC şarj teknolojisi ve enerji depolama sistemleri gibi konular yer almaktadır. Ayrıca, yatırımlarının yanı sıra Ar-Ge faaliyetlerini de sürdürmektedir. Örneğin, ABB, elektrikli araçların şarj yönetimi, enerji depolama ve enerji yönetimi gibi konularda Ar-Ge çalışmalarını yürütmektedir.

ABB, elektrikli araçların şarjı için de çeşitli çözümler sunmaktadır. Örneğin, ABB, şehir içi ve şehirlerarası seyahatler için AC ve DC şarj çözümleri, araç içi enerji yönetimi ve enerji depolama çözümleri gibi çözümler sunmaktadır (Int. Kyn. 4).

Türkiye'de şarj istasyonu üreticileri arasında ABB, Siemens, Schneider Electric gibi yabancı firma temsilciliklerinin yanı sıra Vestel, WAT Mobilite, Aspower, Gersan, Kalyon-OnCharge ve Voltron gibi yerli firmalar bulunmaktadır.

3. ŞARJ İSTASYONU SINIFLANDIRMALARI

Önceki bölümlerde anlatılan AC ve DC şarjın yanı sıra şarj istasyonlarını birçok farklı kritere göre sınıflandırmak mümkündür. Tablo 1'de bu sınıflandırmalar özetlenmektedir.

Tablo 1. Şarj istasyonları sınıflandırması.

Sınıflandırma Kriteri	Sınıflandırma	Kaynaklar /Kurum
İletken durumu	<ul style="list-style-type: none"> İletkenli Şarj Kablosuz Şarj 	Falvo vd. (2022)
Güç	<ul style="list-style-type: none"> Seviye 1: (120V AC güç) Seviye 2: (240V AC güç) Seviye 3: (208-600V DC güç) 	SAE (Society of Automotive Engineers) (Int. Kyn. 5)
Hız	<ul style="list-style-type: none"> Mod 1: (Yavaş Şarj): Mod 2: (AC Kullanarak Yavaştan Yarı Hıza) Mod 3: (AC Kullanarak Yarı Hızdan Tam Hıza) Mod 4: (DC Hızlı Şarj) 	IEC (International Electrotechnical Commission) (Int. Kyn. 6)
Güç kaynağına bağlanma şekli	<ul style="list-style-type: none"> Durum A: (Şarj kablosunun istasyon ucu çıkarılabilir.) Durum B: (Şarj kablosunun her iki ucu da çıkarılabilir.) Durum C: (Şarj kablosunun araç ucu çıkarılabilir.) 	IEC (Int. Kyn. 6)
Lokasyon Tipi	<ul style="list-style-type: none"> Ev tipi şarj Umumi (Halka açık) şarj İşyeri şarjı 	Yun vd.(2022)
Şarj türü/ Güç kullanımı	<ul style="list-style-type: none"> Batarya Değiştirme İstasyonları Yalnızca Şebeke Gücü Kullanan Şarj İstasyonu Şebeke Gücü ve Enerji Depolama Sistemi Kullanan Şarj İstasyonu Şebeke Gücü ve Yenilenebilir Enerji Kullanan Şarj İstasyonu Şebeke Gücü, Yenilenebilir Enerji ve Enerji Depolama Sistemi Kullanan Şarj İstasyonu Şebeke Dışı Şarj istasyonu 	Narasipuram ve Mopidevi (2021)

3.1. İletken Durumuna Göre Şarj İstasyonu Sınıflandırmaları

Elektrikli araç şarj istasyonlarının sınıflandırılması, istasyonun elektrik enerjisini elektrikli araca iletmek için kullandığı yöntemle yani elektrikli araçların istasyona bağlanma şekline göre; (Falvo vd., 2022)

- Şarj, iletkenler kullanılarak yapılıyorsa, bu iletkenli şarj olarak sınıflandırılmaktadır.
- Şarj, iletkenler kullanılmadan yapılıyorsa, bu kablosuz, temassız veya prize takmadan şarj olarak sınıflandırılmaktadır.

Elektrikli araç şarj sistemleri ile ilgili başka bir önemli sınıflandırma, şarj hızı ile ilgilidir. Şarj istasyonunu iletebileceği güç miktarının yanı sıra, batarya özellikleri, mevcut şarj durumu, şarj gücü gibi birkaç faktör elektrikli aracın yavaş veya hızlı şarj edilmesinde etkili parametrelerdir.

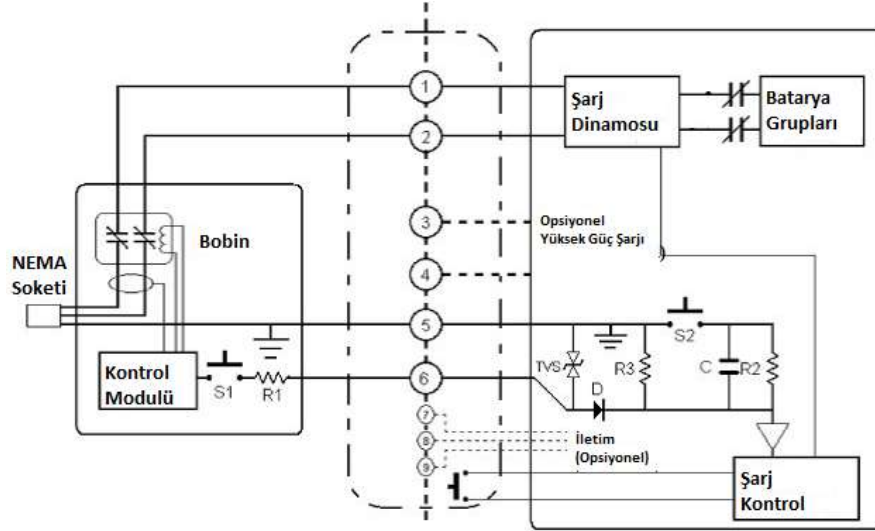
3.2. Güce Göre Şarj İstasyonu Sınıflandırmaları

SAE, tedarik edilebilen güç kaynağı gerilim miktarına göre 3 seviye şarj türü tanımlamıştır (Dericioglu, 2018)

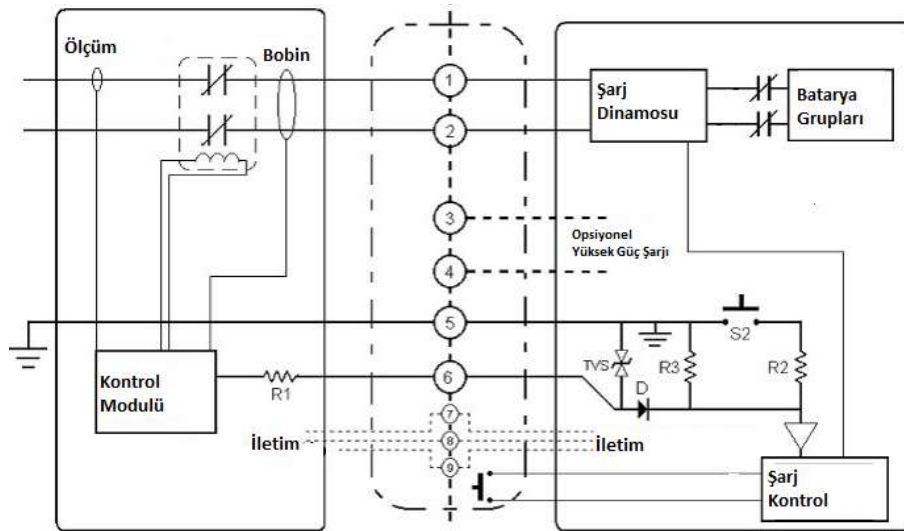
Seviye 1 (Yavaş Şarj): Ev şarjı olarak da adlandırılan en temel elektrikli araç şarj türüdür. Bu, aracı taşınabilir bir şarj cihazı kullanarak aracın standart 120 V ev prizine takılması işlemi içermektedir. Bu yöntem evde gece şarjı aracı yavaş şarj etmek için uygundur, ancak hızlı şarj için uygun değildir. Seviye 1 şarj için gerekli güç, yaygın olarak topraklanmış bir

prizden (NEMA 5-15R) elde edilir. Bu şarj yönteminin (enerji altyapısı için kablolama, işletme, bakım ve onarım) başlangıç maliyeti yaklaşık 800 \$'dır. Seviye 1 şarj sisteminin yapısı Şekil 5'te sunulmuştur (Dericioglu, 2018)

Seviye 2 (AC Kullanarak Yavaştan Hızlıya): Seviye 2 şarj istasyonları 240V AC güç ile çalışıp ve Seviye 1'e göre daha hızlı şarj sağlamaktadır. Genellikle umumî yerlerde, iş yerlerinde ve ticari tesislerde bulunmakla birlikte günlük işe gidip gelme için uygundur. Bu şarj yöntemi 7 kW (32 A tek fazlı) veya 22 kW (üç fazlı) "Hızlı AC şarj" olarak tanımlanmaktadır. Seviye 2 şarj yöntemi, iş yerleri veya halka açık şarj istasyonları için de geçerli durumdadır. Bu şarj yönteminin (enerji altyapısı için kablolama, işletme, bakım ve onarım) başlangıç maliyeti yaklaşık 3.000 \$'dır. Seviye 2 şarj sisteminin yapısı Şekil 6'da sunulmuştur (Dericioglu, 2018).

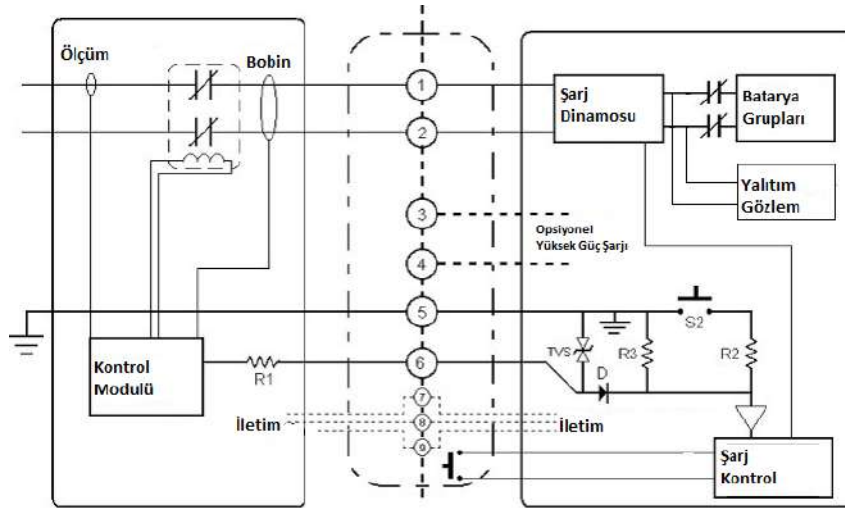


Şekil 5. Seviye 1 şarj sisteminin yapısı (Dericioglu, 2018)



Şekil 6. Seviye 2 şarj sisteminin yapısı (Dericioglu, 2018)

Seviye 3 (Doğru Akım Hızlı Şarj (DCFC)): DCFC, elektrikli araçlar için en hızlı şarj seçeneğini temsil etmektedir. Bu istasyonlar doğru akım kullanarak yüksek hızlı şarj sağlamakta ve genellikle otoyollar ve ana ulaşım yolları boyunca bulunmaktadır. Bu durum elektrikli araç sahiplerine uzun mesafe seyahat imkanı sunmaktadır. Bu şarj yönteminde piller halka açık veya özel şarj istasyonlarında doğru akımla şarj edilmektedir. Şarj işlemi yapılırken uygun bir iletken ve uygun konnektör bulunması gerekmektedir. DC şarj, AC Seviye 1 ve Seviye 2 şarjdan çok daha hızlıdır. Seviye 3 şarj sistemi hızlı DC şarj olarak da düşünülebilir ve araca bağlı olarak 50 kW güç kolaylıkla araca yönlendirilebilir. Seviye 3 şarj cihazı ile pil yaklaşık 20 dakikada % 0'dan % 80'e şarj edilebilmektedir. Ek olarak, böyle bir güç sisteminin başlangıç maliyeti (altyapı, işletme vb. dahil) 40.000 \$ ila 70.000 \$ arasındadır. Seviye 3 şarj sisteminin yapısı Şekil 7'te sunulmuştur (Dericioglu,2018).



Şekil 7. Seviye 3 şarj sisteminin yapısı (Dericioglu,2018)

3.3. Hıza Göre Şarj İstasyonu Sınıflandırmaları

Sözü geçen 3 seviyeli sınıflandırmaya benzer bir biçimde Avrupa'da daha yaygın olarak kullanılan International Electrotechnical Commission (IEC) tarafından kabul edilmiş derecelendirme sistemi, şarj modlarını aşağıdaki gibi sıralamaktadır: (LaMonaca ve Ryan,2022)

Mod 1 (Yavaş Şarj): Mod 1 sistemi, genellikle standart ev prizi kullanılarak gerçekleşen yavaş şarjı ifade eder. Standartlaştırılmış bir konnektör sistemi kullanılarak alternatif akım şarjını tanımlar, Maksimum çıkış akımı 16A olan bu şarj modunda, bir artık akım koruyucu cihazının (artık akım devre kesici) bulunması önemlidir. Bu tür bir korumanın mevcut kurulumlarda her zaman sağlanmadığı durumlarda Mod 1 tercih edilmemelidir (Ricaud, 2010).

Mod 2 (AC Kullanarak Yavaştan Yarı Hıza): Mod 2, AC güç kullanarak yavaştan yarı hızlıya kadar olan şarjı içerir ve genellikle bazı kontrol ve güvenlik özellikleriyle ön plana çıkar. Bu özellikler pilot kontrol fonksiyonu ve elektrik çarpmasına karşı kişisel koruma sistemi ile donatılmıştır ve bu sistem elektrikli araç ile priz arasına yerleştirilir. Pilot kontrol fonksiyonu, kablo üzerinde bulunan kablo kontrol ve koruma cihazını içerir. Bu cihaz, şarj cihazının güvenli güç ayarı sağlamak üzere entegre edilmiş bir koruma ve kontrol cihazı olarak görev yapar ve araç ile gerekli iletişimi sağlar. Mod 2 sistemi de Mod 1 gibi standart bir elektrik prizine bağlanır ve maksimum çıkış akımı 32 A'dır (Ricaud, 2010).

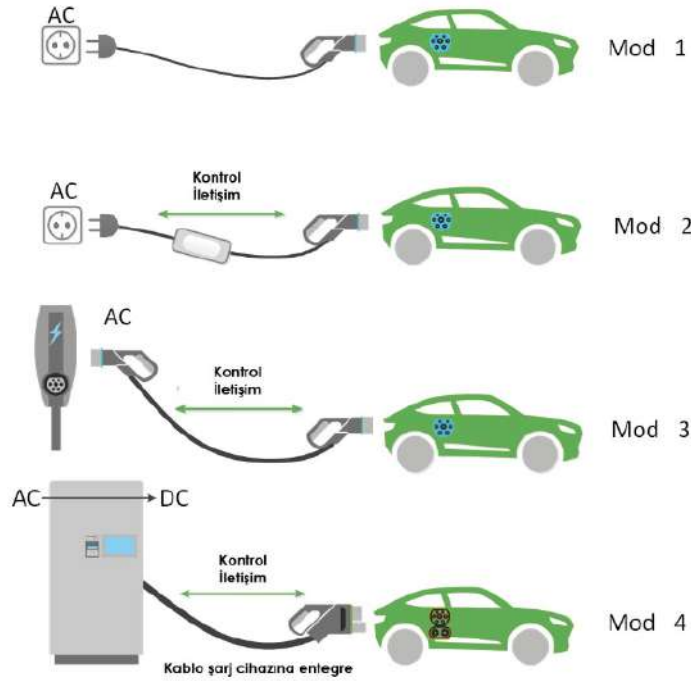
Mod 3 (AC Kullanarak Yarı Hızdan Hıza): Mod 3 sistemi, genellikle umumî şarj istasyonlarında bulunan AC güç kullanarak yarı hızdan hızlıya kadar olan şarjı temsil eder. Şarj süreci şarj istasyonuna veya sürekli olarak şebeke beslemesine bağlı olan bir duvar kutusuna yerleştirilmiş özel standartlaştırılmış bir şarj soketinde gerçekleşir. Alternatif olarak, şarj noktasında kalıcı olarak bağlı bir şarj kablosu da bulunabilir Mod 3'te maksimum 63 A bir şarj akımı sağlanabilir ve kapasitesi 43,5 kW dır (Ricaud, 2010).

Mod 4 (DC Hızlı Şarj): Mod 4 sistemi, DC hızlı şarjı ifade eder ve yüksek şarj hızlarını sunar; genellikle uzun mesafe seyahat için kullanılır. Yüksek güvenlik gereksinimleri nedeniyle şarj cihazı araçta değil, şarj istasyonunun bir parçasıdır. Şarj kablosu aynı zamanda şarj istasyonuna kalıcı olarak bağlıdır. Mod 4'te, araç iki farklı konnektör sistemi kullanılarak şarj edilebilir: Maksimum 200 A'lık bir şarj akımına ve 170 kW'ye kadar şarj kapasitesine sahiptir (Ricaud, 2010)).

3.4. AC ve DC Şarj İstasyonlarının Karşılaştırması

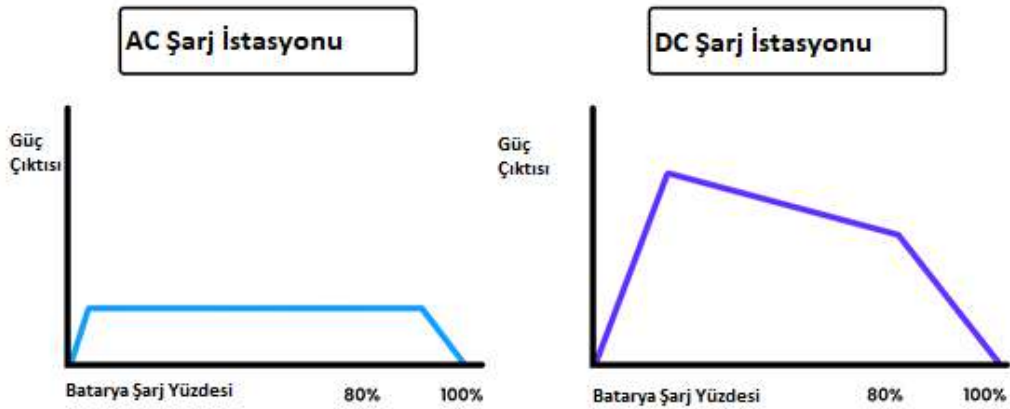
AC ve DC karşılaştırması yapılacak olursa AC şarjın daha yavaş ancak daha ucuz bir şekilde kurulabildiği (ve hatta genel bir priz aracılığıyla gerçekleştirilebilir, bu da bir güç noktası olarak bilinir). DC şarjın doğrudan şebekeye bağlandığı ve AC şarj cihazlarından çok daha hızlı şarj edebildiği, ancak kurulumu daha pahalı olduğu görülmektedir. Şarj modu türleri taslak olarak Şekil 8'de görülebilir.

AC ve DC şarjlar süre bazında karşılaştırılacak olursa DC şarjların hem sağladıkları güç mikrarı bakımından hem de kısa süre içerisinde şarj edebilmeleri bakımından AC şarjlara göre ön plana çıktığı görülmektedir.



Şekil 8. Şarj modu türleri (Int. Kyn. 7)

AC ve DC doluların şarj döngüleri incelendiğinde AC şarjların hız bakımından daha düzenli bir şekilde dolup boşaldığı görülmekle beraber, DC şarjların daha hızlı dolup yavaş boşaldığı bilinmektedir. Bu iki durum Şekil 9’da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 9. AC – DC şarj eğrileri. Tüm hakları Recurrent’ a ait olup izin alınarak uyarlanmıştır, Int. Kyn. 8)

Enerji depolama sistemlerinin (EDS) doğrudan uygun akım ve gerilim seviyelerinde enerji tedarik etmesi gerektiğinden, elektrikli araçların bataryaları genellikle DC ile şarj edilmelidir. Ancak, bazı elektrikli araçların modellerinde şarjı gerçekleştirmek için alternatif akımı doğru akıma dönüştüren (AC-DC) çeviriciler de bulunabilir. Bu yöntem, çevirici nedeniyle bazı kısıtlamalara ve araç içinde ısınma riskine yol açabilir.

DC hızlı şarj istasyonları genellikle otoyol kenarları veya ticari bölgelerde bulunur ve yüksek güç seviyelerinde şarj edebilme özellikleri nedeniyle tercih edilir. Bu tür şarj istasyonları, özel konektörler kullanarak elektrikli araçların bataryalarını hızlı bir şekilde şarj etmeyi mümkün kılar. DC şarj istasyonlarının avantajları arasında hızlı şarj imkanı, enerji dönüşümünde daha az kayıp, batarya ömrünün uzaması ve güvenliğin artması bulunur. Ancak, yüksek güç talebi ve altyapı gereksinimleri gibi dezavantajları da vardır. Tablo 2’de DC şarj istasyonlarının avantajları ve dezavantajları özetlenmiştir.

Tablo 2. DC Şarj İstasyonlarının avantaj ve dezavantajları (Ghasemi-Marzbali 2022, Eze vd. 2021, Deb vd. 2021)

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"> Hızlı Şarj İmkânı Düşük ısınma eğilimi Verimlilik Uygunluk 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek maliyet Standart/kriter gereksinimi Altyapı ve yerleşim Elektrik Şebekesi Yüğü

Elektrikli araç sahiplerinin araçlarını günlük kullanımları için pratik olarak şarj etmeleri için farklı şarj sistemlerinin geliştirilmesi zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Alternatif akım (AC) şarj istasyonları, elektrikli araçların bataryalarını evlerde, iş yerlerinde, alışveriş merkezlerinde ve halka açık alanlarda güvenli bir şekilde şarj edebilmeleri için tasarlanmış istasyonlardır.

AC şarj istasyonları, elektrik enerjisini araç bataryalarına aktarmak için evlerdeki prizlerden uygun konnektörler (adaptörler) ve kablolar kullanılarak yapılır. Şarj işlemi sırasında, elektrik enerjisi aracın bataryasına aktarılırken, bataryanın güvenli bir şekilde şarj edilmesi sağlanmalıdır. Ev bağlantıları için bu işlem pratik adaptörlerle yapılırken, AC şarj istasyonları için yaygın olarak kullanılan standartlar geliştirilmiştir. Bu standartlar farklı marka ve model üreticileri için uyumlu bir şarj standardı sağlar.

AC şarj istasyonları, evlerde ve iş yerlerinde kullanım için oldukça pratiktir. Elektrikli araç sahipleri araçlarını günlük rutinlerine entegre ederek istedikleri zaman evlerinde şarj edebilirler. Bu, elektrik enerjisinin maliyeti açısından oldukça ekonomiktir ve daha fazla kişinin erişimi sağlanır. AC şarj sisteminin avantaj ve dezavantajları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. AC şarj istasyonlarının avantaj ve dezavantajları (Hannan vd. 2017, Ghasemi-Marzbali vd. 2022, Eze vd. 2021, Deb vd. 2021).

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"> Ev altyapısı ile uyumlu Daha uygun maliyet Güvenlik Yerel enerji kaynaklarından faydalanma Yavaş şarjdan dolayı batarya ömrünün uzun olması 	<ul style="list-style-type: none"> Daha düşük şarj hızı Uzun şarj süresi düşük verim Yüksek güç gereksinimi Batarya ısısının artması Standart gereksinimi ve uzun seyahatler için kullanışsızlık

3.5. Güç Kaynağına Bağlanma Şekline Göre Şarj İstasyonu Sınıflandırmaları

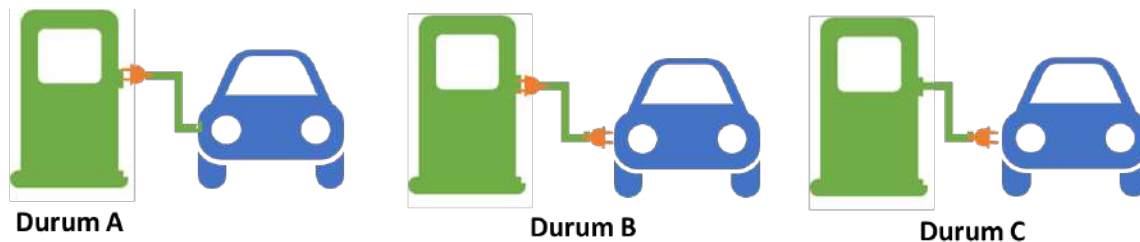
Elektrikli araçların güç kaynağına bağlanma şekline göre de bir sınıflandırma yapılmış olup üç farklı durum mevcuttur.

Durum A: Elektrikli aracın üzerinde kalıcı olarak bağlı bir kablo ve bağlayıcı ile bağlantı (araçla bütünleşik parçalar) kurulması durumudur. Özellikle küçük 4 tekerlekli araçlar veya 2-3 tekerlekli araçlarda yaygındır.

Durum B: Her iki ucunda çıkarılabilir bir kablo kullanarak bağlantı (kablo aracın veya şarj ünitesinin bir parçası değildir) kurulması durumudur, bu tip bağlantılar özellikle otomobiller ve AC şarjlı otobüsler için yaygındır.

Durum C: Şarj noktasının bir parçası olarak kalıcı olarak bağlı bir kablo ve bağlayıcı ile bağlantı (şarj ünitesinin bütünleşik parçaları) kurulması durumudur, bu tip bağlantılar özellikle DC hızlı şarj istasyonlarında yaygındır.

Üç farklı durumun gösterimi Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. Güç kaynağına bağlanma şekline göre şarj tipleri .

3.6. Lokasyonuna Göre Şarj İstasyonu Sınıflandırmaları

Yukarıdaki sınıflandırmalara ek olarak, şarj istasyonları için lokasyon bazlı sınıflandırma yapmakta mümkündür.

Ev tipi şarj: Elektrikli araçların yeniden şarj edilmesi için en yaygın yöntemdir ve Seviye 1 veya Seviye 2 şarj cihazlarını içerir. Birçok ülke, genellikle EA satın alan kişilere evlerine Seviye 2 şarj cihazı kurmaları için teşvikler sunar. Sürücülerin evde şarj yapabilme imkanı, genellikle özel, sokak dışı bir park yeri erişimine sahip olup olmadıklarına bağlıdır; bu genellikle bir garaj veya garaj önü park yeri olarak tercih edilir.

Umumi (Halka açık) şarj: Umumî şarj istasyonları, Seviye 2 ve DC hızlı şarj cihazları içerir. Seviye 2 şarj istasyonları, araç sahiplerinin uzun süreli park yaptığı yerlere konumlandırılabilir, bu yerler alışveriş merkezleri, havalimanları, oteller, devlet daireleri ve diğer işletmeler gibi yerler olabilirken, hızlı şarj cihazları daha sık olarak otoyol koridorları boyunca bulunur.

İşyeri şarjı: Evde şarj yapmaya kolay erişimi olmayan elektrikli araç sürücülerini için önemli bir çözüm sağlayabilir. İş yerinde kurulan şarj istasyonlarının en yaygın türü Seviye 2 şarj istasyonlarıdır.

3.7. Şarj Türü/Güç Kullanımına Göre Şarj İstasyonu Sınıflandırmaları

Elektrikli araçların şarj edilmesine yönelik değişik iş modelleri mevcuttur.

Batarya Değişirme İstasyonları: Tamamen veya kısmen boşalmış bir elektrikli aracın bataryasının şarj edilmiş bir batarya ile değiştirilmesi işlemi "Batarya Değişirme" olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem, elektrikli araçların hızlı ve verimli bir şekilde şarj edilmesini sağlamak ve uzun yolculuklarda veya hızlı şarj imkanı sunmayan bölgelerde kullanışlı olabilmektedir. Batarya değişirme istasyonları, sürücülere mevcut boşalmış bir bataryayı dolu bir bataryayla değişirme fırsatı sunarak uzun şarj bekleme sürelerinden kurtarmaktadır (Narasipuram ve Mopidevi,2021).

Yalnızca Şebeke Gücü Kullanan Şarj İstasyonu: DC hızlı şarj istasyonları, benzin istasyonlarına benzer ve elektrikli araçların birkaç dakika içinde şarj edildiği yerlerdir. Bu yöntem, en hızlı şarj modu olarak kabul edilmektedir, fakat şarj istasyonlarının tasarımında dikkatli bir planlama, şebekeden alınan gücün artan talebini düzenlemek için gereklidir. Şebekeden alınan gücün artan talebini düzenlemek hızlı şarjın geniş çapta kullanılması için kritik bir önem taşımaktadır.

Şebeke Gücü ve Enerji Depolama Sistemi Kullanan Şarj İstasyonu: Şarj istasyonlarında artan elektrik gücü talebi, dağıtım ağı tarafından karşılanması gereken büyük bir sorundur. Elektrik enerjisi talebinin artması, Enerji Depolama Sistemleri'nin (EDS) ihtiyacı artırır. (Dunn vd. 2011) Enerji Depolama Sistemi, sadece dağıtım ağı performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda istasyon maliyetini de etkiler. EDS, enerji talebini düzenler, istasyonların daha verimli çalışmasını sağlar ve dağıtım ağlarının stabilizasyonunu korur. Bu nedenle, EDS, şarj istasyonları ve enerji dağıtım ağı için önemli bir bileşen durumundadır.

Şebeke Gücü ve Yenilenebilir Enerji Kullanan Şarj İstasyonu: Elektrikli araçların hızlı bir şekilde yaygınlaşması, elektrik enerjisi talebinin artmasına neden olmuştur. Artan enerji talebini karşılamak için bir başka yöntem de şarj istasyonlarının tasarımında şebeke gücü ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması gerekmektedir. Güç değişimini optimize etmek ve kaliteli hale getirmek amacıyla Hızlı Elektrikli Araç Şarj İstasyonları, şebeke ile entegre edilir (Khan vd., 2019). Bu bağlamda, bir güneş fotovoltaik (PV) enerji üretim sistemi, enerji yönetimi stratejisi için hızlı şarj istasyonuna entegre edilir. Bu sistem enerji talebinin karşılanmasına ve şarj istasyonlarının sürdürülebilirliğine katkıda bulunmaktadır.

Şebeke Gücü, Yenilenebilir Enerji ve Enerji Depolama Sistemi Kullanan Şarj İstasyonu: Enerji Depolama Sistemleri, şarj istasyonlarına kurularak enerji depolama ve salımını gerçekleştirmekte ve bu sayede şebeke kaynaklı sorunları dengelemeye yardımcı olmaktadır. Enerji Depolama Sistemlerinin şarj istasyonlarına kurulması, yenilenebilir enerji üretimindeki belirsizliği azaltmaya yardımcı olmaktadır. Depolama sistemleri olarak genellikle piller kullanılmaktadır. Bu sayede elektrik enerjisi talebinin dalgalanmaları kontrol altında tutulabilmekte şebeke daha dengeli ve sürdürülebilir bir şekilde hizmet verebilmektedir

Şebeke Dışı Şarj İstasyonu: Bu tür şarj istasyonları, bağımsız olarak enerji sağlamak ve şebeke gücüne ihtiyaç duymamaktadır. Bu farklı şarj istasyonu yapılandırmaları, enerji kullanımına dayalı olarak çeşitli seçenekler sunmakta ve elektrikli araçlar için şarj altyapısının gelişmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Şebeke dışı şarj altyapısı, fosil yakıtlar ve yenilenebilir kaynaklar gibi çeşitli enerji kaynaklarının, yerel olarak elektrik üretmek ve aynı yerel sistem içinde kullanmak amacıyla bağımsız veya kombinasyon halinde kullanıldığı bir kurulumu ifade etmektedir. Bir şebeke dışı şarj altyapısı genellikle bir enerji tamponunu içermektedir, örneğin bir pil bankası, bir yakıt hücresi sistemi veya süperkondansatörler (Arabal vd., 2017), yerel olarak üretilen enerjiyi depolamak ve yönetmek için kullanılmaktadır Bu

sistem bağımsız olarak çalışmakta ve şebekeye ihtiyaç duymamaktadır. Özellikle şebekeye erişimin olmadığı bölgelerde kullanım için uygun olmakla beraber elektrikli araçları şarj etmek ve yerel enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kendi kendine yeterli bir çözüm sunmaktadır.

Mobil Şarj İstasyonları: Şarj istasyon tiplerinde son olarak da mobil şarj istasyonları ele alınabilir. Günümüzde, içten yanmalı motorlu araçlara göre elektrikli araçların sayısının oldukça düşük olması nedeniyle, sabit şarj istasyonlarının her konumda kurulması ekonomik olarak uygun değildir. Mevcut sabit şarj istasyonlarının eksikliği, menzil kaygısını ve daha uzun şarj sürelerini artırmakta ve elektrikli araçların yaygın olarak benimsenmesini yavaşlatmaktadır. Bu sorunu çözmek için mobil şarj istasyonları, elektrikli araç kullanıcılarına uygun zamanlarda ve konumlarda şarj hizmeti sunarak, elektrikli araçların benimsenmesinin daha hızlı bir şekilde gerçekleşmesine katkıda bulunabilmektedir. Mobil şarj teknolojisi genel olarak 3 türde sınıflanabilir: Kamyon mobil şarj istasyonları, taşınabilir şarj ve araçtan araca güç transferi (Afshar vd., 2021).

Kamyon mobil şarj istasyonu: Kamyon mobil şarj istasyonları (KEAŞİ), bir veya daha fazla şarj noktasına sahip olan elektrikli veya hibrit araçlar olarak düşünülebilir. Bu kamyon veya minibüs gibi araçlar, belirli bir mesafe kat ederek elektrikli araçları şarj etme işlevine sahiptir. Enerji depolama sistemleriyle donatılmış KEAŞİ'lara batarya entegreli KEAŞİ olarak tanımlanırken, enerji depolama sistemlerine sahip olmayanlara ise bataryasız KEAŞİ adı verilmektedir. Kamyon mobil şarj istasyonlarının; Bataryasız KEAŞİ, batarya entegreli KEAŞİ, robot benzeri mobil şarj cihazları ve mobil batarya değiştirme istasyonları gibi türleri de mevcuttur. Bu istasyonlar seviye 3 olarak şarj adetine bağlı 120 kW DC (Örn: 2 adet araç şarj ediliyorsa 60 kW). 7,2 kW seviye 2 şarjı sağlayabilmektedirler. Güç ölçekleri modelden modele değişkenlik gösterebilmektedir (Earl, 2018).

Taşınabilir mobil şarj istasyonu: Taşınabilir mobil şarj istasyonları (TEAŞİ), bir araç tarafından çekilen veya taşınan bir mobil Enerji Depolama Sistemi içerir ve bu, bazı KEAŞİ türlerine monte edilen enerji depolama sisteminden farklı olarak bağımsız çalışmasına olanak tanımaktadır. Yüksek kapasiteli TEAŞİ'ler, yüksek elektrikli araç şarj talebinin olduğu istenen yerlerde geçici sabit şarj istasyonları olarak çalışabilmektedir, örneğin açık hava konserleri veya spor etkinlikleri gibi yerlerde, ve sadece başka konumlara taşınabilmektedir. (Li vd. 2010). Bu istasyonların 11 kW ve 22 kW'lık güç ile 220 V ve 400 V gerilime sahip modelleri bölgesel değişiklik göstermektedir.

Araçtan araca güç transferi: Aynı benzinli araçlarda araç aküsü bittiğinde kablo ile akülerin birbirine bağlanarak birbirini şarj etmesi gibi V2V (Araçtan araca, Vehicle to Vehicle) güç transferi olarak da bilinen bu yöntemde, iki elektrikli araç arasında bir enerji değişimi yapılır. Bir başka deyişle elektrikli araçlar birbirini şarj eder. Dolu olanı boş olana elektrik enerjisi transfer eder. Bu süreçte bir elektrikli araç enerji tüketicisi olarak görev yaparken, diğeri enerji sağlayıcı olarak konumlanır (Park ve Yong, 2017). Çoğu elektrikli araç kullanıcısı, günlük işlerini tamamladıktan sonra evlerinde sadece 40-45 km yol gittikten sonra elektrikli aracını şarj eder, bu nedenle kalan batarya şarjıyla V2V şarjına katılabilmektedir (Smart ve Salisbury, 2015). Diğer mobil şarj teknolojilerine kıyasla, V2V imkanına sahip elektrikli araçlar genellikle ulaşım amacıyla sınırlı olarak kullanılmaktadır. (Dhungana ve Bulut, 2020).

Bu yönteme ek olarak kullanılmayan elektrikli araç bataryalarını otoparklarda depolama cihazları olarak kullanma fikri (Kempton ve Tomic, 2005) öne sürülmüştür.

4. ŞARJ İSTASYONLARI İÇİN YAŞAM DÖNGÜ ANALİZİ

Elektrikli araç endüstrisinde elektrik transferi sağlayan pillerin ve sabit araçların yaşam döngüsü analizi sıklıkla ele alınmaktadır. Şarj istasyonları da aynı piller veya araçlar gibi düşünülmeli ve özellikle çevresel etkilerini ve sürdürülebilirliğini incelemek için yaşam döngüsü analizi ile ele alınmalıdır.

Farklı elektrikli araçlara hizmet vermek için tasarlanmış şarj istasyonları üzerinde yapılan birçok çalışmada (Kabus vd., 2020; Lucas vd., 2012; Nansai vd., 2001; Wohlschlagel vd. 2022; Z. Zhang vd., 2017; Z. Zhang vd., 2019; Bi vd., 2015; Zhao vd., 2021; Mendoza vd., 2016) yaşam döngüsü analizi için zaman dilimi 10 ile 15 yıl arasında belirlenmiştir. Bu çalışmalarda kullanılan yöntemler ve elde edilen sonuçlar Dahlberg ve Rodriguez'in (2023) çalışmasından uyarlanarak Tablo 4'de özetlemektedir. Bu tabloda sunulan bilgilerde farklı araçlar, şarj cihazları ve kapsamların değerlendirildiği ve sonuçların da bu kapsamlara göre farklılık gösterdiği dikkate alınmalıdır. Örneğin şarj istasyonunun hizmet verdiği araç tipi veya şarj hızı/sınıfına bağlı olarak karbon eşdeğerinin değiştiği görülmektedir.

**Tablo 4.** Şarj altyapısının yaşam döngüsü analizinin için literatür özeti (Dahlberg ve Rodriguez, 2023)

Amaç ve Kapsam	Envanter Analizi	Etki Değerlendirmesi	Sonuçlar	Kaynaklar
Araç: İki tekerlekli Coğrafya: Barselona, İspanya Şarj cihazı tipi: İki soketli dış mekan şarj noktası ile altı soketli (yerleşik) bir şarj istasyonunun karşılaştırılması Zaman dilimi: 10 yıl Fonksiyonel birim: kW·sa	Yöntem: Temel akışların veya emisyonların envanteri ve ekstraksiyonlar Güç: 3,7 kW (230V AC / 16A)	Yöntem: Birincil Enerji Tüketimi ve GW	Şarj ekipmanları, şarj tesislerinin genel çevresel etkilerine en yüksek katkıyı sağlar. İkinci en yüksek katkıyı ise operasyon aşaması sağlıyor. Altı soketli dış mekan şarj noktası, iki soketli olandan daha iyi performans gösterir.	Şarj ekipmanlarının üretimi, inşaatı, nakliyesi, kurulumu, bakımı ve şarj altyapısı dahil kullanım aşaması Mendoza vd. (2016)
Araç: Elektrikli araçlar Coğrafya: Japonya Şarj cihazı tipi: Şarj cihazı standı, şarj cihazı ve akü Zaman dilimi: – Fonksiyonel ünite: 100.000 km toplam sürüş mesafesi	Yöntem: Girdi-Çıktı YDA Güç: 10-50 kW	Yöntem: Hava kirlüten emisyonlar (CO ₂ , NO _x , SO _x ve CO)	Elektrikli bir aracın altyapı dahil yaşam döngüsü çevresel yükleri CO ₂ için 0,45 t-C, NO ₂ için 2,2 kg, SO _x için 1,8 kg ve CO için 1,7 kg idi. EV'nin üretimi, sürüşü ve kurulumu, benzinli aracın üretimi ve kullanımına kıyasla daha az CO ₂ , NO _x ve CO emisyonuyla sonuçlandı.	Üretim, nakliye, kurulum Nansai vd. (2001)
Araç: Elektrikli araçlar Coğrafya: Almanya Şarj cihazı tipi: Akıllı şarj için altyapıyı içeren AC ve DC duvar kutusu. Ev kullanımı düzeyinde doğrudan şarj ile akıllı şarjı karşılaştırma. Süre: 1 yıl Fonksiyonel ünite: Özel bir aracın bir yıl boyunca şarj edilmesinin sağlanması	Yöntem: Temel akışların veya emisyonların ve ekstraksiyonların envanteri Güç: 10-50 kW	Yöntem: Küresel Isınma	AC ve DC duvar tipi kutunun işletme ve üretim aşamaları Küresel Isınmaya en büyük payı sağlamaktadır.	Üretim, taşıma, işletme ve kullanım ömrü sonu Wohlschlager vd., (2022)
Araç: Otobüs Coğrafya: Sidney, Avustralya Şarj cihazı tipi: Harici hızlı şarj cihazı Zaman: - Fonksiyonel birim: kgCO ₂ -eşd./kW·sa veya kgCO ₂ -eşd./kg. Operasyonda şu şekilde tanımlanır: kgCO ₂ -eşd./100 km	Yöntem: Temel akışların veya emisyonların ve ekstraksiyonların envanteri Üretim aşaması için girdi-çıktı yaklaşımı Güç: 350kW'a kadar	Yöntem: Küresel Isınma	İşletme aşaması, sera gazı emisyonlarına en fazla katkıda bulunan aşamadır. Daha sonra bunu üretim, geri dönüşüm ve imha, kurulum ve nakliye takip etmektedir.	Üretim, nakliye, kurulum, işletme ve hizmetten çıkarma Zhao vd. (2021)
Araç: Elektrikli araçlar Coğrafya: Belçika Şarj cihazı tipi: Endüktif ve iletken teknolojilerin karşılaştırılması. Süre: 14 yıl / 10000 km/yıl sürüş Fonksiyonel birim: kW·sa	Yöntem: Temel akışların envanteri veya emisyonlar ve ekstraksiyonlar Güç: 3,7 kW, 22 kW ve 50 kW	Yöntem: ReCiPe (orta nokta ve son nokta)	Endüktif şarj sistemi, daha az verimli olduğundan daha fazla elektrik tükettiği için iklim değişikliğine etkisi daha yüksek	Üretim aşaması, kullanım aşaması ve yaşam sonu aşaması Zhang vd. (2017)
Araç: Elektrikli araçlar Coğrafya: Çin Şarj cihazı tipi: AC ev ve genel şarj cihazları, DC genel şarj cihazı Süre: 8-12 yıl Fonksiyonel birim: kW·sa	Yöntem: Temel akışların veya emisyonların ve ekstraksiyonların envanteri Güç: 7, 40, 60-360 kW	Yöntem: Kümülatif Enerji Talebi ve Küresel Isınma	Yaşam aşamaları boyunca çevresel etkilerin çoğuna kullanım aşaması neden olur; bu da kullanım aşamasındaki elektrik kaybının önemli bir etken olduğunu göstermektedir.	Bertaraf için kaynak çıkarma Zhang vd. (2019)

Tablo 4. Şarj altyapısının yaşam döngüsü analizinin için literatür özeti (Dahlberg ve Rodriguez, 2023) (Devamı)

Amaç ve Kapsam	Envanter Analizi	Etki Değerlendirmesi	Sonuçlar	Kaynaklar
Araç: Otobüs Coğrafya: Michigan, ABD Şarj cihazı türü: Yerleşik takılabilir şarj cihazının, yerleşik kablosuz şarj cihazıyla karşılaştırılması Zaman dilimi: 12 yıl Fonksiyonel ünite: 67 otobüs – 48.034.407 araç kilometresi	Yöntem: Envanter temel akışlar veya emisyonlar ve ekstraksiyonlar Güç: 60kW	Yöntem: Kümülatif enerji talebi ve küresel ısınma	Kablosuz şarj sistemi %0,3 daha az enerji tüketir ve toplam yaşam döngüsünde fişli şarj sistemine göre %0,5 daha az sera gazı yayar. Kullanım aşamasındaki elektrik tüketimi, yaşam döngüsü enerji talebine ve sera gazı emisyonlarına hakim olup, Kümülatif Enerji Talebi ve Küresel Isınma'nın yaklaşık %97-98'ini oluşturmaktadır. Şarj cihazı üretimi: - Eklenti: 0,075 TJ ve 4,56 t CO ₂ -eşd. - Kablosuz şarj cihazı: 0,018 TJ ve 1,03 t CO ₂ -eşd.	Malzeme çıkarma, şarj cihazları ve pillerin imalatı ve kullanım aşaması. Bi vd. (2015)
Araç: Elektrikli araçlar Coğrafya: Almanya Şarj cihazı türü: Evde araç içi şarj ve halka açık araç dışı şarj. Zaman dilimi: 10 yıl Fonksiyonel birim: kW-sa	Yöntem: Temel akışların veya emisyonların envanteri ve ekstraksiyonlar Güç: 3,7 kW, 22 kW OnBC ve 50 kW OffBC	Yöntem: ReCiPe 2016 (orta nokta)	Kullanım aşaması, AC sistemi için 12 etki kategorisindeki çevresel etkilerin %50'sinden fazlasından sorumludur. DC sisteminde, üretim sırasında yalnızca maden kaynaklarının tükenmesi hakimken, diğer tüm çevresel etkiler esas olarak kullanım aşamasında ortaya çıkmaktadır.	Bazı şarj altyapılarını da içeren üretim, taşıma ve kullanım aşaması Kabus vd. (2020)

5. ŞARJ İSTASYONU ALTYAPISI ve YÖNETİMİ

Elektrikli araç şarj altyapısı ve şarj istasyonların planlanması ve bu şarj istasyonlarının şebeke bağlantısı elektrikli araçların yaygınlaşması için en önemli zorluklardan biridir. Şarj altyapısının yaygınlığı ve sunduğu hizmet düzeyi, kullanıcıların elektrikli araç tercihini belirleyen en önemli faktörlerin başında gelmektedir. Bu nedenle dünyada ve Türkiye'de şarj istasyonu altyapısı gelişmektedir ve son yıllarda şarj istasyonu sayılarında hızlı bir artış gözlenmektedir.

Şarj istasyonları ve elektrikli araçlar yüksek voltaj ihtiva etmektedir, buna bağlı olarak oluşabilecek risklere karşı doğru ekipman, metodoloji ve eğitimli uzmanlar ile kurulum ve bakımlarının yapılması da oldukça kritiktir. Bu bağlamda ülkemizde kurulu şirketler de bulunmaktadır. Örneğin, E-Autotrek Otomotiv, elektrikli araçlar şarj istasyonu güvenliği ve şarj istasyonu kurulumuna yönelik çözümler üreten ve Li iyon batarya yangın çözümlerine yönelik çözümler sunan ve eğitimler veren şirketlerden biridir. İlave olarak; Elektronik Şarj Sistemleri firmasını da elektrikli araç şarj pazarında şarj ağı operatörlerine "Beyaz etiket (White Label)" modeli ile uçtan uca (e2e) yazılım (CMS ve mobil), EA şarj cihaz ve kurulumu, arıza ve bakım, müşteri hizmetleri (CallCenter), danışmanlık ve eğitim konularında hizmet veren şirketler arasında örnekleyebiliriz.

Unutulmamalıdır ki elektrikli araçlarda kullanılan lityum, su ile temas ettiğinde yanmaya başlar. Bunun yanında geleneksel yangın söndürücüler yani ABC (Kuru Kimyevi), CO₂, metal yangın söndürücüler vb. Li iyon bataryalarda etkili değildir. Bu tarz Li iyon açık batarya yangınlarında çevreye dost özel yangın söndürücüler kullanılmalıdır. Li iyon batarya alev aldıktan belirli süre sonra "Termal Kaçış'a geçer ve sıcaklıklar çok yüksek seviyelere tırmanır. Bu tarz batarya yangınlarında bir diğer çözüm 800-2.000 °C aralığında çalışan özel yangın battanierleridir.

Son yıllarda yollarda artan elektrikli araç adedi nedeniyle olası kaza durumunda ortaya çıkabilecek yangınlarda itfaiye personelleri de belediyeler tarafından eğitime başlanmıştır. Buna ek olarak sürücülerin bu konuda bilgilendirilmeleri satıcı firmalar tarafından gerçekleştirilmektedir.

Şarj istasyonlarında da batarya sarj edildiği için alınması gereken yangın önlemleri kritiktir. Özellikle sarj istasyonları özellikle DC istasyonlar sürekli termal kamera ile gözlenmeli ve olası bir batarya ısınması durumunda aracın üzeri 6x8m 800-1.500 °C'de çalışan yangın battanierleri ile örtülmelidir. Bu örtme işlemi sırasında bataryadan çıkan zehirli gazlardan korunmak için solunum setleri ve özel KKD donanımları kullanılmalıdır. Yukarıda bahsedilen Li iyon yangın söndürücüler batarya aracın üzerindeyken kullanılırsa çok etkili olmayacaktır. Bunların etkinliği tamamen bataryaya teması ile paraleldir ancak bu tarz yangınlarda bataryanın dış koruması dolayısıyla iç kısma ulaşmak neredeyse imkansızdır.

28 Temmuz 2023 tarihli Resmi gazete kararında İşyeri Açma ve Çalışma Ruhsatlarına İlişkin Yönetmelik'te yapılan değişiklik içeren düzenlemeye göre, "elektrikli araç şarj istasyonu alanı" olarak ayrılmış parsellerde kurulacak müstakil elektrikli araç şarj istasyonları için iş yeri açma ve çalışma ruhsatı gerekliliği düzenlenmiştir. Diğer iş yerlerinde ve toplu yapıların içinde faaliyet gösterecek olan elektrikli araç şarj istasyonları için yetkili idarelerce yer seçimi yapılmaktadır ve

faaliyet izin belgesi gerekliliği düzenlenmiştir. Elektrikli araç şarj istasyonlarına ait iş yeri açma ve çalışma ruhsatları ile yer seçimi ve faaliyet izin belgeleri, büyükşehirlerde büyükşehir belediyesi tarafından verilmektedir.

Şarj istasyonlarının yönetiminde ise e-Hareketlilik Hizmet Sağlayıcıları (EMSP veya bazen EMP) ve Şarj Noktası Operatörleri (ŞNO) yer alır. Bir e-mobilite hizmet sağlayıcısı, elektrikli araç sürücülerine elektrikli araç şarj hizmeti sunan şirkettir. Bir EMSP, bir coğrafi bölgedeki birden fazla şarj noktasına erişim sağlayarak müşterileri (elektrikli araç sürücülerini) için değer yaratır. Şarj Noktası Operatörü (ŞNO) ise şarj noktaları havuzunu işleten şirkettir. Şarj Noktası Operatörleri ve Şarj Noktası Sahipleri, rolleri tamamen benzer olmasa da genellikle ŞNO'lar olarak anılır.

Şarj noktası sahibi, toplam şarj altyapısı içinde bunun belirli bir bölümüne sahiptir. Bir şarj noktası operatörü ise şarj noktası sahibinin, e-Hareketlilik hizmet sağlayıcısı ile bağlantısını sağlar. Bazı durumlarda bir operatör aynı zamanda şarj altyapılarının sahibi de olabilir, veya bunun tersi de geçerli olabilir. EMSP'ler ve ŞNO'lar şarj ağının iki önemli ve birbirine bağımlı unsurudur. Birlikte EA şarj istasyonlarını kurar ve yönetirler. Her iki rolün kendine özgü sorumlulukları vardır.

Bir e-mobilite sağlayıcısının birincil sorumluluğu, elektrikli araç sürücülerinin şarj istasyonlarını bulmasına yardımcı olmak, sorunsuz bir şarj deneyimi ve farklı ödeme yöntemleri sunmaktır. EMSP'ler genellikle yalnızca kayıtlı müşterilere hizmet verir, ancak bazen yerel yasaların zorunlu kıldığı gibi, kayıtlı olmayan kullanıcılara da erişim izni verebilirler.

Dahası, EA Şarj dolaşımı veya kısaca eRoaming, elektrikli araç sürücülerinin tercih ettikleri EMSP tarafından yönetilen tek bir müşteri hesabıyla herhangi bir şarj istasyonunda şarj etmelerini sağlar. E-Dolaşım özellikleri, son kullanıcı deneyimini büyük ölçüde iyileştirdiğinden önemlidir. Tıpkı yurtdışına seyahat ederken telefonunun kullanılmasına devam edildiği ve yerel ağlar üzerinden bağlanıldığı gibi, elektrikli araç dolaşımı da elektrikli araç sürücülerinin araçlarını diğer elektrikli araç şarj ağları üzerinden şarj etmelerine olanak tanır. EMSP'ler için e-dolaşım aynı zamanda, ağlarını başlangıçta diğer şarj ağlarına kayıtlı elektrikli araç sürücülerine açarak potansiyel kullanıcı tabanını genişletmek anlamına da gelmektedir.

EA Şarj Dolaşımı süreçleri kullanıcı ve ŞNO'lar açısından farklı şekilde detaylandırılabilir. Kullanıcının bakış açısından, seçtiği EMSP'den hesabına bağlı bir EA Şarj mobil uygulaması vardır. Bu uygulamada, yakındaki ücretsiz veya iyi şarj tarifeleri sunan şarj istasyonlarını arar. Daha sonra kendisi için o an en uygun olanı seçer. Ödeme sonrasında, ücretlendirme kredi kartından tahsil edilir veya hesap bakiyesine eklenir. Çoğu durumda ayda bir kez faturalandırılır.

ŞNO ve EMSP'ler için bu biraz daha zordur. Diğer ağlarda şarj işlemini etkinleştirmek veya tam tersini sağlamak için diğer ağların ŞNO'larıyla ortaklık kurmaları gerekir. En azından uyumlu EA Şarj yönetim yazılımına ve çeşitli veri paylaşımına sahip olmaları gerekir. Bunun için Eşler arası (P2P) Elektrikli Araç Dolaşımı ortaklığı oluşturulabilir. Bu durumda, iki ŞNO veya EMSP, Açık Şarj Noktası Arayüzü (OCPI) protokolü üzerinden eşler arası iletişimi kullanırlar. Ancak, dünya çapında bu kadar çok şarj ağı varken, ŞNO'ların veya EMSP'lerin diğer tüm şarj ağı sağlayıcılarıyla ortaklık kurması, mali şartlar üzerinde anlaşmaya varması ve teknik uygulamayı halletmesi neredeyse imkansızdır. Bu amaçla e-Dolaşım ağları ortaya çıkmıştır. Elektrikli araç şarj ağları veya Hubeject gibi eDolaşım merkezleri, teknik entegrasyon ve EA şarj iş modelleri için uyumlu hale getirilmiş "kurallara" sahiptir. Bir ŞNO veya EMSP bir eDolaşım ağına katılırsa, kullanıcıları aynı zamanda üye olan tüm EA şarj ağlarına anında erişim elde eder.

Bir ŞNO'nun ana sorumluluğu, elektrikli araç şarj ağının günün her saati çalışır durumda, kullanılabilir ve istikrarlı olmasını sağlamaktır. Bunun için şu operasyonları gerçekleştirir:

- Düzenli uzaktan ve yerinde bakım,
- Hataları teşhis etmek,
- Fiyat ayarları,
- Gelecek ihtiyaçlar doğrultusunda geliştirme,
- ve diğer bir sorumluluk da ölçeklenebilirliği sağlamaktır.

Bir EMSP'nin ana sorumlulukları aşağıda listelenmiştir:

- EA şarj istasyonları havuzuna erişim sağlanması,
- Bir EA şarj mobil uygulaması geliştirmek,
- Ödemeleri yönetme,
- e-Dolaşıma erişim sağlama,
- EA sürücüsü yardım hattına erişim sağlanması,
- EA sürücüsü deneyimini sürekli olarak iyileştirmek.

Öncelikle şarj noktalarının güncel ISO 15118 gibi en son endüstri standartları ve protokolleriyle uyumlu olmasını sağlamaları gerekmektedir. ŞNO'ler, çift yönlü şarj ve V2G (Araçta Şebekeye, Vehicle to Grid) teknolojisi gibi akıllı enerji yönetimi sistemleriyle entegrasyonu sağlayarak operasyonları geliştirebilirler

Şarj istasyonu yönetimiyle ilgili yukarıda anlatılan ilişkiler EA ekosistemi içinde Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Elektrikli araç ekosistemi .

6. DÜNYADAKİ ŞARJ ALTYAPISI

Elektrikli araç pazarı genişledikçe, halka açık şarj altyapısına erişim de genişlemelidir. Günümüzde elektrikli araç şarj talebinin büyük çoğunluğu evlerde ve işyerlerinde yapılan şarj işlemleri ile karşılanmaktadır. Tüketiciler, elektrikli araçların şarj edilmesi için sunulan imkanlar kapsamında, konvansiyonel araçların yakıt ikmalinde olduğu gibi benzer seviyede basitlik, özerklik ve erişilebilirlik beklemektedir. Özellikle nüfusun yoğun olduğu şehir bölgelerinde, ev şarjına daha sınırlı erişim olduğu yerlerde, halka açık şarj altyapısı, EA benimsemesi için temel bir faktördür.

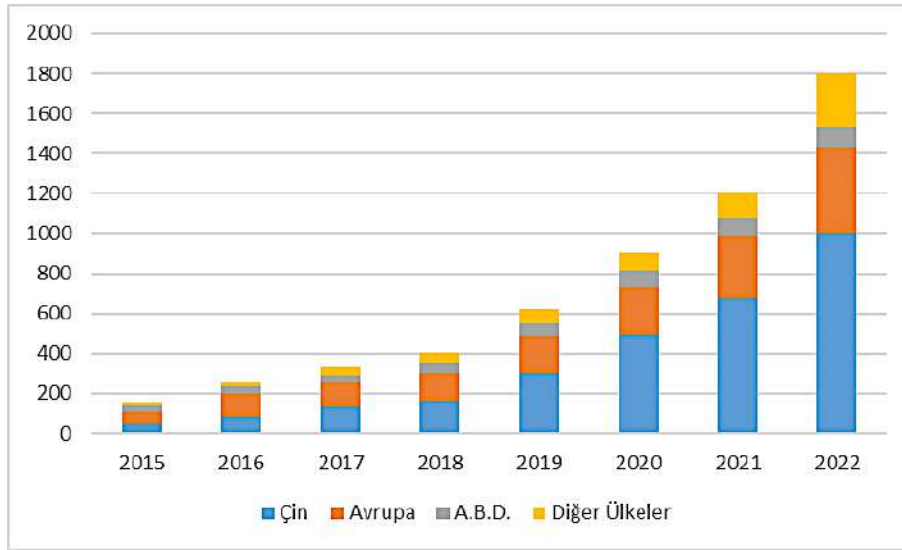
Uluslararası Energy Ajansı'nın (International Energy Agency, IEA) raporuna göre 2021 yılında dünya genelinde halka açık şarj istasyonlarının sayısı üçte biri hızlı şarj olmak üzere 1,8 milyona yaklaşmıştır. Yalnızca 2021 yılı içerisinde yaklaşık 500.000 şarj istasyonu eklenmiş olup, bu sayı 2017'de mevcut olan toplam halka açık şarj istasyon sayısının üzerine çıkmıştır. Halka açık şarj istasyonlarının sayısı ise 2021'de % 37 oranında artığı görülmüştür. 2022 yılının sonunda ise dünya genelinde 2,7 milyon halka açık şarj istasyonu bulunmaktadır, bu şarj istasyonlarının yaklaşık 900.000'i 2022'de kurulmuş olup, yıllık % 55'lik bir artışı temsil etmektedir. 2015-2019 arasındaki yıllık büyüme oranı olan % 50'ye benzer bir durumu yansıtmakta, 2020 yılındaki pandemi nedeniyle gerçekleşen görece yavaşlama eğiliminin son bulduğu görülmektedir (Int. Kyn. 9, Int. Kyn. 10, Int. Kyn. 11)

Önceki yıllarda olduğu gibi Çin, halka açık şarj istasyonlarının sayısı konusunda küresel liderliğini sürdürmektedir. 2021 yılı itibarıyla Dünya genelindeki hızlı şarj istasyonlarını %85'ine ve yavaş şarj istasyonlarının % 55'ine ev sahipliği yapmaktadır (Int. Kyn. 9, Int. Kyn. 10, Int. Kyn. 11)

6.1. Dünyada Yavaş Şarj İstasyonları

Şekil 12’de 2021 yılında, Çin’deki yavaş şarj istasyonlarının sayısı, halka açık olarak yaklaşık 680.000 birim olacak şekilde % 35 artmış olup bu miktar 2018’de mevcut olan yavaş şarj istasyonlarının sayısının dört katından fazladır. Küresel olarak, 2022’de 600.000’den fazla halka açık yavaş şarj istasyonu kurulmuş olup, bunların 360.000’i Çin’de bulunmaktadır ve bu durum da ülkedeki yavaş şarj istasyonlarının sayısını toplam 1 milyondan fazla olduğu anlamına gelmektedir. 2022’nin sonunda, Çin dünya genelindeki halka açık yavaş şarj istasyonlarının yarısından fazlasına sahip durumdadır. Bu üstünlük, Çin’in elektrikli araç sektöründeki liderliğini ve yoğun nüfuslu kentsel özelliklerini yansıtmaktadır (Int. Kyn. 9, 10 ve 11).

Avrupa, 2021’de 300.000’in üzerinde yavaş şarj istasyonuna sahip iken bu rakam 2022 yılında % 50’ye yakın bir artışı ile 460. 000’e yükselmiştir. Avrupa’da Hollanda, 115.000’den fazla yavaş şarj istasyonuna sahip olarak lider konumda bulunurken ve onu 74.000 ile Fransa, 40.000 ile Almanya, 64.000 ile Birleşik Krallık, 31.000 ile İtalya takip etmekte, Norveç ile İsveç’te ise bu sayı 15.000 civarındadır. Amerika Birleşik Devletleri’ndeki yavaş şarj istasyonlarını stoku 2022’de % 9 artmış olup bu değer bu büyük pazarlar arasındaki en düşük büyüme oranıdır. Kore’de, yavaş şarj istasyonu stoku yıllık %100 artarak 184.000 adet şarj istasyonuna ulaşmıştır (Int. Kyn. 9, 10 ve 11).



Şekil 12. Dünyadaki bazı ülkelerde halka açık yavaş şarj istasyonlarının 2015-2022 yıllarına göre değişimi
(Birim: 1.000 adet, (Int. Kyn. 9: IEA (2021), Global EV Outlook 2021, IEA, Paris
<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>, Licence: CC BY 4.0)

6.2. Dünyada Hızlı Şarj İstasyonları

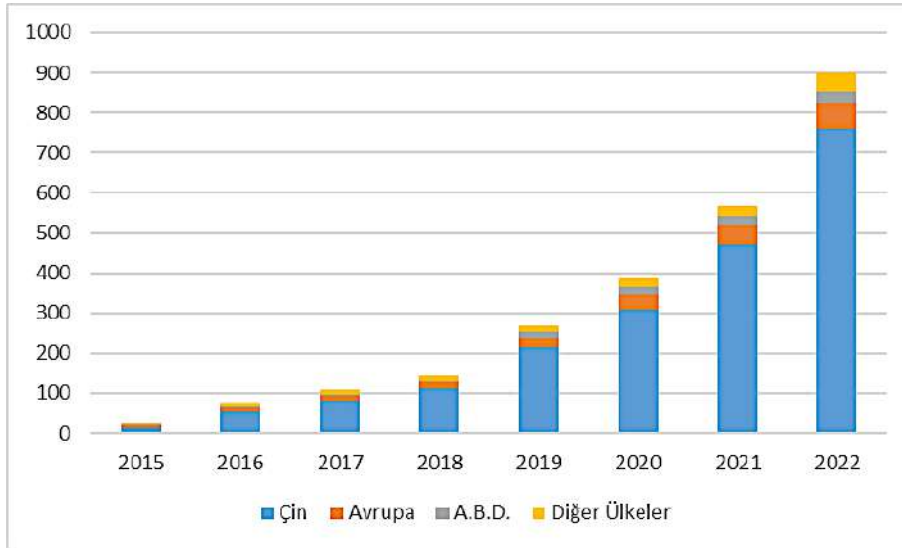
IEC’nin son yıllardaki raporları incelendiğinde, halka açık hızlı şarj noktalarının arttığı açıkça görülmektedir. Bu şarj noktalarından özellikle otoyollar boyunca bulunanlar daha uzun yolculukları mümkün kılmakla beraber, yaygınlaştıkça, özel şarj erişimine sahip olmayan tüketicilerin elektrikli araç satın almasını daha da teşvik edecek ve EA benimseme için bir engel olan menzil endişesini ortadan kaldıracaktır. Yavaş şarj istasyonları gibi, halka açık hızlı şarj istasyonları da hususi şarj istasyonlarına erişimi olmayan kullanıcılara şarj çözümleri sunarak, nüfusun daha geniş kesimlerinde EA benimsemesini teşvik edebilmektedir (Int. Kyn. 9, 10 ve 11).

Hızlı şarj noktalarının sayısı 2022’de küresel olarak 330.000 artmasına karşın, bu büyümenin % 90’a yakın bir kısmı Çin’de görülmüştür (Bknz. Şekil 13). Hızlı şarjın yaygın bir şekilde dağıtılması, yoğun nüfuslu şehirlerde ev şarjına erişimin eksikliğini telafi etmektedir ve Çin’in EA kullanımını hızla yaygınlaştırma hedeflerini desteklemektedir. Çin’de 2021 yılında 470.000 olan hızlı şarj noktası sayısı, 2022 yılında 760.000’e yükselmiştir, fakat toplam halka açık hızlı şarj noktasının %70’ten fazlası sadece 10 ilde bulunmaktadır. Ayrıca halka açık şarj ünitelerinin % 40’ından fazlası hızlı şarj noktalarıdır, bu diğer büyük EA pazarlarından oldukça yüksektir. Çin’de hızlı şarj noktalarının hızlı bir şekilde kurulmasının arkasındaki faktörlerin başında hükümet teşvikleri ve kamu hizmetleri tarafından aktif bir altyapı geliştirmesi gelmektedir. Elektrik fiyatları üzerindeki düzenleyici kontroller, kentsel yaşayanlardan gelen halka açık şarj talebinin yanı sıra taksilerin, sürüş –paylaşımı (ride-sharing) ve lojistik filolarının artan elektrifikasyonu, EA şarj işletmelerinin karlılığını artırmıştır. Buna ek olarak, elektrikli araç tedarik ekipmanları dağıtımının büyük hızı ve ölçeği,

hızlı şarj istasyonları için şarj modülü üretim maliyetlerinde 2016 ile 2019 arasında % 67'lik bir azalmaya neden olmuştur (Int. Kyn. 9, 10 ve 11).

2020 yılında Avrupa'nın hızlı şarj istasyonu kurulumları yavaş şarj istasyonlarına göre önemli ölçüde fazlayken, bu durum 2021 yılında başa baş seviyesinde seyretmiştir. Avrupa'daki halka açık hızlı şarj istasyonlarının sayısı 2021 yılında yaklaşık 50.000 adet olup bu sayı 2022 yılında %50 artarak 70.000'e ulaşmıştır. En büyük hızlı şarj noktası stoklarına sahip olan ülkeler Almanya (12.000'in üzerinde), Fransa (9.700) ve Norveç (9.000) olarak sıralanmaktadır. Avrupa Birliği genelinde kamu şarj altyapısını daha da geliştirme konusunda açık bir hedef belirlenmiş olup, mevcut hedef doğrultusunda önerilen Alternatif Yakıt Altyapısı Yönetmeliği (AFIR) oluşturulmuştur. Bu düzenleme ile trans-Avrupa ağ-ulaştırma (TEN-T) üzerindeki elektrikli şarj kapsama gereksinimleri belirlenecektir. Avrupa Yatırım Bankası ile Avrupa Komisyonu arasında yapılan bir anlaşma ile 2023 sonuna kadar elektrikli hızlı şarj da dahil olmak üzere alternatif yakıt altyapısı için 1,5 milyar €'nun üzerinde bir fonun temin edileceğini belirtilmiştir (Int. Kyn. 9, 10 ve 11).

ABD'de 2021 yılı itibarıyla yaklaşık 22.000 hızlı şarj istasyonu bulunurken, bu rakam 2022 yılında ek olarak kurulan 6.300 istasyon ile 28.000'e ulaşmıştır. Bu istasyonların yaklaşık %75'i Tesla süper şarj cihazlarıdır. Şarj noktalarının inşasının, Şarj Altyapısı için Ulusal Elektrikli Araç Formül Programı (NEVI) onayının ardından önümüzdeki yıllarda hızlanması beklenmektedir. Bu programda tüm ABD eyaletleri, Washington DC ve Porto Riko yer almakta olup 2023 yılı için 122.000 km otoyol boyunca şarj istasyonlarının kurulumunu desteklemek üzere 885 milyon \$ tahsis edilmiştir. Ayrıca, ABD Federal Karayolu İdaresi, federal fonla finanse edilen elektrikli araç şarj cihazları için tutarlılık, güvenilirlik, erişilebilirlik ve uyumluluk sağlamak amacıyla yeni ulusal standartlar açıklamıştır. Yeni standartlar sonucunda Tesla, ABD'deki toplam hızlı şarj noktası stokunun %60'ını oluşturan Süper Şarj cihazlarının bir kısmını ve Varış Yeri Şarj ağını Tesla olmayan elektrikli araçlara açma kararı almıştır (Int. Kyn. 9, 10 ve 11).



Şekil 13. Halka Açık Hızlı Şarj İstasyonlarının 2015-2022 Yıllarına Göre Değişimi (Birim: 1.000 adet), (Int. Kyn. 11: IEA (2023), Global EV Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0)

6.3. Dünyada Şarj İstasyonu Başına Düşen Araç Sayısını Belirleyen Faktörler

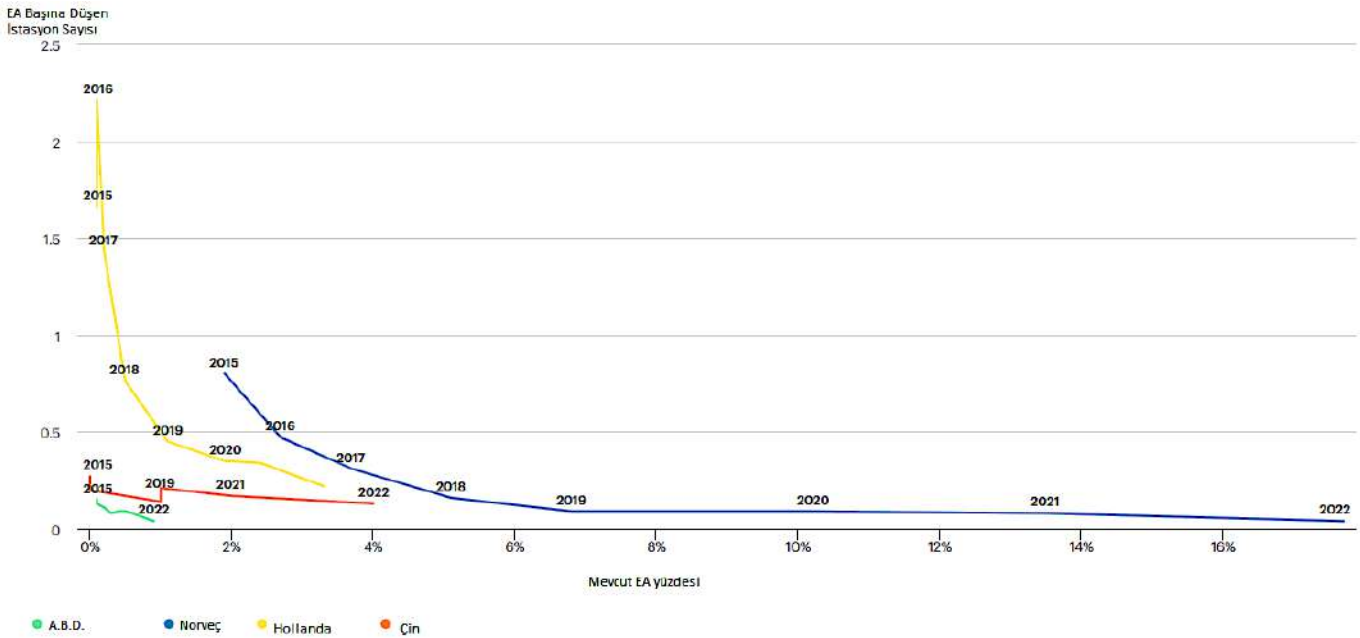
2021 yılında EA satışları önceki yıllara göre iki katına çıkarak dünya genelinde toplam elektrikli araç sayısının yaklaşık 16,5 milyona yükselmesini sağlamış olup, 2018'deki elektrikli araç stokunun üç kat yükselmesine tekabül etmiştir. Buna karşın yalnızca 2022 yılında 10 milyonu aşkın elektrikli araç satışı gerçekleşmiştir. Aynı zamanda halka açık şarj noktalarının sayısı da yaklaşık 1,8 milyon adet olarak üç katına yükselmiştir. Elektrikli araç satışlarındaki mevcut momentum, ancak nüfusun daha büyük bir bölümünün uygun ve ekonomik şarj altyapısına, hem halka açık hem de özel şarj noktalarına (evlerdeki ve işyerlerindeki şarj noktalarına) erişimi olduğunda sürdürülebilir. Hükümetlerin şarj altyapısının dağıtımını kolaylaştırmaya ve engelleri en aza indirmeye devam etmeleri gerekmektedir.

Elektrikli araç sayısı arttıkça, şarj cihazı başına düşen elektrikli araç oranı, şarj ağının uygunluğunu değerlendirmeye yardımcı olabilmektedir. Elektrikli araç başına düşen şarj cihazı gücü (kilowatt, kW) bir başka gerekli ölçek olarak kabul edilmektedir. Hızlı şarj cihazları yavaş şarj cihazlarına kıyasla daha fazla elektrikli araca hizmet verebilmektedir, bu

nedenle şarj cihazı başına düşen optimal elektrikli araç sayısı, konut stoku, ortalama seyahat mesafesi ve nüfus yoğunluğu dahil bir dizi faktöre bağlı olabilmektedir. Dolayısıyla optimal bir erişim ölçüsü belirlemek kolay değildir. Soketli/Fişli Hibrit Elektrikli Araç kullanıcıları, bataryalı elektrikli araçlara göre halka açık şarj altyapısına daha az bağımlı olsalar da, şarj noktalarının yeterli düzeyde bulunabilirliği ile ilgili halka açık Soketli Hibrit Elektrikli Araç şarjını da içeren politikalar teşvik edilmelidir.

Çoğu ülke için gözlemlenen durum, elektrikli araç stok payı arttıkça, şarj noktası başına elektrikli araç sayısı azalmasıdır. Elektrikli araç benimsenmesini sağlamak için halka açık şarj altyapısının yaygınlaşması kritik bir önem arz etmektedir. Örneğin, Norveç'te 2011'de her bir halka açık şarj noktasına yaklaşık 1,3 adet elektrikli hafif ticari araç düşmekteyken, 2022'nin sonunda bataryalı elektrikli araç kullanım oranının %17'yi aşmasıyla halka açık şarj noktasına düşen hafif ticari elektrikli araç sayısı 34 olmuştur. Genel olarak, hafif ticari elektrikli araç stok payı arttıkça, araç başına şarj noktası oranı azalmaktadır. Elektrikli araç satışlarındaki büyüme, ancak şarj talebinin erişilebilir ve uygun altyapı tarafından karşılanması durumunda sürdürülebilir. Bu da evlerde veya işyerlerinde özel şarj, ya da halka açık şarj istasyonlarının uygun altyapı doğrultusunda yaygınlaşması aracılığıyla gerçekleşebilir.

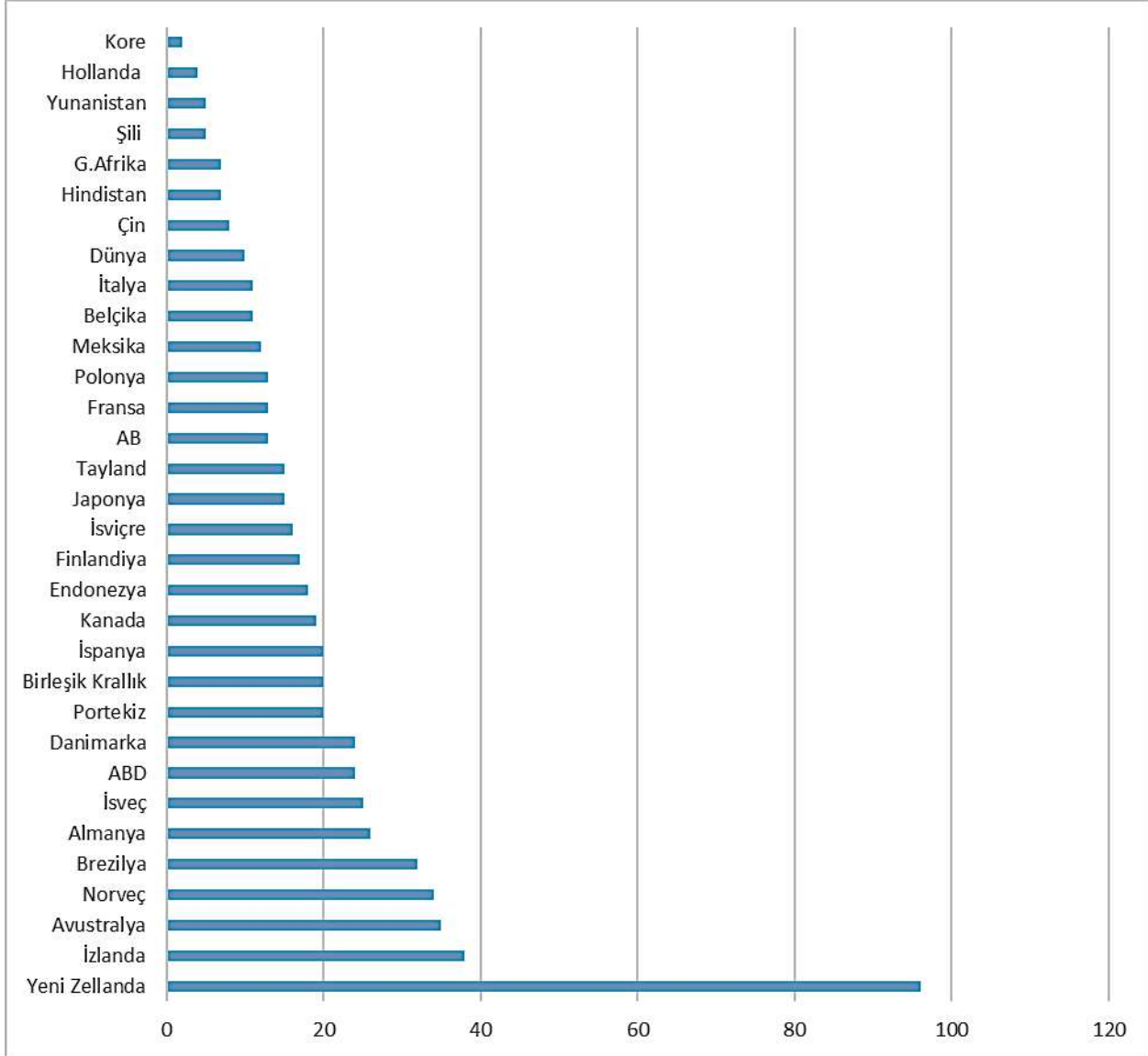
Şarj istasyonu başına düşen elektrikli araç sayısının optimal seviyesi, yerel koşullar ve sürücü ihtiyaçlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir (Bknz. Şekil 14). 2015-2021 döneminde Çin, Kore ve Hollanda'da elektrikli araç başına şarj noktası oranı 10'un altında kaldığı ve nispeten düz bir eğri gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, şarj altyapısının elektrikli araç stok büyüme hızına uygun bir şekilde dağıtıldığını göstermektedir.



Şekil 14. Seçili Ülkelerde Elektrikli Araç Kullanım Oranının Yıllar İçerisinde Elektrikli Araç Başına Düşen Şarj İstasyonu Sayısına Yansımaları (Int. Kyn. 11: IEA (2023), Global EV Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0)

Norveç ve Amerika Birleşik Devletleri pazarları, yüksek oranda şarj için aile meskenleri kullanıldığından bu ülkeler genel olarak ev şarjına bağımlıdır. Ancak, ev şarj cihazı kurma fırsatına sahip aile evlerinin çokluğundan dolayı ev şarjının yaygın olarak bulunduğu bu pazarlarda halka açık şarj istasyonu başına düşen elektrikli araç sayısı da yüksek olabilir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde elektrikli araç sayısı, halka açık şarj istasyonlarının sayısını aşmış olup 2021 yılında şarj başına yaklaşık 18 elektrikli araç bulunduğu görülmüş ve bu oran 2022'de 24'e yükselmiştir. Benzer bir eğilim Norveç'te de gözlemlenmiştir; 2010'ların başlarında şarj istasyonu başına birkaç elektrikli araç düşmesine karşın, 2022'de bu oran 30'un üzerine çıkmıştır. Birçok ülkede elektrikli araçların pazar payı arttıkça, halka açık şarj, bu ülkelerde de özel ev veya işyeri şarj seçeneklerine erişimi olan sürücüler tarafından da desteklenecektir.

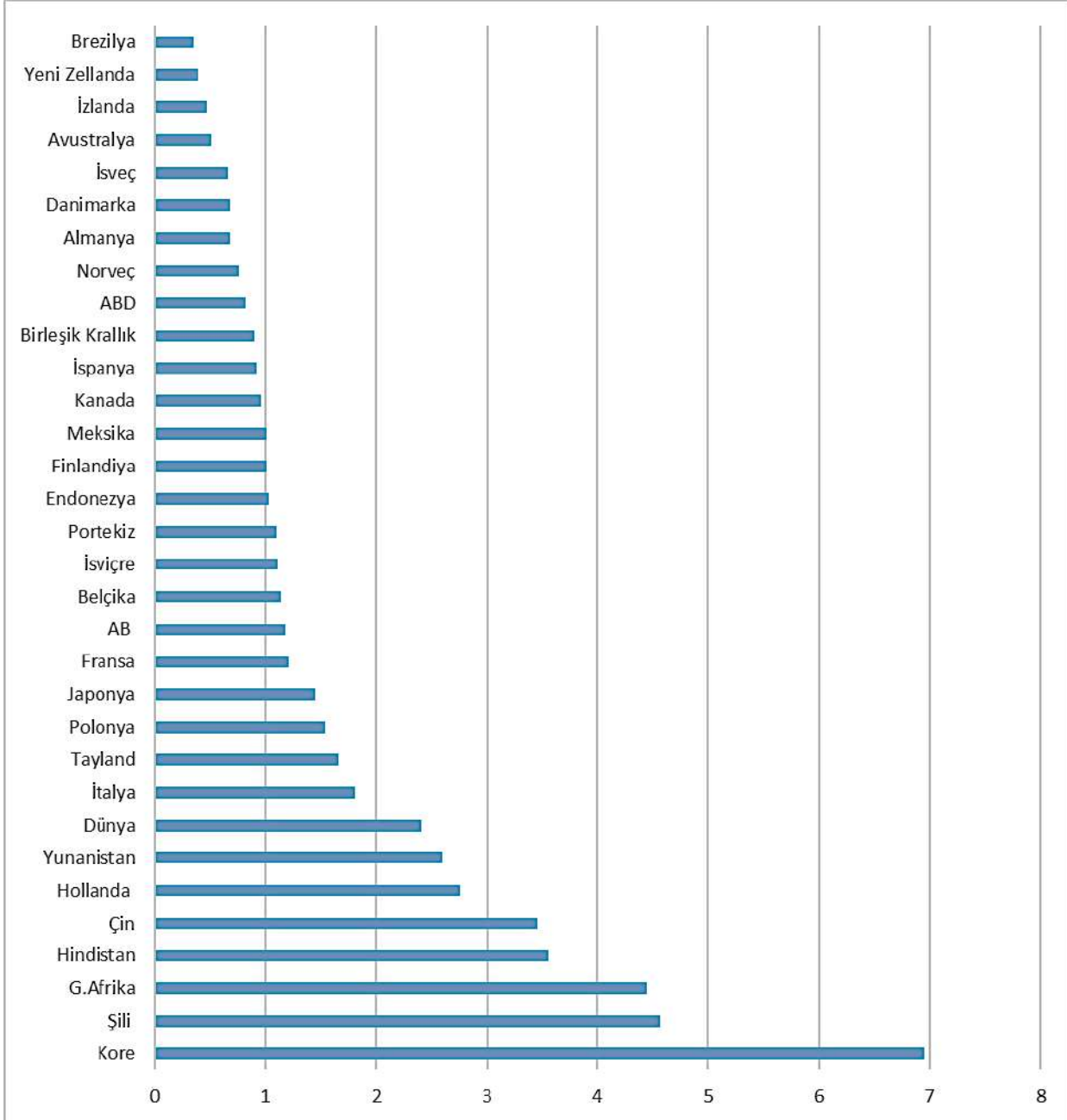
Avrupa Birliği'nde, 2014 Alternatif Yakıt Altyapı Direktifi (AFID), halka açık elektrikli araç şarj ekipmanının dağıtımını düzenlemektedir. Bu kapsamda AB üye devletlerinin 2020'ye halka açık şarj istasyonu başına 10 elektrikli hafif ticari araca ulaşılması önerilmiş ve 2022 yılı sonunda 13 olarak gerçekleşmiştir. AB bünyesinde önerilen Alternatif Yakıt Altyapı Düzenlemesi (AFIR) bataryalı elektrikli araç başına düşen şarj istasyonundan tedarik edilen güç 1 kW ve soketli hibrit elektrikli araç başına 0,66 kW olarak gerçekleşmiştir, ayrıca bu düzenleme otoyollardaki minimum halka açık şarj istasyonu kapsamını zorunlu kılacaktır (Int. Kyn. 9, 10 ve 11).



Şekil 15. Dünya Ülkelerinde Şarj İstasyonu Başına Düşen Elektrikli Araç Sayısı (Int. Kyn. 10: IEA (2022), Global EV Outlook 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>, Licence: CC BY 4.0)

2023'de Avrupa Birliği'nin ortalamasında şarj istasyonu başına düşen elektrikli araç oranı 13 olup, elektrikli araç başına ortalama kW oranı, 2030 için AFIR'de önerilen 1 kW'nin biraz üzerindedir. Yine de bazı ülkeler hedeflere ulaşmada diğerlerinden daha iyi performans göstermiştir; örneğin Hollanda 4 ve 2,7 kW başına EA oranı ile talebe dayalı yavaş şarj istasyonlarının geniş çaplı dağıtım stratejisini izlemiştir. Esasen, Hollanda'da hızlı şarj cihazlarının payı genellikle %3 civarında kalmaktadır. Benzer olarak, İtalya, önerilen şarj oranlarını şarj istasyonu başına 11 EA ile sınırda da olsa karşılamaktadır. Norveç'te oran 2021 yılında şarj istasyonu başına 34 EA ve araç başına 0,7 kW olmuş, hızlı şarj cihazları neredeyse bu miktarın % 35'ini oluşturmuştur. İspanya'da ise EA başına 20 şarj cihazı ve araç başına 0,92 kW ve % 30'dan fazla hızlı şarj bulunmaktadır ve şu anda Danimarka'dan daha büyük bir EA filosuna sahip durumdadır. Öte yandan Fransa, Almanya ve Birleşik Krallık, Avrupa'nın en büyük pazarları AB'nin önerdiği şarj cihazı bulunabilirlik tavsiyelerini karşılamamaktadır (Int. Kyn. 9, 10 ve 11).

2023 yılında dünya genelinde ortalama şarj istasyonu başına EA oranı 10 ve EA başına ortalama 2,4 kW' dır. Çin pazarı, istasyon başına 8 EA ve EA başına 3,4 kW ile küresel ortalamaları araç sayısı bazında aşağı çekmektedir aynı zamanda % 40 hızlı şarj içermektedir. Avrupa Birliği'nde bu oran daha düşüktür, ortalama olarak EA başına 1,2 kW civarındadır. Güney Kore, % 90'ı yavaş şarj noktaları sahip olmasına rağmen, EA başına yaklaşık 7 kW ile en yüksek orana sahiptir (Şekil 15).



Şekil 16. Dünya Ülkelerinde Elektrikli Araç Başına Düşen Halka Açık İstasyon Gücü (kW) (Int. Kyn. 10: IEA (2022), Global EV Outlook 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>, Licence: CC BY 4.0).

2023 yılında da elektrikli hafif ticari araç için toplam şarj noktası sayıldığında küresel ortalamada bir şarj başına 10 EA bulunmaktadır. Çin, Güney Kore ve Hollanda gibi ülkeler, geçmiş yıllar boyunca süre gelen istasyon başına 10 EA'dan az oranını geliştirmemişlerdir. Halka açık şarjdan yoğun bir şekilde faydalanan ülkelerde, halka açık şarj noktalarının sayısı, genellikle EA dağıtımına büyük ölçüde ayak uyduran bir hızda genişlemiştir (Bknz. Şekil 16) (Int. Kyn. 9, 10 ve 11).

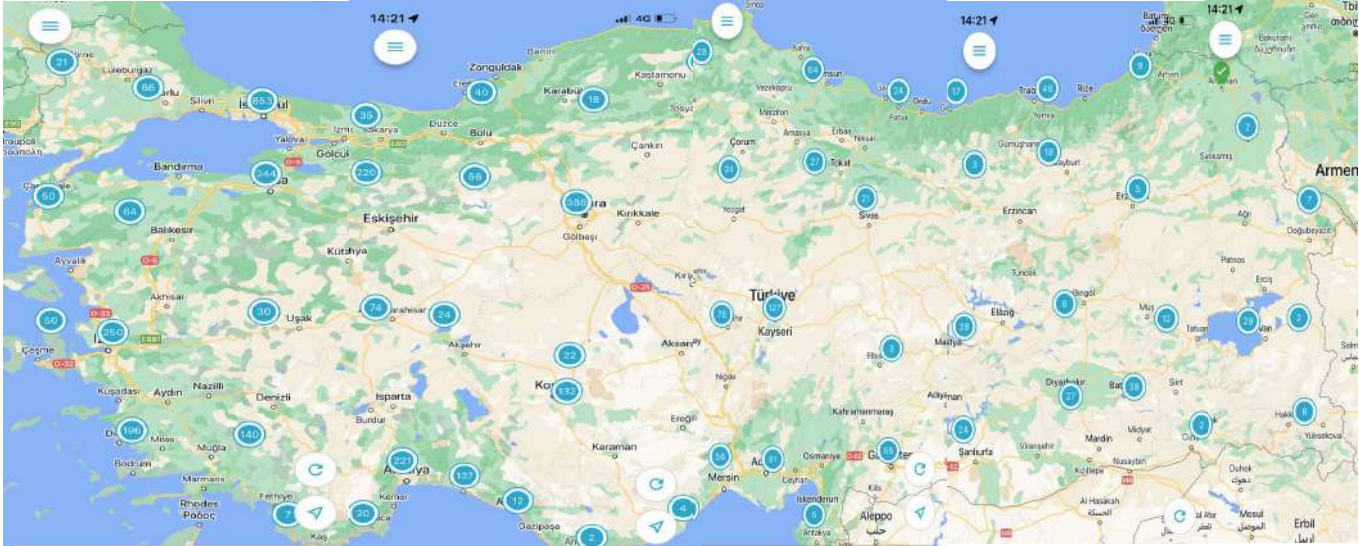
Alternatif Yakıtlar Veri Merkezi verilerine göre 2022 yılı itibarıyla Amerika Birleşik Devletleri'nde faaliyette olan neredeyse 50.000 adet EA şarj istasyonunu mevcuttur. Bu istasyonların % 93'ü halka açık ve % 17'si (otobanlar ve diğer ana arterler dahil şehir dışı yollar üzerinde). Doğru akım hızlı şarj istasyonlarının % 99'u halka açık ve bunların % 25'i otoyollar üzerinde bulunmaktadır, bu da bu konulardaki daha hızlı şarj ihtiyaçlarını yansıtmaktadır (Int. Kyn. 9, 10 ve 11).

Şarj istasyonlarının yaklaşık % 6'sı, eyaletler arası otoyol sistemi boyunca yer almaktadır. Otoyol boyunca bulunan istasyonlar, toplam DC hızlı şarj noktasının % 16'sını oluşturmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri nüfusunun yaklaşık % 8'i, halka açık bir şarj istasyonundan 10 km'den fazla uzakta yaşamaktadır. Bu payı % 5'in altına çekmek, ek 1185 istasyon inşa etmeyi gerektirirken, sıfıra indirmek için 5.000'den fazla ek istasyon kurmayı gerektirecektir (Int. Kyn. 9, 10 ve 11).

7. TÜRKİYE'DEKİ ŞARJ İSTASYONU ALTYAPISI

Ülkemizde şarj istasyonunu özel kişiler veya kurumlar açabilir. Bunun için öncelikle Enerji Piyasası ve Denetleme Kurumu'ndan (EPDK) "Şarj Ağı İşletmeci Lisansı" olarak gerekli izne sahip olmalıdır. Lisans özellikle alt yapı ve şarj ünitelerinin uygunluğunun sağlanması için gerekmektedir. EPDK'nın şarj hizmeti yönetmeliğine göre açılan şarj istasyonları yönetmeliğe uygun tasarlanmalı ve dijital altyapı gereksinimlerini karşılamalıdır.

Enerji Piyasası ve Denetleme Kurumuna ait "ŞarjTR" uygulamasında Türkiye'deki mevcut şarj istasyonu kapasitesi toplam 5.423 soket olarak görüntülenmektedir. Ekim 2023'de, Türkiye'de 1.193 DC CCS soket ve 3.432 AC Tip2 soket mevcuttur. Toplam şarj istasyonlarının coğrafi dağılımı aşağıda batı bölgeler ve doğu bölgeler olmak üzere sırasıyla Şekil 17'de görülmektedir (Int. Kyn. 12).



Şekil 17. Türkiye'deki şarj istasyonlarının coğrafi dağılımı (Int. Kyn. 12)

Türkiye'de şarj istasyonu ağı olan çok sayıda şarj noktası operatörü mevcuttur. Bunlardan en yaygın ağı olan operatörler Eşarj, TRUGO, Vestel-ZES, Voltron ve Sharz.net olarak sayılabilir.

8. ŞARJ İSTASYONU YER SEÇİMİ İÇİN YAKLAŞIMLAR

EA kullanıcıları araçlarını çoğunlukla evlerinde şarj etmeyi tercih etmektedir. Ancak EA'ların menzillerinin kısıtlı olması, hızlı şarj istasyonlarının sayısının her geçen gün artması ve ticari araçların gün içinde şarja ihtiyaç duymaları gibi nedenlerle şehir içlerinde ve şehirlerarası yollarda farklı lokasyonlarda elektrikli araç şarj istasyonları (EAŞİ) kurulmaktadır. Şehir içlerinde evler dışında çoğunlukla özel ve kamu park alanlarında, ticari binalarda, alışveriş merkezlerinde ve ana arterlerde, şehirlerarasında ise otoyollarda yerleştirilmektedir. Şarj istasyonu yerleşimi problemini şu iki farklı yaklaşımla modellenilebilir.

Düğüm tabanlı yaklaşım

Düğüm tabanlı yaklaşımda düğüm olarak tanımlanan talepleri karşılamayı amaçlar ve bir tesis yeri seçimi problemi olarak formüle edilir. Düğüm tabanlı yaklaşım, temel haliyle kullanıldığında, genellikle ücretlendirme talebinin ağ yönlerini dikkate almadan yapar.

Akış tabanlı yaklaşım

Akış tabanlı yaklaşım, düğüm tabanlı yaklaşımın aksine talebi trafik akışları biçiminde ele alır ve tipik olarak bu istasyonlardan geçen en çok trafik akışını kapsama modeli ile şarj istasyonlarının konumlandırılmasını amaçlar. Akış tabanlı yaklaşımlar da kendi içinde rota-tabanlı ve tur-tabanlı (veya faaliyet-tabanlı) olarak ikiye ayrılır (Metais vd., 2022). Rota tabanlı yaklaşımda sadece başlangıç-bitiş noktaları arasındaki seyahatler dikkate alınırken faaliyet-tabanlıda bir aracın belirli bir zaman dilimindeki tüm faaliyetleri dikkate alınır. Tur tabanlı yaklaşım için daha zengin veriye ihtiyaç vardır. Ancak kullanıcıların ve ücretlendirme durumlarının tamamen heterojen bir şekilde tanımlanmasına olanak tanır.

EAŞİ yerleşimi probleminde dikkate alınan değişkenler ve belirlenen kullanım sıklıkları şöyledir: ekonomik değişkenler (%49), coğrafi değişkenler (% 27), enerji, şarj istasyonu özellikleri ve EA özelliklerine dair değişkenler (% 8), sosyo-demografik değişkenler (% 8), ulaşım, trafik ve rota özelliklerine dair değişkenler (% 7) ve çevresel değişkenler (% 1)'dir (Banegas ve Mamkhezri, 2023). Bu değişkenlerin alt kırılımları Ek 1'de sunulan tabloda detaylı olarak verilmiştir. EAŞİ yer seçimi problemi için gerekli veriler çoğunlukla aşağıdaki kaynaklardan elde edilmektedir (Pagany vd., 2023):

- İstatistikler, örn. nüfus verisi,
- EA ulaşım verisi ve toplanan Şİ verisi,
- Fosil yakıtlı araçların ulaşım verisi,
- Anketler,
- Simülasyonlar veya test verileri,

EAŞİ yerleşiminde önemli olan ilgili tüm paydaşların faydasını dengeleyecek şekilde istasyon tipi, büyüklüğünü (kapasitesini) ve konumunu belirlemektir. EAŞİ yerleşimi ile ilgili temel paydaşlar elektrik dağıtım ağı operatörleri (DAO), elektrik araç kullanıcıları (EAK) ve EA şarj istasyonu sahipleri (EAŞİS) olarak tanımlanabilir (Banegas ve Mamkhezri, 2023). DAO yaklaşımı ile EAŞİ yer seçiminin optimizasyonunun; dağıtım ağının aktif güç kaybı maliyeti (Shukla vd., 2019; Zeb vd., 2020; Chen vd., 2021; Pal vd., 2021; Gampa vd., 2020; Battapothula vd., 2019; Xiang vd., 2016; Deb vd., 2020); reaktif güç kaybı maliyeti ve voltaj sapması maliyeti (Chen vd., 2021; Pal vd., 2021; Battapothula vd., 2019; Awasthi vd., 2017; Deb vd., 2019), reliability cost (Amini vd., 2017; Deb vd., 2019) ve kararlılık (stability) maliyeti (Ponnam ve Swarnasri, 2020) gibi parametrelerle ele alınması gereklidir. Şarj istasyonlarının şarj istasyonu sahibi yaklaşımına göre optimal olarak yerleştirilmesi durumunda, yatırım maliyeti (Faridpak vd., 2019; Tian vd., 2018; Simorgh vd., 2018); şarj istasyonunun kurulum maliyeti (Chen vd., 2021; Battapothula vd., 2019; Deb vd., 2019), işletim maliyeti (Zhang vd., 2016; Deb vd., 2019; Kong vd., 2019); bakım maliyeti, yol yapım maliyeti ve arazi maliyeti (Chen vd., 2021; Pal vd., 2022; Awasthi vd., 2017) ele alınır. Elektrikli araç kullanıcıları yaklaşımında ise kullanıcıların ulaşım maliyetleri, şarj süreleri, bekleme süreleri, şarj ve erişim maliyetleri vb. faktörler minimize edilmeye çalışılmaktadır. (Yi vd. 2019; Zhang vd. 2016; Tian vd., 2018).

Şarj istasyonu yerleşimi probleminin tüm paydaşları dikkate alarak daha gerçekçi şekilde formüle edilmesine, elektrikli araç kullanıcı davranışlarından kaynaklanan belirsizliklere göre elektrik dağıtım ağındaki dalgalanmaların ve kullanıcıların şarj etme planlarının/örüntülerinin dikkate alınmasına, talep tarafı yönetimi ve araçtan-dağıtım ağına elektrik aktarımı konularının çalışılmasına, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunun ele alınmasına ve bir şarj istasyonunun yerleşiminin sadece maliyet fonksiyonlarıyla değil yarattığı etkinin de incelenmesine ve formülasyonlara dahil edilmesine ihtiyaç vardır. Bu şekilde gerçek hayat problemlerine pratik çözümler bulmak mümkün olabilir (Ahmad vd. 2022).

9. ELEKTRİKLİ ARAÇ VE ŞARJ İSTASYONLARI STANDARTLARI VE BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİK

EA'lar küresel çapta yaygınlaştığı için etkin, erişilebilir ve kullanıcı dostu hızlı şarj ağına olan ihtiyaç iyice artmıştır. Dünyanın çeşitli ülkeleri, birlikte çalışabilirliği (İng. interoperability) optimize ederek ve standardizasyon kurallarını ve mevzuatını zorunlu kılarak bu ihtiyacı karşılamaya çalışmaktadır. Bu fiyat şeffaflığı, uyumluluk, veri sağlama ve paylaşım ile ödeme gibi özellikleri sağlayarak EA'ları kullanıcılar için daha kolay ve daha güvenli hale getirmektedir.

Sistem birlikte çalışabilirliği, yeni dijital bilgi altyapılarının sunduğu fırsatlarla yeni ve eski sistemleri entegre etme ihtiyacının ortaya çıkması ile artan bir ilgi alanıdır. Genel olarak birlikte çalışabilirlik iletişim kurma yeteneği ve veri alışverişi olarak tanımlanabilir. İletişimin birlikte çalışabilirliği, iki veya daha fazla farklı kuruluş, ağ, uygulama veya bilgisayar teknolojileri çözümü arasında veri alışverişi için yollar, altyapılar ve mekanizmalar sağlar. İletişim düzeyinde

birlikte çalışabilirliği sağlamak için teknolojik ve arayüz düzeyinde birlikte çalışabilirliğin sağlanması gerekmektedir. İletişim düzeyinde birlikte çalışabilirlik, iki veya daha fazla heterojen sistem arasında veri alışverişini mümkün kılarken, değiştirilen verilerin biçimi/niteliği ve yorumlanmasını dikte etmez. Bu nedenle, veri düzeyinde birlikte çalışabilirlik, sistemleri birlikte çalışabilir hale getirmek için verilerin yapısı ve anlam bilimiyle de ilgilenmektedir (Karpenko vd. 2018).

Örneğin, EA şarjı için arabanın konumlandırılması, yönlendirme motorunun aracı akıllı park etmesi ve aracın şarj altyapısıyla iletişim kurması gerekmektedir. Açık standartlar olmadan ve veri alışverişi gereklilikleri doğru şekilde düşünülmeden, bu mümkün değildir. Ek olarak ödeme sürecinin iyileştirilmesi, tüketicilerin tam olarak ne için ödeme yaptıklarını bilmelerinin sağlanması ve EA şarj cihazlarının daha enerji verimli ve tüketici odaklı bir şarj deneyimine katkıda bulunmak için dijital olarak bağlantılı ve akıllı şarj özelliklerine sahip olma zorunluluğu birlikte çalışabilirliği öne çıkaran bileşenlerdir.

Şarj istasyonlarının güvenli ve işlevsel olması herkes için olumlu olsa da farklı paydaşlar için dikkate alınan birçok farklı nokta vardır. Şebeke operatörlerinin öncelikli kaygıları güvenlik ve elektrik altyapısı üzerindeki etkidir. Devletler elektrikli araç sürücülerinin ihtiyaçlarına odaklanmaktadır. Şarj ekipmanı üreticileri ise işletmecileri ve diğer pazar oyuncularını yönetimi daha çok ilgilenmektedir. Tüm bu farklı paydaşların ihtiyaçları ve istekleri, hızla büyüyen bir ihtiyaçla birleştiğinde, hükümetlerin sektördeki önemli oyuncularla işbirliği yaparak ve birbirlerinden öğrenerek çözmesi gereken karmaşık bir problem ortaya çıkmaktadır.

Birden fazla satıcı tarafından üretilen EA ve şarj cihazları teknolojisinin başarısı için birlikte çalışabilirlik çok önemlidir. Bu amaçla çeşitli standartlar yayınlanmaktadır. Ayrıca uygulamalar için uygunluk testi yöntemlerinin de geliştirilmesi ve doğru şekilde uygulanması gerekmektedir. EA şarj standartlarının ve şarj istasyonlarının şebeke entegrasyonu standardizasyonu ile ilgili çeşitli uluslararası kuruluşlar mevcuttur ve öne çıkanları şunlardır: ISO, IEC, SAE, IEEE, UL, ESO, JARI ve ARAI. Kondüktif şarj kriterlerine ilişkin ülke ve kullanılan standartlar Tablo 5’de verilmiştir. IEC, SAE, IEEE ve diğerleri ise indüktif şarjla ilgili çeşitli standartlar geliştirmiştir. IEC, iletken şarj sistemleri, çift yönlü DC şarj sistemleri ve ayrıca DC şarjı için fişler ve prizler hakkında standartlar önermiştir. IEC ve JARI'nin indüktif şarjın genel gereklilikleri için standartlar önerdiği görülmektedir. IEC ayrıca manyetik alan transfer sistemlerinin özel gereksinimleri için standartlar önermiştir. Farklı uluslararası kuruluşlar tarafından önerilen pil değiştirme standartları da mevcuttur. Örneğin, IEC/TS 62840 pil değiştirme sisteminin genel gerekliliklerini ve sistem tanımını ayrıntılı olarak açıklamaktadır (Sachan vd., 2022).

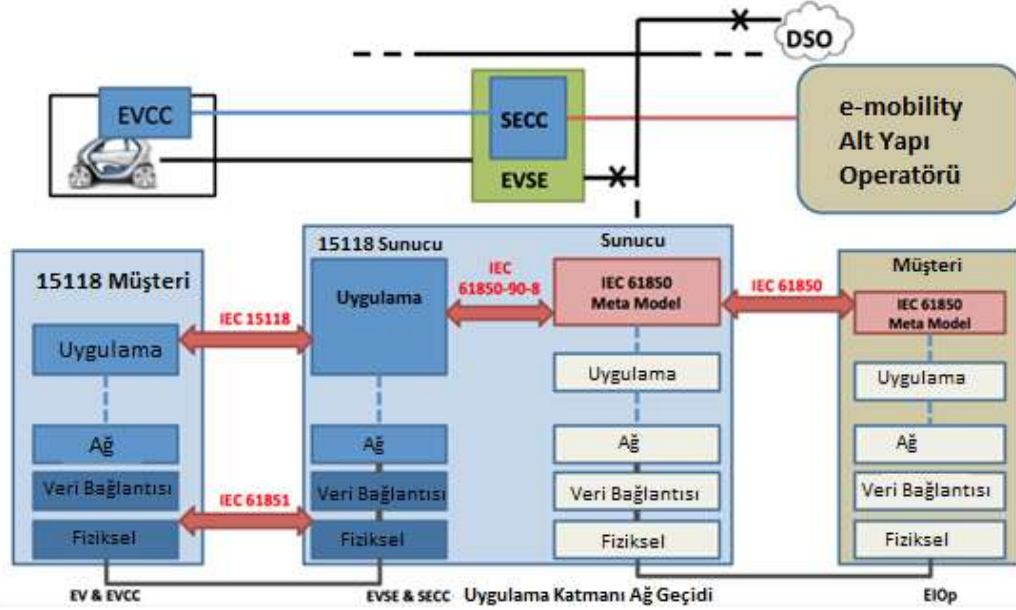
Can güvenliği de şarj istasyonlarında kazaları önlemek için önemli bir boyuttur. Şarj istasyonlarında can güvenliği ile ilgili de standartlar geliştirilmiştir. Örneğin IEC 61140, şarj istasyonlarının kurulumu sırasında elektrik şokuna karşı korunma ile ilgili önlemleri belirlemiştir. IEC 62840-2 ise pil değiştirme istasyonlarındaki can güvenliği gereksinimlerini belirlemiştir (Sachan vd., 2022).

Tablo 5. Ülkeler göre şarj standartları (Sachan vd., 2022).

Kategori	Standard	A. B. D.	Avrupa	Çin	Japonya
AC şarj ve bağlantıları	IEC-62196-2		*		
	IEC-60309-1	*	*	*	*
	IEC-60309-2	*	*	*	*
	SAE J 1772	*			*
	GB/T 20234-2			*	
DC şarj ve bağlantıları	IEC-62196-3	*	*		
	GB/t 20234.3-2015			*	
V2G	ISP/IEC 15118	*	*		
	CHAdeMO V2X	*			*

EA'lar elektrikle çalışmaktadır ve elektrikli araç tedarik ekipmanı (EVSE) olarak adlandırılan EA şarj cihazı, EA şarj altyapısındaki ana rolü üstlenmektedir. Ancak birlikte çalışabilirlik olmadan EA teknolojisi gelecekte ulaşım için pratik bir çözüm olamaz. Farklı EA'lar, EVSE'ler ve arka uç sistem üreticileri ürünlerini pazara sunacaklar ancak bunlar birbiriyle uyumlu olmadığı sürece pazarda etkin ve kolay kullanım mümkün olmayacaktır. Bu sorunu çözmek için (CHArge de MOve) ve DIN (Deutsches Institut für Normung) gibi standardizasyon kurumlarının daha önce de belirtilen ISO/IEC 15118, IEC 61851 ve IEC 61850-90-8 gibi standartları yer almaktadır. Şekil 18, bir EA şarj sisteminin mimarisini ve ilgili standartları göstermektedir. EA şarjında, EA ve EVSE ana aktörlerdir (Shin vd. 2016). EA, bir şarj cihazı kullanarak EVSE

ile fiziksel bir bağlantı kurar. İki standart aracılığıyla iletişim kurarlar: Düşük seviyeli iletişim için IEC 61851 ve Üst düzey iletişim için ISO/IEC 15118. Genel şarj prosedürünü kontrol etmek için özellikle EA İletişim Denetleyicisi (EVCC), EA ve Tedarik Ekipmanı İletişim Kontrolörü (SECC) yüksek düzeyde iletişim gerçekleştirir (Shin vd. 2016).

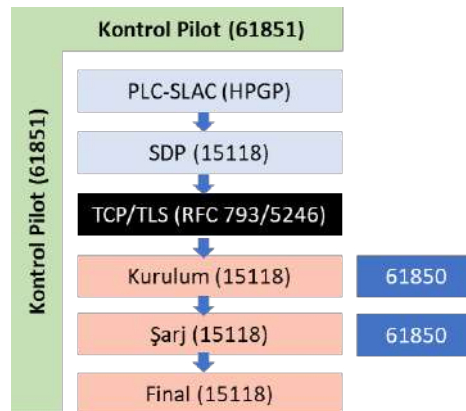


Şekil 18. EA şarj sistemi için bir mimari ve ilgili standartlar (Shin vd. 2016).

Şekil 19'da EA şarjının genel prosedürünü açıklamaktadır (Shin vd. 2016). İlgili standartlar parantez içinde belirtilmiştir. Kullanıcı şarj kablosunu bağladığında: (i) EA ve EVSE şarjın akışını algılar ve IEC 61851'de tanımlandığı gibi kontrol pilotu protokolünü başlatır. Protokol ile her iki taraf da şarj işlemi boyunca farklı durumları tanır. EA ve EVSE hazır olduğunda: (ii) HPGP'de tanımlandığı gibi SLAC protokolüyle bir PLC bağlantısı başlatırlar. PLC bağlantısı kurulduktan sonra (iii) EA, LAN'a (Yerel Alan Ağı) EVSE'nin IP adresi ve bağlantı noktası numarasını tanımlayan bir SDP paketi verir. Bilgiyi aldıktan sonra: (iv) EA ile EVSE, TLS ile güvence altına alınan bir bağlantı kurar.

Bu noktada EA ve EVSE, şarj prosedürünü kontrol etmek için TCP paketlerini güvenli bir şekilde değiştirebilir. Prosedür üç aşama olarak ele alınmaktadır: Kurulum, Şarj Etme ve Sonlandırma. Kurulum aşamasında, EA ve EVSE, protokol sürümü, kullanıcı kimliği, hizmet bilgileri dahil olmak üzere çeşitli parametreleri (ödeme yöntemleri ve ücretlendirme parametreleri) görüşür. Şarj aşamasında gerçek bir transfer (şarj cihazından EA'ya giden enerji) gerçekleştirirler. Durma koşulu sağlanana veya herhangi bir nedenle kesinti talep edilene kadar transfer sırasında sürekli olarak durumlarını değiştirirler. Sonuçlandırmada, bağlantıyı kesmeden önce güvenlik kontrolleri yaparlar.

İşlem sırasında EVSE operatöre şarj oturumuyla ilgili rapor verir. EVSE ile operatör arasındaki ilişki henüz hiçbir standartta tam olarak tanımlanmamıştır. Ancak IEC 61850-90-8 teknik raporu, EVSE ile operatör arasındaki veri alışverişine yönelik bilgi modelini açıklar (Shin vd. 2016).



Şekil 19. EA şarjının genel prosedürünü ve parantez içinde ilgili standartlar (Shin vd. 2016).

10. ŞARJ İSTASYONLARINDA KULLANICI DENEYİMİ

Kullanılabilirlik, bir teknolojik sistemin, kullanıcıların sistemin işlevlerini kolay ve uygun bir şekilde kullanmasını ne ölçüde mümkün kıldığını ifade eder. Kullanım niyetine odaklanan modellere göre kullanılabilirlik veya kullanım kolaylığı kullanıcıların söz konusu teknolojiyi kullanma davranışlarını etkileyen önemli bir unsurdur (Davis, 1989; Ajzen, 1991; Lacka ve Chong, 2016). Sirtını kullanılabilirlik kavramına ve teknolojik sistemlerin yaygınlaşması ile kullanıcıların teknolojik sistemlerden beklentisinin kullanım kolaylığının ötesine geçtiği fikrine yaslayan diğer bir kavram ise kullanıcı deneyimidir (UX olarak kısaltılır). Kullanıcı deneyimi kullanıcıların, organizasyonla ve onun sunduğu hizmet ve ürünlerle etkileşiminin tüm yönlerini kapsar. Kullanıcıların bir üründen elde edebilecekleri geniş bir potansiyel fayda yelpazesini barındıran kullanıcı deneyimi genel olarak dinamik, bağlama bağlı ve öznel bir kavram olarak kabul edilmektedir (Law vd., 2009). Son yıllarda elektrikli araçlar için kullanılabilirliği veya kullanıcı deneyimini ele alan çalışmalarda artış vardır (Daromy-Williams vd., 2019). Ancak şarj istasyonlarının kullanılabilirliğini ve kullanıcı deneyimini ele alan çalışmalar halen sınırlı sayıdadır.

Elektrikli araç kullanımının yaygınlaşması ancak elektriğe dayanan bireysel hareketliliğin artırılması, yani bireylerin ihtiyaçlarını karşılayan, kullanıcı ihtiyaçlarının merkezde olduğu şarj istasyonlarının tasarlanması ile mümkün olabilir. Kullanıcılar elektrikli araçların şarj edilme sürecini olağan bireysel hareketliliklerini kısıtlayan bir unsur olarak algılıyor olması, elektrikli araçların başarılı bir şekilde yaygınlaşması için önemli bir eksiktir (Fabianek ve Madlaner, 2023). Bu durumda, iyi bir kullanıcı deneyiminin sağlanması için kullanıcı tarafından beklenen unsurların ne olduğunun anlaşılması ve bu unsurları barındıran bir istasyon tasarımının yapılmasının önemi açıktır.

Şarj istasyonu altyapısı özelinde kullanılabilirlik ve kullanıcı deneyimini ele alan çalışmalar ağırlıklı olarak orta ve Kuzey Avrupa'da yürütülmüştür. Bu çalışmalara bakıldığında kullanıcıların şarj istasyonlarını kullanım deneyimini etkileyen şarj istasyonu unsurları altı grupta toplanabilir (Potoglou vd., 2023);

- Fiziksel nitelikler (konum, güç, şarj noktalarının sayısı ve yakındaki olanaklar; restaurant, market gibi)

Şarj istasyonlarının etrafındaki olanakların, yakıt ikmaline göre daha uzun bekleme sürelerini telafi etmesi beklenmektedir ve şarj istasyonu tercihleri için önemli olduğu bildirilmiştir. En sık bahsedilen olanaklar market, restaurant ve tuvalet olarak geçmektedir. Bununla ilgili olarak, Almanya'daki potansiyel elektrikli araç kullanıcılarının elektrikli araçlarını şarj etmek için marketleri ve alışveriş merkezlerini tercih etme olasılıklarının daha yüksek olduğu görülmüştür (Wolff ve Madlener, 2019b). Bunun arkasında şarj süresini faydalı bir aktivite ile değerlendirme niyetinin olduğu açıktır.

Hem mevcut kullanıcılar hem de potansiyel kullanıcılar arasında daha yüksek şarj hızlarının sunulduğu istasyonların anlamlı olarak daha fazla tercih edildiği, kullanıcıların hızlı şarja erişmek için daha fazla yol gitmeyi göze aldıkları gözlenmiştir (Visaria vd., 2022). Ayrıca müsait şarj cihazlarının müsait olmayan şarj cihazlarına oranı, kullanıcıların şarj istasyonu tercihleri için önemli bir özellik olarak saptanmıştır. Kullanıcılar müsait bir cihaz bulmak için daha uzun mesafeler gitmeye razıdırlar (Visaria vd., 2022).

Ayrıca işlevsiz şarj noktalarının ve şarj işlemi sırasında yaşanan teknik sorunların (örn. istem dışı işlem iptali) kullanıcıların şarj istasyonu kullanım deneyimi üzerindeki olumsuz etkisi açıktır (Fabianek ve Madlener, 2023). En olumsuz etkileyen durum olarak, şarj noktalarının hiç çalışmaması ve ilgili hizmet yardım hattı çalışanlarının sorunu çözmede yardımcı olamaması olarak belirtilmiştir.

- Ücret

Şarj ücretleri, sabit ücretler (aylık veya üç aylık), ön ödemeli ücretler, şarj miktarı, yani araçların şarj edildiği kW. sa, aracın şarj noktasına bağlı kaldığı süre gibi farklı fiyatlandırma modellerine dayanmaktadır. Çeşitli ülkelerdeki mevcut şarj istasyonları farklı ödeme yöntemleri ve çeşitli fiyatlandırma modelleri sunan oldukça heterojen bir yapıya sahiptir, bu da elektrikli araç sürücüleri için zorluklara, tatmin edici olmayan şarj deneyimlerine ve kafa karışıklığına neden olmaktadır (Gutjar ve Kowald, 2023). Şarj istasyonlarının çoğu kendi şarj kartı veya şarj uygulaması ile çalışmaktadır. Şu anda sadece Almanya'da 300'den fazla farklı şarj kartı/uygulaması kullanılmaktadır (Fabianek ve Madlener, 2023).

Almanya'da yapılan bir çalışmada kullanıcılar, sabit fiyatlı bir şarj seçeneğine (sabit bir aylık ücret karşılığı sınırsız şarj gibi) kıyasla, kW. sa bazlı ödemeyi daha çok tercih ettiklerini belirtmişlerdir. Şarj süresine dayanan ücretlendirme ve şarj seansı başına sabit bir ücret ödeme ise bu kullanıcılar arasında en az tercih edilen ödeme türleri olmuştur (Gutjar ve Kowald, 2023). Başka bir çalışmada Danimarka'lı kullanıcıların tercihinin ise sabit

fiyatlı şarj fiyatlaması olduğu görülmüştür (Visaria vd., 2022). Ancak yine aynı çalışmada, şebeke yoğunluğuna göre şarj saati açısından fiyat farklılığı içeren aylık abonelik uygulaması ise Danimarka'lı kullanıcılar tarafından en az tercih edilen seçenek olmuştur. Ayrıca bir diğer çalışmada, bir şarj ağına üye olunması durumunda kullanıcıların araçlarını şarj etmek için ticari şarj istasyonlarını tercih etme oranlarının arttığı da saptanmıştır (Lee vd., 2020).

Genel olarak kullanıcılar, farklı ücretlendirme yaklaşımları sebebiyle farklı fiyatlarla sonuçlanan ve şeffaf olmayan "şarj tarifesi karmaşası"nın sorun olarak belirtmişlerdir. Buna yönelik olarak fiyatlandırma sisteminin standartlaştırılması önerilmektedir. Fiyat açıkça belirtilmeli ve fiyatlandırma sistemi farklı şarj istasyonları arasında kolayca karşılaştırılabilir olmalıdır (Figenbaum vd., 2022). Bu amaçla, şarj istasyonlarında elektrik fiyatı hakkında ayrıntılı ve şeffaf bilgi sağlayan bir ekran bulunmasının, veya şarj ağından bağımsız olarak, doğru ve basit bir şekilde fiyat bilgisi sunan evrensel bir dijital uygulamanın elektrikli araç kullanıcılarının yararına olacağı düşünülmektedir (Fabianek ve Madlener, 2023).

- **Servis seviyesi (şarj etme ve bekleme süresi, müsait bir şarj noktası bulma kesinliği, park süresi ve bekleme süresi)**

Şarj için kuyrukta bekleme süresi kullanıcıların şarj istasyonu tercihleri ile negatif ilişkili bulunmuştur (Wolff ve Madlener, 2019), yani, elektrikli araç kullanıcıları bekleme süreleri kısa olduğunda araçlarını şarj istasyonlarında şarj etmeyi tercih etmektedirler. Ancak çalışmalarda kullanıcıların 5 dk bekleme, 10 dk bekleme veya hiç bekleme arasında kayıtsız kaldığı da gözlenmiştir (Wolff ve Madlener, 2019b). Bir diğer bulgu da, 5 dk'ya kadar 'kesin' bir bekleme süresinin kullanıcılar tarafından bilinmeyen veya belirsiz bekleme sürelerine tercih edilmesidir (ten Have vd., 2020). Bilgi ve iletişim teknolojileri tabanlı rezervasyon sistemlerinin hızlı şarj cihazlarıyla birlikte sunulmasının, potansiyel ve mevcut kullanıcıların hem önceden belirlenebilir kuyruk süreleri hem de istenen şarj noktalarında şarj süreleri anlamında kendilerini daha güvende hissetmelerini sağlayabileceği görülmüştür (Brückmann ve Bernauer, 2023). Benzer şekilde, kuyruk sürelerini azaltmak için, (potansiyel) müşterileri müsait şarj noktalarına veya kısa kuyruk sürelerine sahip olanlara yönlendiren teknolojilerin kullanıcılar açısından cazip olması muhtemeldir (Brückmann ve Bernauer, 2023).

- **Erişilebilirlik (ev veya varış noktası ile şarj istasyonları arasındaki mesafe ya da bir şarj istasyonuna erişmek için kat edilmesi gereken fazla mesafe)**

Genel olarak kullanıcıların daha kısa mesafeler içindeki şarj istasyonlarını, dolayısı ile kısa erişim sürelerini tercih ettikleri görülmüştür.

- **Uygunluk (bir şarj istasyonunun sunabileceği ve kullanıcı deneyimini iyileştiren özellikler; örneğin kullanım kolaylığı, endüktif şarj, servislilik şarj, tak ve şarj et kimlik doğrulaması ve kart tabanlı ödemeler)**

Genel olarak istasyon uygunluğunu artıran özelliklerin kullanıcıların şarj istasyonlarını tercih etmesini pozitif olarak etkilediği gözlenmiştir. Kullanıcıların bakış açısına göre, şarj donanımıyla sezgisel, ve karmaşık olmayan bir etkileşim arzu edilmektedir. Şarj istasyonunda gerçekleşen etkileşim şeffaf ve basit bir bilgi akışını mümkün kılmalıdır (Fabianek ve Madlener, 2023). Örneğin, kişinin ilk defa bir şarj istasyonunu kullanıyor olması şarj eylemini başarı ile tamamlamasına engel olmamalı, şarj noktasının kullanımı kolay bir eylem olmalıdır. Norveç'te yapılan bir çalışmada, mevcut durumda kullanıcıların tüm şarj cihazlarına erişim sağlamak için 20-30'a kadar uygulama ve farklı fiş türleri, güç seviyeleri ve şarj cihazı arayüzlerinin yanı sıra 13 ödeme sistemiyle etkileşime girmesi gerektiği, ve bunun ciddi kullanım zorluğu oluşturduğunu saptanmıştır (Figenbaum vd., 2022). Şarj işleminin standartlaştırılması, şarj kablolarının tüm araç modellerine uyacak şekilde yerleştirilmesi, şarjı başlatma yöntemi vb. unsurların kolay kullanılabilir kılınmasıyla, şarj istasyonlarının milliyetten, teknolojik becerilerden veya engellerden bağımsız, evrensel tasarıma uygun hale getirilmeleri mümkündür (Figenbaum vd., 2022). Örneğin Alman elektrikli araç kullanıcılarının geleneksel kablo şarjına kıyasla, şarjın otomatik olarak başlaması için sürücünün elektrikli aracını belirli bir yere park etmesini gerektiren endüktif şarjı daha çok tercih ettikleri gözlenmiştir (Wolff ve Madlener, 2019b).

Mevcut şarj istasyonları farklı kimlik doğrulama yöntemlerine sahiptir. Elektrikli araç kimlik doğrulaması, şarj istasyonu operatörünün daha hızlı şarj ve ödeme sağlamak için bir elektrikli aracı ve kullanıcıyı otomatik olarak tanımlama yeteneğini ifade eder. Almanya'da yapılan bir diğer çalışmada (Gutjar ve Kowald 2023), bir elektrikli araç satın almak isteyen kullanıcıların, cep telefonlarına dayanan ve bu nedenle internet bağlantısı sorunları, düşük pil veya soğuk hava nedeniyle çalışmayabilen uygulama tabanlı çözümlere kıyasla otomatik kimlik doğrulama ve ödemeye dayalı 'tak ve şarj et' yöntemini tercih ettikleri görülmüştür. Yine aynı çalışmada

Almanya'daki potansiyel elektrikli araç kullanıcılarının ödeme yöntemi olarak web tabanlı (örneğin PayPal) ve kart tabanlı (örneğin kredi kartı) ödeme yöntemlerini tercih ettikleri gözlenmiştir.

Farklı şarj istasyonlarında farklı ödeme yöntemlerinin kullanılması kullanıcılar tarafından dile getirilmiş bir sorundur. Çözümü ise ödeme yönteminin standartlaştırılmasıdır. Tüm istasyonlarda, istasyonun hangi şarj istasyonu ağına dahil olduğundan bağımsız olarak, aynı türde/türlerde ödeme yöntemleri mevcut olmalıdır. Tercihen, tüm şarj istasyonları için ortak bir uygulamanın yanı sıra, abone olmayan müşteriler için de kolay ödeme seçenekleri (banka/kredi kartı seçeneği) sunulmalıdır (Figenbaum vd., 2022).

- **Şarj istasyonunun sunduğu bilgi (şarj alanlarının konumu, fiyatı ve boş yer mevcudiyeti, elektriğin enerji kaynağı bilgisini vb. içerir).**

Çalışmalara göre bu tarz istasyon bilgilerinin çevrimiçi olarak sunulması durumunda şarj istasyonlarının kullanılma olasılıkları daha yüksektir. Şarj noktalarının çevrimiçi olarak yanlış bir şekilde müsait olarak gösterilmesinin kullanıcı deneyimini olumsuz etkilediği belirtilmiştir (Fabianek ve Madlener, 2023). Doluluk oranlarını ve potansiyel kuyrukları gerçek zamanlı gösteren bilgi ve iletişim sistemlerinin kullanıcılar açısından cazip olması muhtemeldir (Brückmann ve Bernauer, 2023).

Enerji kaynaklarına ilişkin bilgiler de potansiyel ve mevcut elektrikli araç kullanıcılarının şarj istasyonu tercihleri için önemlidir (Wolff ve Madlener 2019; Gutjar ve Kowald 2023). Elektrikli araç kullanıcılarının çevre bilincinin daha yüksek olduğu kabulünden hareketle, yenilenebilir enerji payı daha yüksek olan şarj istasyonlarının seçilme olasılığının daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Kullanıcıların şarj istasyonu kullanım tercihlerini, dolayısı ile istasyon kullanılabilirliğini ele alan araştırmaların çoğunlukla Avrupa ülkelerindeki uygulamalara dayandığı görülmektedir. Kullanılabilirlik tercihlerinde kültürel farklılıklar olabileceği, ve inovasyon difüzyon sürecinin farklı fazlarında olmanın farklı ihtiyaçlar doğurabileceği düşüncesinden hareketle, Türkiye özelinde şarj istasyonlarının kullanılabilirliğini inceleyen çalışmalara ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

11. ŞARJ İSTASYONLARI İÇİN ZORLUKLAR VE FIRSATLAR

Elektrikli araçların şarj edilmesi için çok sayıda, yüksek performanslı ve yüksek standartlara sahip şarj istasyonları gerekmektedir. Bu şarj istasyonlarının kurulumu ve işletilmesi birçok zorluğu ve fırsatı bir arada barındırmaktadır. Bu bölümde güncel teknolojiler ve yaklaşımlar dikkate alınarak bu zorluk ve fırsatlar aşağıda sunulan dört alt başlık altında incelenmektedir. Öncelikle ilk alt başlıkta EA şarj istasyonlarının elektrik şebekesi üzerinde yarattığı etkiler ve problem türleri ele alınmıştır. Daha sonra ikinci alt başlıkta EA'ların şarj edilmesi ve elektrik şebekesinin bir sistem olarak düşünülmesi ve bu sistemin verimliliğinin artırılması için uygulanan güncel teknolojiler irdelenmiştir. Üçüncü alt başlıkta EA'ların şarj edilmesi ve bataryadaki elektriğin şebekesye geri aktarımı yani deşarjının kontrol optimizasyonu için literatürde önerilen ve uygulamada kullanılan bazı stratejiler özetlenmiştir. Ve son olarak dördüncü bölümde EA ağır taşıtların şarj ihtiyaçlarındaki gelişmeler ve mevcut durum incelenmiştir.

11.1. Elektrik Şebekesinde Ortaya Çıkan Problem Türleri

Birçok şarj istasyonunun dağıtımı elektrik enerjisinin artan bir şekilde ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Daha fazla enerji şebekeden çekildikçe, şebeke aşırı yüklenebilir, bu da gerilim dalgalanmaları, gerilim düzenleme sorunları, tepe talep sorunları, güvenilirlik ve yük tahminlemesi gibi çeşitli güç kalitesi sorunlarına yol açabilmektedir. Bu sorunlar, sistem genel verimliliğini etkiler ve elektrikli araçların geliştirilmesi için uygun değildir (Pareek vd., 2020).

Elektrikli araç şarj etme, güç şebekesine olumsuz etkileri olan sistem arızaları, gerilim düşmeleri, faz dengesizlikleri, kararlılık sorunları, düşük güç faktörleri ve mevcut altyapının kullanıldığı durumlarda şebekeye ek bir yük getirme gibi sorunları içermektedir. (Abbas ve Kiseon, 2018). Şarj ve deşarj kontrolü için başlıca optimizasyon hedefleri, şebeke üzerindeki tepe yükü en aza indirmek, koordine ve düzgün şarj ve deşarj sağlamak, gerilim düzenlemesi ve güç faktörü düzeltme konularını ele almak, reaktif gücü en iyilemek, dalgalanan maliyetleri azaltmak ve frekans düzenlemesini garanti altına almak olarak sıralanabilir (Solanki vd. 2020).

11.2. Sistem Verimliliği için Kullanılan Güncel Teknolojiler

Birçok şarj istasyonunun dağıtımı doğrultusundaki yoğunluklar, elektrik enerjisi talebini artırmaktadır. Şebekeden daha fazla enerji çekildikçe, şebeke aşırı yüklenebilir ve bu da gerilim dalgalanmaları, gerilim düzenleme sorunları, zirve talep sorunları, güvenilirlik sorunları ve yük tahmini zorlukları gibi çeşitli güç kalitesi sorunlarına yol açabilmektedir. Bu sorunlar, sistem genel verimliliğini olumsuz etkileyebilmekte ve bu da elektrikli araçlar ve elektrikli araç şarj

sistemlerinin gelişimi için kabul edilemez bir durum oluşturmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için Akıllı Şebeke Teknolojisi, Yenilenebilir Enerji Teknolojisi, Araç-Şebeke Teknolojisi ve Akıllı Ulaşım Sistemleri gibi çeşitli teknolojiler aşağıda tanıtılmıştır. (Pareek vd., 2020)

Akıllı Şebeke Teknolojisi

Koordinasyonsuz güç tedariki ve güvenilirlik sorunu, akıllı şebeke teknolojisinin kullanılmasıyla belirli bir ölçüde azaltılabilmektedir. Akıllı şebeke, bölgeye göre yükü uygun bir şekilde izlemek için şebeke ile kullanıcı arasında iletişim kanalı oluşturmaktadır. Akıllı şebeke uygulaması ile her bir dağıtım hattında uzaktan terminal üniteleri bulunmakta ve bu üniteler, her hattaki herhangi bir arıza durumu bilgisini iletmekle kalmamakta, aynı zamanda her hattın enerji tüketimini de göndermektedir. Bu teknik, şebekeye yük hakkında önceden bilgi sağlayarak üretim tarafında sorunsuz bir enerji üretimini garanti edebilmekte ve bu şekilde güvenilirlik sorunu ortadan kalkmaktadır. (Deng ve Wang, 2011) Ayrıca bu teknik, yük tahminlemesine yardımcı olmakta ve araçlarla entegre durumda olduğundan dolayı bir bataryanın şarj durumu şebekeyle paylaşılabilen ve şarj durumu yüzdesine göre şebeke yakınındaki şarj istasyonunun nereye ekleneceğini belirleyebilmektedir. Şu anda dağıtılmış enerji üretimi doruk noktasında olduğunda, akıllı şebeke, doğru yük ve enerji üretimi tahminlerini sağlama konusunda olağanüstü bir teknik olarak hizmet vermektedir. (Yılmaz ve Krein, 2012)

Yenilenebilir Enerji Teknolojisi

Fosil yakıtlar, çevrenin bozulmasına büyük katkı sağlamakta ve günümüzde elektrik üretiminin başlıca kaynağı durumundadır. Elektrikli araçların yaygın bir biçimde benimsenmeye başlanması doğrultusunda daha fazla elektrik enerjisi talep edilmektedir. Bu nedenle bu ihtiyaçları karşılamak için tekrar fosil yakıtlara farklı yollarla güvenmek mantıklı bir seçenek değildir. Yenilenebilir enerji kaynakları, elektrikli araçları şarj etmek için en uygun alternatiflerdir. Buna neden olarak karbon emisyonlarının azaltılmasının yanında elektrik şebekesine olan yükü hafifletecek olması gösterilebilir. Tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, bugün dünyanın farklı bölgelerinde en kolay ve ekonomik olarak bulunan bir seçenektir durumundadır. (Wi vd., 2013) Çatı üstü güneş panelleri, ev düzeyinde elektrik enerjisi elde etmenin basit ve güvenli bir yoludur. Güneş panelleri, kamu elektrikli araç şarj istasyonlarının, alışveriş merkezlerinin, ofislerin ve büyük yüzey alanına sahip diğer yerlerin çatılarına entegre edilebilir ve bu, doğrudan şebekeye olan yükü azaltabilir. Çatı üstü güneş santrali kurmanın başlangıç maliyeti yüksek olabilir, ancak işletme maliyetleri oldukça ekonomiktir. Bu da elektrikli araçların genel işletme maliyetini geleneksel içten yanmalı motorlu araçlarla karşılaştırıldığında azaltır.

Araç-Şebeke Teknolojisi ve Akıllı Ulaşım Sistemleri

Güç sistemi dengesini sürdürmek için aktif güç ve frekans arasında bir denge olmalıdır, aşırı yüklenme ve yetersiz yüklenme frekans uyumsuzluğu sorununa yol açabilir ve bu da sistemin kararlılığını etkileyebilir. Bu nedenle, şebeke araçlara güç sağladığında ve araçlar kullanılmadığında araçlar gücü geri verdiğinde iki yönlü enerji akışı sistemini kullanmak önerilir. Bu sistem aynı zamanda araçtan şebeke sistemine güç sağlayan bir sistem veya V2G sistemi olarak adlandırılır. (Tian vd., 2012) İstatistiklere göre, elektrikli araçların %90'ı her gün boştur ve bu araçlar yüksek enerji talebini karşılamak için gücü geri vererek yardımcı olabilir. Otomatik üretim/şebeke kontrolü, değişen yükün dengesini korumak için modern güç ağı kontrolünü düzenlemeye yardımcı olmak amacıyla tanıtılmıştır. Geleneksel üretim/şebeke kontrolü, üretim ünitesini yük dalgalanmalarına yanıt vermesi için düzenler. Şu anda aracı şarj etmeyen küçük bir güneş santralinin yardımı ile bu üretilen enerjiyi şebeke üzerine geri vermek, şebeke üzerindeki yükü azaltmaya yardımcı olabilir. Bu, temiz veya yeşil bir elektrik enerjisi olacaktır ve maliyet açısından da etkili bir çözümdür (Kempton ve Tomic, 2005).

Akıllı Ulaşım Sistemleri

Sistemi daha akıllı hale getirmek için Akıllı Ulaşım Sistemi devreye sokulmuştur. Bu sistem, belirli bölgelerde trafik sıkışıklığını izlemeye yardımcı olan sensörler, aktüatörler ve gömülü işlemcilerden oluşmaktadır. Temelde, şarj istasyonları veya otoparklar ile iki veya daha fazla varlık arasında iletişim kanalı kurmaktadır. Bu iletişim, internet veya mobil ağların kullanımıyla birlikte, taşıt üzeri Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS), Küresel Konumlandırma Sistemleri (GPS) ve gelişmiş trafik akışı modelleme teknikleri ile kolaylaştırılmaktadır. Bu sürecin izlenmesi ve kontrolü Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT) aracılığıyla gerçekleştirilebilir. IoT ayrıca elektrikli araç bataryalarının şarj durumu belirlemesine ve bu bilgiyi şebekeye ileterek yükün etkili bir şekilde izlenmesine yardımcı olur. Ayrıca bu teknoloji, şarj istasyonu slotlarını (yuvalarını) önceden rezerve etme ve boş slotların durumunu kontrol etme gibi özelliklere imkan tanımaktadır. Sonuç olarak, yük tahminini geliştirmekte ve evler,

ofisler, otoparklar, alışveriş merkezleri veya şarj istasyonlarında bulunan yenilenebilir enerji tabanlı üretim tesisleri ile iletişimi artırmaktadır (Gong ve Peng, 2007).

11.3. Elektrikli Araçların Şarj ve Deşarj Kontrol Optimizasyonu için Stratejiler

Elektrikli Araçlar için Enerji Yönetim Sistemi optimizasyonunu incelemek şüphesiz bir önem taşımaktadır. elektrikli araçlar için enerji yönetim sistemi optimizasyonu ile ilgili önceki araştırmaları açıklanması ve tartışılması gerekmektedir. Elektrikli araçların şarj edilmesi, sistem arızaları, gerilim düşüşleri, faz dengesizlikleri, kararlılık sorunları, düşen güç kalitesi ve mevcut altyapının kullanılması durumunda şebeke üzerinde ek yük gibi olumsuz etkilere sahip olduğundan bu problemlere karşı çeşitli stratejiler ve çalışmalar geliştirilmiştir. (Mehrabi ve Kim, 2018).

EA'ler için Bulanık Mantık Kontrolü Kullanan İki Aşamalı Şarj Stratejisi

Bu yöntem, EA'lerin ağda şarj ve deşarj edilmesi için uygulanan Pontryagin'in Minimum İlkesi (PMP) tabanlı bir optimizasyon yönteminin bir uzantısıdır. Bu PMP tabanlı yöntem, her optimizasyon adımını bulanık bir denetleyici kullanarak yük profili düzleştirir ve şarj-deşarj EA'lerinin önceliklerini dikkate alır. Bu yöntem, bağımsız karar verme optimizasyonu yoluyla şarj-deşarj yük profillerini düzleştirmek için kullanılmıştır (Bandpey ve Firouzjah, 2018). Burada EA'nın şarj veya deşarj edileceğini belirleyen bir bağımsız değişken tanımlanmıştır. Aynı zamanda araçların mevcut şarj durumları doğrultusunda şarj/deşarj öncelik seviyeleri belirlenmiştir. İlk olarak, 24 dairenin yük profilleri, iki yönlü yaklaşım açısından incelenmiştir ve EA'nın AÇIK/KAPALI durumu için birincil çalışma süresi batarya deşarj hızı, tak-çıkarma süreleri ve EA'lerin gerçek zamanlı çalışma süresi batarya deşarj hızı göz önüne alınmıştır. Bu noktada optimal şarj gücü bir arı kolonisi algoritması kullanılarak belirlenmiş ve ardından bir bulanık denetleyici kullanılarak toplam güç dağılımı elde edilmiştir. Bu algoritma, pik yükü düzleştirmiş ve transformatör yükünü azaltmıştır. Ancak, bu sistem koordinasyonsuz bir planlama olduğunda özellikle etkili olamamıştır. Bu nedenle, batarya ve transformatöre uygun kontroller yerleştirilmiştir.

Model Öngörülü Kontrol Kullanılarak Gerçek Zamanlı Şarj Stratejisi

Model Öngörülü Kontrol yaklaşımı (MÖK), geçmiş ve mevcut verilere göre standart çıkışı optimize etmek için kullanılabilen bir yöntemdir. MÖK'de, otomatik nesil planlaması, filo EA'lerinin çift yönlü olarak şarj ve deşarjını kontrol eder (Li vd. 2018). Genel olarak, farklı karmaşıklıklar ve özelliklere sahip gerçek zamanlı denetleyicileri değerlendirmek için iki yönlü bir tasarım kullanılır. MÖK, pil düzenlemesi ve verimliliği için gerçek zamanlı aralık senaryolarında kıyaslama değerlerini genişletmek için kullanılmıştır. Uygun bir güç faktörü ve güvenilirlik sağlamak, EA optimizasyonu için enerji yönetimi, güç talebini düzenlemek için MÖK'Ü Parçacık Sürü Optimizasyonu ile kullanılabilir (El-naggar ve Elgammal, 2018). Ayrıca, minimum güç tüketimi için miyop MPC tabanlı bir yol optimizasyonu, otomatik nesil planlamasının doğruluğunu tahmin etmek ve şarj durumu kısıtlamalarını güncellemek için kullanılabilir. Dalgalanan elektrik fiyatları, şarj ve deşarj işlemlerinde belirsizliklere neden olur. Bunu önlemek için şarj ve deşarj gücünün analizi için iki aşamalı bir optimizasyon yaklaşımı uygulanabilir. Enerji yönetimi için tahmin modellerini kullanmak, geleceği tahmin edebilme yeteneği sayesinde önceden kontrol ile ağın yükünü azaltabilir, ancak büyük ağlar için stratejik Araçtan Şebekeye (V2G) planlaması hala tatmin edici olmayabilir. Bu sorunu çözmek için, tahmin modellerinin çoklu bir araya getirilmesi yaklaşımı kullanılabilir, işletme kapasitesi, batarya şarj durumu ve frekans düzenlemesini içermektedir. Ağın desteğine ve etkin güce olan talebi azaltmanın başka bir yolu, reaktif gücün etkisini en aza indiren stokastik dağıtımlı bir tahmin modeli kullanmaktır. (Wang vd. 2016)

Meta-sezgisel Şarj-Deşarj Kontrol Optimizasyonu

Meta-sezgisel şarj-deşarj kontrol optimizasyonu, şarj oranları, şarj durumları, fiyatlandırma ve yük eğrisi gibi yetersiz bilgi durumlarında büyük ölçekli optimizasyon problemleri için kullanılan bir yöntemdir. Bu tür teknikler, belirli koşullar altında optimal çözümler bulmak için uygundur. Örneğin, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), güç dağıtım sistemlerinde frekans istikrarlaştırmak ve güç üretimini düzenlemek için kullanılmıştır (Fahad vd. 2017). Bu yöntem, hareketlilik desentleri, şarj-deşarj yöntemleri ve enerji kullanım desentleri ile ilgili parametreleri belirlemeyi içerir. Stokastik PSO yöntemi, belirli sorunları çözme performansını değerlendirmek için diğer optimizasyon yaklaşımlarıyla karşılaştırılır.

Yapılandırılmış enerji yönetimi optimizasyonu iki aşamada gerçekleşir ve ikinci aşamada EA şarjını optimize etmek için öngörülü model kontrolü uygulanır. Çoklu hedef optimizasyon, EA şarj istasyonlarının gelirlerini en üst düzeye çıkarma, batarya yönetimi sorunlarını çözme ve ortak bağlantı noktasındaki elektrik şebekesini etkileyebilecek güç dalgalanmalarını hafifletme gibi birkaç hedefi gerçekleştirmeyi hedeflemektedir (Eldeeb vd., 2018). Yeni bir iki seviyeli optimizasyon tekniği, hiyerarşik bölgesel mimariler için geliştirilmiştir. Bu yaklaşım iki

amaç taşıyor: İlk olarak, zirve yükleri minimize etmek için şarj ve deşarjı optimize ederek, dağıtım şemasını optimize eder ve agregatör tarafından hızlı karar verme olanağı sağlamaktadır. İkincisi ise adaptif kontrolle birlikte önceden gün öncesi planlama kullanarak koordine hedefler elde ederek tipik bir konut dağıtım şebekesini daha ekonomik dağıtım için daha esnek hale getirir. Çoklu ajan senaryosunda, performansını maksimize etmek için yanıt ve yanıt vermeyen sinyalleri göz önünde bulundururken yanıt ve ekonomik faktörleri tahmin eden bir şarj kontrol modeli geliştirilmiştir (Xydas vd. 2016).

Şarj ve Deşarj yönteminde Sezgisel Kontrol Optimizasyonu

Sezgisel optimizasyon, belirli bir optimizasyon problemine özgü pratik çözümler bulmak için kullanılabilir. Bu noktada önemli olan, belirli bir problem için sezgisel optimizasyon çözümünün farklı gerçek dünya senaryolarında aynı olmayabileceğini göz önünde bulunduraktır. Elektrik tarifeleri ve elektrikli araç sayısına dayalı basit bir EA tahmin yöntemi, fiyat dalgalanmalarını azaltmak için geliştirilmiştir (Juul vd.,2015). Bu heuristik yaklaşım, eşdeğer zaman aralıklarını kullanarak son derece karmaşık bir optimizasyon problemini basitleştirir. Gerçek dünya talep desenleri, gelirin basit bir şekilde elde edilebileceğini göstermektedir. Hedef fonksiyonun çok boyutluluğu, V2G altında çalışan EA'lerin toplam sistem işletme maliyetlerini azaltmasına, ağ karmaşıklığını basitleştirmesine ve belirli bir derecede doğrusallığı ortadan kaldırmasına olanak tanır. Ayrıca, PSO ile birleştirilmiş bir heuristik yaklaşım, EA şarj maliyetlerini azaltabilir. İleri-geri tarama algoritması tabanlı bir yük akışı çözümü, tepe yükü azaltma olaylarını yönetmeye yardımcı olur. İşyeri otoparklarında V2G ve G2V için bir zamanlama politikası, EA bağlantısına yönelik teknik ve iş senaryoları için bir sezgisel yaklaşımla analiz edilebilir. Bu analiz, günlük maliyetleri, tepe yükleri, frekans düzenleme sorunlarını ve ağ aşırı yüklenmelerini en aza indirmeye yardımcı olabilir (Panwar vd., 2015). V2G kontrolü, ağ adalarında kısa vadeli yük frekans sapmalarını telafi etmek için kullanılabilir.

11.4. Elektrikli Ağır Araçların Şarj İhtiyaçları ve Mevcut Durumu

Bir araç, brüt araç ağırlık derecelendirmesi (GVWR) (11.793 kg) büyükse, ağır hizmet sınıfına dahil edilir (U.S. Department of Energy, 2022). GVWR, bir aracın maksimum yüklü ağırlığıdır, yani aracın kendisi ve taşıdığı yükün ağırlığını ifade eder. Ağır hizmetli araçlar Sınıf 7 ve Sınıf 8 olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Sınıf 7 araçlar arasında toplu taşıma otobüsleri, çekici kamyonlar ve mobilya taşıma kamyonları yer alır. Sınıf 8 araçlar ise yarı-çekiciler, itfaiye kamyonları ve damper kamyonları içerir. Sınıf 7 araçların GVWR değeri 11.793 kg ile 14.968 kg arasında iken, Sınıf 8 araçlarının GVWR değeri 14.968 kg'dan daha büyüktür. Arabalara kıyasla mevcut taşıt sayısı az olsa da ağır taşıtların büyüme oranı oldukça yüksektir. Dolayısıyla şarj altyapısının büyüyen bu segmente de hizmet edecek şekilde gelişmesi önemlidir.

Batarya ile çalışan ağır hizmetli araçların menzili, kullanılan batarya tipi ve aracın ağırlığına bağlıdır. Tipik bir batarya ile çalışan yük taşıma aracının tek bir şarjla gidebileceği mesafe genellikle 100-200 km civarındadır (Tran vd., 2021). Ancak Tesla'nın piyasaya yeni çıkan yarı-çekici kamyonu (cubery truck), tam şarjla 550 km yol alabilmektedir (Int. Kyn. 14). Yük taşıma araçları için ana endişe, araçlar için gerekli kapasite ile bataryanın ağırlığı arasındaki ilişkidir. Daha uzun mesafeler için daha ağır bir batarya gerekmekte ve bu durum da daha fazla enerji ve güç çıkışı anlamına gelmektedir. Örneğin, 800 km'lik bir menzil için gereken batarya kapasitesi, mevcut enerji yoğunluklarına göre en az 1.000 kW-sa enerjiye karşılık gelir ve bu da şu anki enerji yoğunluklarına sahip olan bir batarya için en az 5.500 kg ağırlık gerektirir (Kalghatgi,2018).

Batarya ile çalışan ağır hizmetli araçların şarj süresi, şarj cihazı tipine ve aracın kapasitesine bağlıdır. Bir kamyon, güç çıkışı 25 kW'dan fazla olan bir seviye 3 şarj cihazına ihtiyaç duyar. Bu güç çıkışıyla, 1.000 kW-sa kapasiteli bir bataryayı şarj etmek yaklaşık 20 saat sürer. Ancak, 1 MW'ye kadar speküle edilen güç çıkışlarıyla, hızlı şarj kullanarak şarj süresi teorik olarak 1 saat kadar kısaltılabilir. Bu durumda hızlı şarjın genel batarya ömrünü kısaltabilmesi gibi olumsuz etkilere sahiptir (Han vd. , 2019). Mevcut teknoloji, 50 kW şarj yapabilme kapasitesine sahiptir (Liimatainen vd., 2019). Batarya ile çalışan ağır hizmetli aracın egzoz emisyonları sıfırdır; ancak şu anki batarya ile çalışan ağır hizmetli araçlar için altyapı sınırlıdır. Tesla, 2017 yılında Tesla Semi için "megacharger" adı verilen bir şarj ağı kurma planlarını açıklamıştır. "Megacharger", Semi'nin nispeten kısa bir sürede şarj edilebilmesi için 1 MW'den fazla güç sağlayacaktır. Ancak 2020 yılı itibarıyla, bu "megacharger"lardan hiçbirisi halka açık olarak kurulmamıştır. Gallo, bir şarj cihazı kurulumunun maliyetinin, düşük güçlü bir 16,5 kW şarj cihazı için 17.000 ile 32.000 \$ arasında olduğunu tahmin etmektedir ve daha güçlü, 450 kW şarj cihazları için bu mikarın 150.000 ile 200.000 \$ arasına yükseleceğini tahmin etmektedir (Gallo, 2016). Mevcut batarya ile çalışan ağır hizmetli araçların piyasada bulunmaması nedeniyle, şimdiye kadar çok az ağır hizmetli bataryalı elektrikli araç altyapısı kurulmuştur. Ancak, Kuzey Amerika genelinde kurulan geleneksel elektrikli araç şarj istasyonlarının sayısı artmakta olup bu istasyonların ağır hizmetli araçlar için uygun hale getirilebileceği potansiyel

bulunmakla birlikte bu durum, yüksek kapasiteye sahip bataryaların gerektirdiği şarj süreleri nedeniyle daha fazla zaman ve enerji tüketebilir (Cunanan, 2021).

Bir EA'nın bataryadan tekerleğe verimliliği ortalama olarak yaklaşık % 68 olmasına karşın, bu oran % 64,4 ile %86 arasında değişebilmektedir (Huang ve Zhang, 2011). Söz konusu kayıplar, tahrik sistemindeki sürtünme ve elektrik iletimindeki elektriksel dirençler nedeniyle meydana gelmekte olup bataryaya türüne ve ilgili elektriksel dirençlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bir Li iyon bataryasının özgül enerjisi tasarım ve özelliklere bağlı olup 120–220 W·sa·kg⁻¹ arasında değişebilir (Shen vd., 2018). Bataryalı yük taşıma elektrikli araçlarında bir bataryanın ömrü yaklaşık 6 yıl olarak beklenmektedir. Bu süre bataryanın bozunmasına bağlı olarak 1.000 ile 2.000 derin şarj çevrimine tekabül eder. Derin şarj çevrimi, bataryanın kapasitesinin orijinal kapasitesinin % 70 ile % 80'ine ulaşması için gereken süre olarak tanımlanır. Ek olarak bataryanın bozunması, sıcaklık, uygulama türü ve şarj durumu gibi faktörlere bağlıdır. Geleneksel dizel motorlarla rekabet etmek için elektrikli araçların hedefi yaklaşık 10 ila 15 yıl sürecek bir ömre ulaşmaktır (Cunanan, 2021).

ABD otomotiv endüstrisi, EA şarj için belirleyici belge, Society of Automotive Engineers (SAE) standardı J1772'dir. Bu standart, elektrikli araç besleme ekipmanı gereksinimlerini belirler. SAE J3105, altyapı ile araç arasındaki arabirimi standardize eder. Avrupa'da IEC standardı 61851 ve Çin'de Guobiao standartları (GB/T) 20234 gibi, her ikisi de J1772 standardından türetilmiş ve Avrupa ve Asya AC hattı gerilimlerine uygun şekilde uyarlanmış standartlar kullanılır. Ancak, üst yapı şarj altyapısı için standartlar tam olarak oluşturulmamış olup, ABD ve Avrupa Birliği'nde bu standartları tanımlamak için çeşitli komiteler çalışmaktadır (Farzam vd., 2022)

Avrupa Komisyonu 2015 yılında, Avrupa'daki şarj altyapısının standardizasyon eksikliğini tespit ederek, alternatif yakıt altyapısı için uygun Avrupa standartlarını geliştirmek veya mevcut olanları değiştirmek üzere European Committee for Standardization (CEN) ve European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) 'den Mandate 533 (M/533) adlı bir görevlendirme yapmıştır. Bu görevlendirme gereği, geliştirilen Avrupa standartları, tek bir çözüm içeren teknik özellikler içermelidir ve bu çözüm elektrikli otobüs (e-bus) besleme konektörleri ve priz çıkışları için ideal olarak elektrikli yolcu araçları ve hafif ticari araçlar için geliştirilen standartlardan türetilmiştir ve e-bus kablosuz şarj için tek bir çözüm içermelidir. Fakat 2018 yılında, ZeEUS (Zero Emission Urban Bus System) Projesi (Guida ve Leonard, 2014) Standardizasyon Grubu'ndan türetilen CEN-CENELEC eMobility Geçici e-Bus Yönlendirme Grubu, bir tür tedarik konektörü çözümü isteğine rağmen, el ile (manuel) olarak uygulanan Kombine Şarj Sistemi combo Tip 2 Mod 4 konektörünü (500 A ve 1.000 V'ye kadar) ve üç hızlı şarj çözümünü içeren bir sürüm tanıtmıştır. Bu çözümler, üst yapıya monte edilen, çatıya monte edilen ve yer seviyesinde otomatik bağlantı cihazlarını içermektedir ve bu, Avrupa Komisyonunun tek bir besleme konektörü çözümü talebinden sapmaktadır (Paakkinen vd., 2020).

2018 yılında, Charging Interface Initiative (CharIN), büyük batarya kapasitesine sahip elektrikli kamyon ve otobüsleri makul bir süre içinde şarj etme pazar talebini karşılamak için "Megawatt Şarj Sistemi" oluşturmak için bir çalışma başlatmıştır. Bu sistem konektörü, Kombine Şarj Sistemi gereksinimlerine uyar ve çift yönlü enerji akışını mümkün kılar ve 1 MW'nin üzerinde şarj sağlama kapasitesine sahiptir. Bu sistemin tam gereksinimleri ve özellik belgelerinin yakın gelecekte tamamlanması beklenmektedir (Mathieu vd., 2020).

Sağlam bir şarj altyapısı, menzil gereksinimlerini ve dolayısıyla büyük batarya paketlerine olan ihtiyacı azaltabilmektedir. Bununla birlikte, istasyonların yük araçlarının şarjı için hizmet dışı kaldığı süreyi en aza indirmek için altyapının kullanışı ve yüksek güçte kullanılması gereklidir.

12. ÖNERİLER

Şarj istasyonu sayısının artmaya devam etmesi ve tüm Türkiye'ye yayılması kritiktir. Ancak altyapı hacminin artışı ile beraber kalitenin iyileştirilmesi de çok önemlidir. Özellikle şarj istasyonu güvenliği, kullanıcı dostu olması, verimliliği ve teknolojisi önemli boyutlar olarak öne çıkmaktadır. Şarj istasyonu güvenliğinin sağlanması için istasyon kurulum ve bakım prosedürlerinin gözden geçirilmesi, özellikle kamusal şarj istasyonları kurulum ve bakımı oldukça kritiktir. Bakım prosedürleri ve kullanılması gereken ekipmanlar açıkça belirlenmeli ve güvenlik açısından kullanıcıların şarj istasyonu elektrik sistemine veya fonksiyonlarına erişimi kesinlikle kısıtlanmalıdır. Doğru kablolama ve ölçümlerle doğru kurulum yapılması sağlanmalıdır. Bunun yanı sıra, elektrikli araç ve şarj istasyonları için geliştirilen uluslararası kabul görmüş standartların ve birlikte çalışabilirlik şartlarının sağlanması ve kontrolü için mekanizmaların ve yasal çerçevenin geliştirilmesi de önem arz etmektedir. Güvenliğin yanı sıra, şarj istasyonlarında kullanıcı deneyiminin iyileştirilmesi de diğer önemli bir unsurdur. Örneğin ödeme yöntemlerinin standartlaştırılması, istasyonun hangi şarj istasyonu ağına dahil olduğundan bağımsız olarak kullanılabilen ortak uygulamaların sunulması gibi yaklaşımlar kullanıcı deneyimini

olumlu yönde etkileyecektir. Şarj istasyonu verimliliği için şarj operasyonlarından, şarj teknolojisine ve altyapının yerleşimine kadar birçok alanda akıllı sistemler, veri analitiği ve optimizasyon gibi gelişmiş ve hesaplamalı yöntemlerin geliştirilmesi ve kullanılmasının teşvik edilmesi katkı sağlayacaktır. Ayrıca binek otomobillerin yanı sıra elektrikli otobüs ve kamyonlar gibi daha yüksek güç ile şarj ihtiyacı olan araç türleri de hızla yaygınlaşmaktadır. Binek araçlar için hazırlanan altyapının yanına 120 kW üzeri DC şarj istasyonları kurarak altyapıyı bu ağır araçlar için de desteklemek gereksinimi artmaktadır. Gelecekte bugün gördüğümüz şarj istasyonlarının yerini kablosuz şarj istasyonlarının alacağı öngörülmektedir, bunun için de hazırlıklı olmak gereklidir. Burada özellikle indüksiyonla şarj prensibi ile şarj yapan yollar ve şarj noktalarının kritik olması beklenmektedir.

Türkiye'de kurumların şarj istasyonları için Ar-Ge çalışmalarını yürütmesi önünde yatırım, maliyet, teknolojik yetersizlik ve yasal çerçeve gibi konulara dayanan çeşitli engeller sayılabilir. Bu engelleri aşmak için, özel sektör, devlet kurumları ve yerel yönetimler arasında işbirliği yapmak olumlu etki yaratacaktır. Ayrıca, yatırım teşvikleri, vergi indirimleri, yasal düzenlemeler, vb. araç ve uygulamalar, şarj istasyonlarının Ar-Ge faaliyetlerini teşvik etmek için önemlidir. Elektrikli araçların yaygınlaşmasını sağlamak için önemli bir fırsat olarak görülen teşviklerin Türkiye'de yetersiz olması, elektrikli araçların ve şarj altyapısının yaygınlaşmasının yavaş olmasına neden olabilir. Türkiye'de elektrikli araçlar için diğer dünya ülkelerinin stratejilerine benzer stratejileri uygulayabilir. Örneğin;

- Vergi indirimleri veya ödünç para programları ile elektrikli araçların yaygınlaşmasını sağlamak,
- Şarj istasyonlarının yaygınlaşması için yatırımlar yapmak,
- Elektrikli araçlar için özel olarak belirlenmiş olan vergi oranlarını uygulamak,
- Elektrikli araçların yaygınlaşmasını sağlamak için teşvikler sunmak.

Türkiye'deki enerji altyapısı da şarj altyapısının gelişmesi için engellerden biri olarak sayılabilir. Bu kapsamda Türkiye'de elektrik dağıtım hattı kapasitesinin yetersiz kalması, elektrik üretim kapasitesinin istasyonların ihtiyacını karşılamakta yetersiz kalması, elektrik depolama kapasitesinin yetersiz olması ve elektrik fiyatlarının uygun olmaması gibi alt nedenler sıralanabilir. Bu engeller aşılmadığı takdirde şarj istasyonlarının kurulması ve işletilmesi zorlaşabilir. Ancak, Türkiye'de enerji sektöründe yapılan yatırımlar ve yenilikçi sistemler ile bu engellerin azaltılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, giderek artan elektrikli araç sayısı ile birlikte şarj istasyonlarının önemi ve bu alanda yatırımların önemi de artmaktadır çünkü enerji arzının daha etkili yönetilmesini sağlamak için elektrikli araç batarya şarj istasyonları kullanmak mümkündür. Bunun etkin hale gelebilmesi için şarj piyasasının buna yönelik tasarımı ve depolama, veri analizi, fiyat politikaları, yenilenebilir enerji gibi yeniliklerin bu sürece entegre edilmesi gereklidir.

Bu yaklaşımlar kullanıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması da önem kazanır. "Duck curve" olarak adlandırılan süreç, gün içi enerji tüketiminin zamanla nasıl değişebileceğini gösterir. Bu süreçte, sabah saatlerinde enerji tüketimi düşüktür, ancak öğle saatlerinde ve akşam saatlerinde tüketim artar. Bu sürecin sonucunda, öğle saatlerinde güneş enerjisi ile üretilen enerjinin azalması ve akşam saatlerinde artan enerji ihtiyacı nedeniyle, klasik enerji üretim metotlarına daha fazla ihtiyaç duyulur. Türkiye için, "duck curve" sürecini yönetmek için çeşitli yollar kullanılabilir. Elektrikli araçlar yaygınlaştığında birer enerji depolama birimi olarak kullanılması da bu yollardan biri olacaktır. Elektrikli araçlar enerji arzının uygun olduğu zamanlarda şarj edilebilen ve arzın sıkışık olduğu zamanlarda deşarj edilebilecek bataryalara sahiptir. Bu yöntemde elektrikli araçların şarj ve deşarj kontrol optimizasyonu için kullanılan etkin stratejiler önemlidir. Ayrıca batarya şarj istasyonları, enerji yönetimi yazılımları kullanarak, tüketim ve üretim verilerini analiz ederek, elektrik arzının etkili bir şekilde yönetilmesini sağlar. Bu yazılımlar, elektrik arzındaki sıkışma potansiyellerini azaltmak adına gereken önlemleri almak için kullanılır. Kısaca, akıllı şebeke sistemi kullanılmalı ve tüm tüketicilerin buna adapte olacağı şekilde güncellemeler yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Abbas, M. and Kiseon, K., 2018. Low-complexity charging/discharging scheduling for electric vehicles at home and common lots for smart households pro-consumers. IEEE Trans. Consum. Electron, 2864548, 2018.

Afshar, S., Macedo, P., Mohamed, F. and Disfani, V., 2021. Mobile charging stations for electric vehicles—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 152, 111654.

Ahmad, F. Iqbal A., Ashraf I., Marzband, M., Khan, I., 2022. Optimal location of electric vehicle charging station and its impact on distribution network: A review, Energy Reports, 8, 2314–2333

Ajzen, I., 1991. The theory of planned behaviour. Organizational Behavior and Human Decision Processes, 50 (2), 179–211.



- Amini, M.H., Moghaddam, M.P., Karabasoglu, O., 2017. Simultaneous allocation of electric vehicles' parking lots and distributed renewable resources in smart power distribution networks. *Sustainable Cities Soc.* 28, 332–342.
- Arabul, F. K., Arabul, A. Y., Kumru, C. F. and Boynuegri, A. R., 2017. Providing energy management of a fuel cell–battery–wind turbine–solar panel hybrid off grid smart home system. *International journal of hydrogen energy*, 42 (43), 26906–26913.
- Arvidsson, R. and Ciroth, A., 2021. Introduction to “Life Cycle Inventory Analysis”. In A. Ciroth and R. Arvidsson, Eds., *Life Cycle Inventory Analysis : Methods and Data*, 1–14. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62270-1_1
- Awasthi, A., Venkitesamy, K., Padmanaban, S., Selvamuthukumar, R., Blaabjerg, F., Singh, A.K., 2017. Optimal planning of electric vehicle charging station at the distribution system using hybrid optimization algorithm. *Energy*, 133, 70–78.
- Bandpey, M. F. and Firouzjah, K. G., 2018. Two-stage charging strategy of plug-in electric vehicles based on fuzzy control. *Computers and Operations Research*, 96, 236–243.
- Banegas, J., Mamkhezri, J., 2023. A systematic review of geographic information systems based methods and criteria used for electric vehicle charging station site selection. *Environ Sci Pollut Res* 30, 68054–68083. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27383-6>
- Battapothula, G., Yammani, C., Maheswarapu, S., 2019. Multi-objective optimal planning of FCSs and DGs in distribution system with future EV load enhancement. *IET Electr. Syst. Transp.* 9 (3), 128–139.
- Bi, Z., Song, L., De Kleine, R., Mi, C. C. and Keoleian, G. A., 2015. Plug-in vs. wireless charging: Life cycle energy and greenhouse gas emissions for an electric bus system. *Applied Energy*, 146, 11–19.
- Brückmann, G. and Bernauer, T., 2023. An experimental analysis of consumer preferences towards public charging infrastructure. *Transportation Research Part D*, 116, 103626.
- Chen, L., Xu, C., Song, H., Jermisittiparsert, K., 2021. Optimal sizing and siting of EVCS in the distribution system using metaheuristics: A case study. *Energy Rep.* 7, 208–217.
- Cunanan, C., Tran, M. K., Lee, Y., Kwok, S., Leung, V. and Fowler, M., 2021. A review of heavy-duty vehicle powertrain technologies: Diesel engine vehicles, battery electric vehicles, and hydrogen fuel cell electric vehicles. *Clean Technologies*, 3 (2), 474–489.
- Dahlberg G. and Rodriguez J.P.R., 2023. Life-Cycle Assessment of A Charging Hub for Electric Trucks Master's Thesis in Industrial Ecology, Department of Technology Management and Economics Division Of Environmental Systems Analysis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Daramy-Williams, E., Anable, J. and Grant-Muller, S., 2019. A systematic review of the evidence on plug-in electric vehicle user experience. *Transportation Research Part D*, 71, 22–36.
- Das, H.S., Rahman, M.M., Li, S., Tan, C.W., 2020. Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: a technological review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, November. 120. doi:10.1016/j.rser.2019.109618.
- Davis, F.D., 1989. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quart.* 13 (3), 319–340.
- Deb, N., Singh, R., Brooks, R. R. and Bai, K., 2021. "A review of extremely fast charging stations for electric vehicles." *Energies*, 14(22), 7566.
- Deb, S., Member, S., Tammi, K., Gao, X.-z., Kalita, K., Mahanta, P., 2020. A hybrid multi-objective chicken swarm optimization and teaching learning based algorithm for charging station placement problem. *IEEE Access*, 92573–92590.
- Deng, B. and Wang, Z., 2011. Research on electric-vehicle charging station technologies based on smart grid. In *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 1–4. IEEE Computer Society.
- Dericioglu, C., Yirik, E., Unal, E., Cuma, M. U., Onur, B., Tumay, M., 2018. A review of charging technologies for commercial electric vehicles. *International Journal of Advances on Automotive and Technology*, 2 (1) 61–70.
- Dhungana, A., Bulut, E., 2020. Peer-to-peer energy sharing in mobile networks: Applications, challenges, and open problems. *Ad Hoc Networks*, 97, 102029.
- Diamond, D., 2009. The impact of government incentives for hybrid-electric vehicles: evidence from US states. *Energy Policy* doi:10.1016/j.enpol.2008.09.094
- Dini, P., Saponara, S., Colicelli, A., 2023. Overview on Battery Charging Systems for Electric Vehicles. *Electronics* 2023, 12, 4295. <https://doi.org/10.3390/electronics12204295>.
- Dunn, B., Kamath, H., Tarascon, J. M., 2011. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science*, 334 (6058) 928–935.
- Earl, T., Mathieu, L., Cornelis, S., Kenny, S., Ambel, C. C., Nix, J., 2018. Analysis of long haul battery electric trucks in EU. In *Commercial vehicle workshop*, graz.



- Eldeeb, H. H., Faddel, S. and Mohammed, O. A., 2018. Multi-objective optimization technique for the operation of grid tied PV powered EV charging station. *Electric Power Systems Research*, 164, 201-211.
- El-naggar, M. F. and Elgammal, A. A. A., 2018. Multi-objective optimal predictive energy management control of grid-connected residential wind-pv-fc-battery powered charging station for plug-in electric vehicle. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 13 (2), 742-751.
- Eze, V. H. U., Eze, M. C., Ogbonna, C. C., Ugwu, S. A., Emeka, K., Onyeke, C. A., 2021. "Comprehensive Review of Recent Electric Vehicle Charging Stations." *Global Journal of Science Research and Publications*, 1 (12), 16-23.
- Fabianek, P., Madlener, R., 2023. Multi-criteria assessment of the user experience at E-Vehicle charging stations in Germany. *Transportation Research Part D*, 121, 103782.
- Fahad, M., Aadil, F. and Khan, S., 2017. Optimization of vehicular node clustering process using evolutionary algorithms. In 2017 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence and Computing, Advanced and Trusted Computed, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation, SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCom/IOP/SCI., 1-5. IEEE.
- Falvo, M. C., Manganelli, M., Moscatiello, C. and Vellucci, F., 2022. Electrical vehicles and charging stations: State of art and future perspectives. In 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/landCPS Europe., 1-7. IEEE.
- Faridpak, B., Gharibeh, H.F., Farrokhifar, M., Pozo, D., 2019. Two-step LP approach for optimal placement and operation of EV charging stations. In: *Proceedings of 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT-Europe 2019*, 1–5.
- Farzam Far, M., Pihlatie, M., Paakkinen, M., Antila, M. and Abdulah, A., 2022. Pre-normative charging technology roadmap for heavy-duty electric vehicles in Europe. *Energies*, 15 (7), 2312.
- Figenbaum, E., Wangsness, P.B., Amundsen, A.H. and Milch, V., 2022. Empirical Analysis of the User Needs and the Business Models in the Norwegian Charging Infrastructure Ecosystem. *World Electric Vehicle Journal*, 13, 185.
- Gallo, J. B., 2016. Electric truck and bus grid integration, opportunities, challenges and recommendations. *World Electric Vehicle Journal*, 8 (1), 45-56.
- Gampa, S.R., Jasthi, K., Goli, P., Das, D., Bansal, R.C., 2020. Grasshopper optimization algorithm based two stage fuzzy multiobjective approach for optimum sizing and placement of distributed generations, shunt capacitors and electric vehicle charging stations. *J. Energy Storage* 27, 101117.
- Ghasemi-Marzbali, A., 2022. "Fast-charging station for electric vehicles, challenges and issues: A comprehensive review." *Journal of Energy Storage*, 49, 104136.
- Gong, Q., Li, Y. and Peng, Z. R., 2007. Optimal power management of plug-in HEV with intelligent transportation system. In 2007 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics, 1-6. IEEE.
- Guida, U. and Leonard, S., 2014. ZeEUS: Zero emission urban bus system. In 2014 IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC., 1-7. IEEE.
- Gutjar, M. and Kowald, M., 2023. The configuration of charging stations: What do potential users want? *Travel Behaviour and Society*, 32, 100579.
- Han, X., Lu, L., Zheng, Y., Feng, X., Li, Z., Li, J. and Ouyang, M., 2019. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. *ETransportation*, 1, 100005.
- Hannan, M. A., Hoque, M. M., Mohamed, A. and Ayob, A., 2017. "Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 771 789.
- Huang, W. D. and Zhang, Y. P., 2011. Energy efficiency analysis: biomass-to-wheel efficiency related with biofuels production, fuel distribution, and powertrain systems. *PLoS One*, 6 (7), e22113.
- Idaho National Laboratory, INL., 2015. Plugged in: how Americans charge their electric vehicles.. Summary Report, https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/arr_a/PluggedInSummaryReport.pdf.
- Jolliet, O., Saade-Sbeih, M., Shaked, S., Jolliet, A. and Crettaz, P., 2015. Environmental life cycle assessment. CRC Press.
- Juul, F., Negrete-Pincetic, M., MacDonald, J. and Callaway, D., 2015, July. Real-time scheduling of electric vehicles for ancillary services. In 2015 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 1-5. IEEE.
- Kabus, M., Nolting, L., Mortimer, B. J., Koj, J. C., Kuckshinrichs, W., De Doncker, R. W. and Praktijnjo, A., 2020. Environmental impacts of charging concepts for battery electric vehicles: a comparison of on-board and off-board charging systems based on a life cycle assessment. *Energies*, 13 (24), 6508.
- Kalghatgi, G., 2018. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport?, *Applied energy*, 225, 965-974.



Karpenko A., Kinnunen T., Madhikermi M., Robert, J., Framling K., Bhargav D., 2018, Data Exchange Interoperability in IoT Ecosystem for Smart Parking and EV Charging, *Sensors* 2018, 18, 4404; doi:10.3390/s18124404

Kempton, W. and Tomić, J., 2005. Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. *Journal of power sources*, 144 (1), 280-294.

Khan, W., Ahmad, F. and Alam, M. S., 2019. Fast EV charging station integration with grid ensuring optimal and quality power exchange. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22 (1), 143-152.

Kong, W., Luo, Y., Feng, G., Li, K., Peng, H., 2019. Optimal location planning method of fast charging station for electric vehicles considering operators, drivers, vehicles, traffic flow and power grid. *Energy* 186, 115826.

Lacka, E. and Chong, A., 2016. Usability perspective on social media sites' adoption in the B2B context. *Industrial Marketing Management*, 54, 80-91.

LaMonaca, S. and Ryan, L., 2022. The state of play in electric vehicle charging services—A review of infrastructure provision, players, and policies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 154, 111733.

Law, E.L-C., Roto, V., Hassenzahl, M., Vermeeren, A.P.O.S. and Kort, J., 2009. Understanding, scoping and defining user eXperience: A survey approach. CHI 2009, 4-9 Nisan 2009, Boston, MA, ABD.

Lee, J.H., Chakraborty, D., Hardman, S.J. and Tal, G., 2020. Exploring electric vehicles charging patterns: Mixed usage of charging infrastructure. *Transportation Research Part D*, 79, 102249.F

Li, W., Zhang, T. and Wang, R., 2018,. Energy management model of charging station micro-grid considering random arrival of electric vehicles. In 2018 IEEE international conference on energy internet, ICEI., 29-34. IEEE.

Li, Z., Sahinoglu, Z., Tao, Z. and Teo, K. H., 2010,. Electric vehicles network with nomadic portable charging stations. In 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference-Fall, 1-5. IEEE.

Lieven, T., Mühlmeier, S., Henkel, S., Waller, J.F., 2011. Who will buy electric cars? An empirical study in Germany. *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.* 16 (3), 236–243. doi:10.1016/j.trd.2010.12.001.

Liimatainen, H., van Vliet, O. and Aplyn, D., 2019. The potential of electric trucks—An international commodity-level analysis. *Applied energy*, 236, 804-814.

Lucas, A., Silva, C. A. and Neto, R. C., 2012. Life cycle analysis of energy supply infrastructure for conventional and electric vehicles. *Energy Policy*, 41, 537-547.

Mathieu, L., Cornelis, S., Nix, J. and Bannon, E., 2020. Recharge EU trucks: time to act. A Roadmap for Electric Truck Charging Infrastructure Deployment.

Mehrabi, A. and Kim, K., 2018. Low-complexity charging/discharging scheduling for electric vehicles at home and common lots for smart households prosumers. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 64, 3., 348-355.

Mendoza, J. M. F., Josa, A., Rieradevall, J. and Gabarrell, X., 2016. Environmental Impact of Public Charging Facilities for Electric Two-Wheelers. *Journal of Industrial Ecology*, 20 (1), 54-66.

Metais, M.O., O. Jouini, Y. Perez, J. Berrada, E. Suomalainen, 2022. Too much or not enough? Planning electric vehicle charging infrastructure: A review of modeling options, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 153, 111719

Nansai, K., Tohno, S., Kono, M., Kasahara, M. and Moriguchi, Y., 2001. Life-cycle analysis of charging infrastructure for electric vehicles. *Applied energy*, 70 (3), 251-265.

Narasipuram, R. P. and Mopidevi, S., 2021. A technological overview and design considerations for developing electric vehicle charging stations. *Journal of Energy Storage*, 43, 103225.

Paakkinen, M., Cremers, P. and Far, M. F., 2020. Ensuring short-term e-bus compatibility and interoperability within Europe—ASSURED 1.0 interoperability reference. *Proceedings of the 8th Transport Research Arena: Rethinking Transport—Towards Clean and Inclusive Mobility*, Helsinki, Finland, 27-30.

Pagany, R., Ramirez Camargo, L, Dorner, W., 2019. A review of spatial localization methodologies for the electric vehicle charging infrastructure, *International Journal of Sustainable Transportation*, 13, 6., 433 – 449.

Pal, A., Bhattacharya, A., Chakraborty, A.K., 2021. Allocation of electric vehicle charging station considering uncertainties. *Sustain. Energy Grids Netw.* 25, 100422.

Panwar, L. K., Reddy, K. S., Kumar, R., Panigrahi, B. K. and Vyas, S., 2015. Strategic Energy Management, SEM. in a micro grid with modern grid interactive electric vehicle. *Energy Conversion and Management*, 106, 41-52.

Pareek, S., Sujil, A., Ratra, S. and Kumar, R., 2020. Electric vehicle charging station challenges and opportunities: A future perspective. In 2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing, ICONC3., 1-6. IEEE.



- Park, C. and Yong, T., 2017. Comparative review and discussion on P2P electricity trading. *Energy Procedia*, 128, 3-9.
- Ponnam, V.K.B., Swarnasri, K., 2020. Multi-objective optimal allocation of electric vehicle charging stations and distributed generators in radial distribution systems using metaheuristic optimization algorithms. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* 10, 3.
- Potoglou, D., Song, R. and Santos, G., 2023. Public charging choices of electric vehicle users: A review and conceptual framework. *Transportation Research Part D*, 121, 103824.
- Ricaud, C. and Vollet, P., 2010. Connection method for charging systems—a key element for electric vehicles. *Schneider Electric*.
- Sachan, S., Deb, S., Singh, P. P., Alam, M. S., & Shariff, S. M., 2022. A comprehensive review of standards and best practices for utility grid integration with electric vehicle charging stations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 11(3), e424.
- Shen, X., Liu, H., Cheng, X. B., Yan, C. And Huang, J. Q., 2018. Beyond lithium ion batteries: Higher energy density battery systems based on lithium metal anodes. *Energy Storage Materials*, 12, 161-175.
- Shin M., Hwimin K., Hyoseop K. And Hyuksoo J., 2016. Building an Interoperability Test System for Electric Vehicle Chargers Based on ISO/IEC 15118 and IEC 61850 Standards, *Appl. Sci.* 2016, 6, 165; doi:10.3390/app6060165
- Shukla, A., Verma, K., Kumar, R., 2019. Multi-objective synergistic planning of EV fast-charging stations in the distribution system coupled with the transportation network. *IET Gener. Transm. Distrib.* 13, 3421–3432.
- Simorgh, H., Doagou-Mojarrad, H., Razmi, H., Gharehpetian, G.B., 2018. Costbased optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations considering demand response programmes. *IET Gener. Transm. Distrib.* 12 (8), 1712–1720.
- Smart, J. G., and Salisbury, S. D., 2015. Plugged in: How Americans charge their electric vehicles, No. INL/EXT-15-35584. Idaho National Lab., INL., Idaho Falls, ID, United States.
- Solanke, T. U., Ramachandaramurthy, V. K., Yong, J. Y., Pasupuleti, J., Kasinathan, P. and Rajagopalan, A., 2020. A review of strategic charging–discharging control of grid-connected electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 28, 101193.
- ten Have, S.Y., Gkiotsalitis, K. and Geurs, K.T., 2020. Investigating the future of ultrafast charging: A choice experiment in the Netherlands. *World Electric Vehicle Journal*, 11, 70.
- Tian, W., He, J., Niu, L., Zhang, W., Wang, X. and Bo, Z., 2012. Simulation of vehicle-to-grid, V2G. on power system frequency control. In *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 1-3. IEEE.
- Tian, Z., Hou, W., Gu, X., Gu, F., Yao, B., 2018. The location optimization of electric vehicle charging stations considering charging behavior. *Simulation* 94 (7), 625–636
- Tran, M. K., Bhatti, A., Vrolyk, R., Wong, D., Panchal, S., Fowler, M. and Fraser, R., 2021. A review of range extenders in battery electric vehicles: Current progress and future perspectives. *World Electric Vehicle Journal*, 12 (2), 54.
- U.S. Department of Energy., 2021. Workplace charging for plug-in electric vehicles. *Alternative Fuels Data Centre*; Available at: https://afdc.energy.gov/fuels/electricity_charging_workplace.html. [Accessed July 2021]. Accessed.
- US Department of Energy., 2022. *Alternative Fuels Data Center: Maps and Data– Vehicle Weight Classes and Categories*.
- Visaria, A.A., Jensen, A.F., Thorhauge, M. and Mabit, S.E., 2022. User preferences for EV charging, pricing schemes, and charging infrastructure. *Transportation Research Part A*, 165, 120-143.
- Wang, B., Huang, R., Wang, Y., Nazaripouya, H., Qiu, C., Chu, C. C. and Gadh, R., 2016. Predictive scheduling for Electric Vehicles considering uncertainty of load and user behaviors. In *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, T&D.*, 1-5. IEEE.
- Wi, Y. M., Lee, J. U. and Joo, S. K., 2013. Electric vehicle charging method for smart homes/buildings with a photovoltaic system. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 59, 2., 323-328.
- Wohlschlager, D., Haas, S. and Neitz-Regett, A., 2022. Comparative environmental impact assessment of ICT for smart charging of electric vehicles in Germany. *Procedia CIRP*, 105, 583-588.
- Wolff, S. and Madlener, R., 2019. Charged up? Preferences for Electric Vehicle Charging and Implications for Charging Infrastructure Planning. *FCN Working Paper No. 3. RWTH Aachen University*.
- Xiang, Y., Liu, J., Li, R., Li, F., Gu, C., Tang, S., 2016. Economic planning of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates. *Appl. Energy* 178, 647–659.
- Xydas, E., Marmaras, C., and Cipcigan, L. M., 2016. A multi-agent based scheduling algorithm for adaptive electric vehicles charging. *Applied energy*, 177, 354-365.
- Yi, T., Cheng, X.-b., Zheng, H., Liu, J.-p., 2019. Research on location and capacity optimization method for electric vehicle charging stations considering user’s comprehensive satisfaction. *Energies*.



- Yilmaz, M. and Krein, P. T., 2012. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE transactions on Power Electronics*, 28 (5), 2151-2169.
- Yun, B., Sun, D., Zhang, Y., Deng, S. and Xiong, J., 2019. A charging location choice model for plug-in hybrid electric vehicle users. *Sustainability*, 11 (20), 5761.
- Zeb, M.Z., Imran, K., Khattak, A., Janjua, A.K., Pal, A., Nadeem, M., Zhang, J., Khan, S., 2020. Optimal placement of electric vehicle charging stations in the active distribution network. *IEEE Access* 8, 68124–68134.
- Zhang, H., Hu, Z., Xu, Z., Song, Y., 2016. An integrated planning framework for different types of PEV charging facilities in urban area. *IEEE Trans. Smart Grid* 7 (5), 2273–2284.
- Zhang, Z., Messagie, M., Hegazy, O. and an Mierlo, J., 2017, December. The Environmental Performance of Different Power Rate's Charging Infrastructure for Electric Vehicles, a Life Cycle Perspective. In *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC.*, 1-7. IEEE.
- Zhang, Z., Sun, X., Ding, N. and Yang, J., 2019. Life cycle environmental assessment of charging infrastructure for electric vehicles in China. *Journal of Cleaner Production*, 227, 932-941.
- Zhang, Z., Xu, H., Shi, L., Li, D. and Han, Y., 2012. A unit power factor DC fast charger for electric vehicle charging station. In *Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Vol. 1, 411-415. IEEE.
- Zhao, E., May, E., Walker, P. D. and Surawski, N. C., 2021. Emissions life cycle assessment of charging infrastructures for electric buses. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 48, 101605.

İnternet Kaynakları

- [1] <https://www.tesla.com/supercharger>, 12/04/2024.
- [2] <https://easby.com/ev-charging>, 11/12/2024.
- [3] <https://www.tesla.com/supercharger>, 03/07/2024.
- [4] <https://new.abb.com/ev-charging/tr>, 10/10/2023.
- [5] <https://www.sae.org/standards>, 20/10/2023.
- [6] <https://www.iec.ch/homepage>
- [7] <https://deltrixchargers.com/contact-us/>
- [8] <https://www.recurrentauto.com/research/volts-amps-and-charging-speeds>, (Brannson August, 30.08.2023), 12/04/2024.
- [9] IEA (2021) Global EV Outlook 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>, Licence: CC BY 4.0, 10/10/2023.
- [10] IEA (2022), Global EV Outlook 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>, Licence: CC BY 4.0, 10/10/2023.
- [11] IEA (2023), Global EV Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0, 10/10/2023.
- [12] www.epdk.gov.tr, 10/10/2023.
- [13] <https://www.eetasia.com/gartner-6-million-evs-to-be-shipped-in-2022/>, 13/02/2023.
- [14] www.tesla.com/cybertruck, 20/11/2023.

**EK-1:**

Elektrikli araç şarj istasyonlarının yer seçimi probleminde kullanılan değişkenler ve değişkenlerin kullanım sıklıkları , Banegas ve Mamkhezri, 2023)

Değişken Kategorisi	Değişken	Sıklık
Coğrafi	Mağaza / yiyecek / umumi alanlara yakınlık	21
	Ana yollara, koridorlara, kavşaklara yakınlık	18
	Toplu taşıma / paylaşımlı taşıma merkezlerine yakınlık	17
	Park alanlarının yakınlığı ve büyüklüğü	15
	Şarj istasyonlarının konumu / yakınlığı	15
	Yeşil alanlara / bitkilere / umumi açık alanlara yakınlık	13
	Benzin istasyonlarına yakınlık	13
	Su kaynaklarına / su kütüphanelerine yakınlık	12
	Bölgedeki şarj istasyonlarının sayısı	11
	İlgi noktaları / turizm / bölgesel merkezler / hizmet seviyeleri	11
	Arazi eğimi	10
	Alt istasyon / dağıtım ağı / besleme hattı / şarj istasyonu bağlantısına yakınlık	10
	Şarj istasyonunun kapsama alanı / hizmet verilen alan	8
	Jeofelaketlere yakınlık, toprak kaymaları, depremler)	6
	Kütüphanelere / okullara / postanelere / yaşlı merkezlerine yakınlık	6
	Sanayi bölgelerine yakınlık	5
	Şarj istasyonları arasındaki mesafe	4
	Bakım ve servis merkezine yakınlık	4
	Olası şarj istasyonu konumları / alternatif konumlar	4
	Su baskını alanında	3
	İş yerlerine yakınlık	3
	Arazi türü / arazi kullanımı	3
	Kamu güvenliği tesislerine yakınlık	3
	Hükümet tesislerine yakınlık	2
	Yaya erişilebilirliği	2
	Sağlık tesislerine yakınlık	2
	İbadet yerlerine yakınlık	1
	Rakım	1
	Limana yakınlık	1
	Hizmet güvenliği	1
Gece ışık endeksi	1	
Askeri üsse yakınlık	1	
İnşaat / koruma projelerine yakınlık	1	
Enerji, Şarj İstasyonu, Şi) ve EA özellikleri	Elektrik talebi / seyahat talebi / EA'ların güç talebi / EA bataryalarının şarj durumu	14
	Şarj başına maksimum araç sayısı / maksimum kullanıcı grup boyutu / maksimum hizmet kapasitesi / istasyondaki şarj cihazlarının üst sınırı	10
	EA menzili, örn. kilometre/kWh)	7
	Sürdürülebilir enerji potansiyeli	6
	Şarj istasyonunun gücü, yavaş / hızlı vb.)	5
	Ağ güç arzı kapasitesi	5
	İstasyondaki şarj cihazlarının sayısı	3
	Elektrik ağı hassasiyeti /EAŞİ'nin elektrik şebekesine etkisi	2
	EAŞİ'ye erişim süresi , saat/gün)	2
	Dikkate alınan yaşam döngüleri	1
Önceden seçilen şarj istasyonu türleri	1	



Değişken Kategorisi	Değişken	Sıklık
Ulaşım, trafik, güzergâh özellikleri	Trafik yoğunluğu / kavşak alanı / seyahat eden EA sayısı / trafik analiz bölgesi	21
	Köken-hedef düğüm mesafesi / seyahat zinciri mesafesi	9
	Şarj istasyonunda ortalama kalış süresi	4
	Mevcut / kurulu şarj istasyonlarının etkileri	3
	EA'nin ortalama hızı / seyahat süresi	2
	EA sürüş desenleri	2
	Dönem başına EA başına ortalama mesafe	2
	Hücredeki kalan talepler	1
	Talep düğümü	1
	Taksi sayısı	1
	Hareket eden EA'ların dinamik konumu	1
Ekonomik	Hanehalkı geliri	14
	İnşaat maliyeti / Şİ birim fiyatı	12
	Elektrik / diğer yakıtların fiyatı	9
	Arazi maliyeti / arsa değeri	8
	İşletme ve yönetim maliyeti / farklı EAŞİ ölççeklerindeki oran	4
	Genişleme olasılığı / maliyeti	4
	Ekonomik verimlilik	3
	Kullanıcıların seyahat zamanı maliyeti	2
	Hükümet desteği / teşvikler	2
	EAŞİ'nun yeniden yerleştirme maliyeti	1
	Fotovoltaik panellerin birim fiyatı	1
Geçiş maliyeti	1	
Sosyodemografik	Nüfus yoğunluğu / toplam nüfus	20
	EA sahiplik oranı / EA benimseme yoğunluğu / EA penetrasyon oranı	16
	Sahip olunan araç sayısı / bölgedeki araç yoğunluğu	5
	Mestek / istihdam değişkenleri	5
	Yaş / yaş grupları	4
	Cinsiyet	3
	Alt gruplar	3
	Aile büyüklüğü	2
	Eğitim düzeyi	2
	EA teknolojisi ilgisi / kamusal EA benimseme desteği	2
	Vatandaşlık / ulusallık / etnik bilgiler	1
	Konut yoğunluğu / tipi	1
	Çevresel	Kirlilik / çevre bilinci parametreleri
Ortalama yıllık sıcaklık		1
Gürültü / elektromanyetik etkiler		1

GELECEĞE BAKIŞ: LİTYUM İYON SONRASI



L. Basat¹, S. Altun¹, M. Doğrusöz², R. Demir Çakan², M. Farsak³, M. Mazman⁴, T. Akbay⁵, Ç. Toparlı⁶, G. Kardaş¹ [+]

ÖZET

Taşınabilir elektronikler, elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji depolama gibi çeşitli uygulamalarda lityum iyon pillere olan talep sürekli artmaktadır. Lityum iyon pillerin sorunlarını ortadan kaldıracak ve artan talebi karşılamaya yönelik alternatif pil teknolojileri öne çıkmaktadır. Lityum iyon pillerdeki sıvı elektroliti katı elektrolitle değiştiren katı hal pilleri alternatif teknolojilerden bir tanesini içermektedir. Bu piller gelişmiş güvenlik, yüksek enerji yoğunluğu ve geniş çalışma sıcaklığı gibi avantajlara sahiptir. Geleneksel lityum iyon hücrelerinde birçok güvenlik sorunu oluşturan dendrit oluşumu da azalmaktadır. Ancak üretim süreçleri, maliyet etkinliği ve pilin ömrü boyunca tutarlı performansın sağlanması açısından zorluklar devam etmektedir. Ayrıca lityum iyon pile alternatif olarak katotta kükürt ile lityum-kükürt (Li-S) ve oksijen ile Li-hava pilleri (Li-O₂) çalışılmaktadır. Bu sistemlerde de hala aşılması gereken önemli zorluklar vardır.

Diğer bir alternatif ise lityum iyonları yerine sodyum iyonlarının kullanıldığı sodyum iyon pilleridir. Sodyum iyon piller, sodyumun bolluğu nedeniyle maliyet avantajı sunabilir, ancak lityum iyon pillerle karşılaştırılabilir performans elde etme en önemli sorundur. Lityum iyon pillerin sonrası için birçok pil kimyası üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Ancak bu çalışmada, pazara girme potansiyeli yüksek ve elektrikli araçlarda kullanılacak pillere yer verilmiştir. Bu piller pazara girme potansiyeli yakın zamanda olandan başlanarak sırasıyla sodyum iyon, katı hal lityum iyon, Li-S ve Li-O₂ olarak belirlenmiştir.

[+] gulfeza@cu.edu.tr

1 Çukurova Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Balcalı Mah. Mithat ÖZHAN Bul., No:35/6, Sarıçam, 01330 Adana, Türkiye.

2 Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Böl., Cumhuriyet Mahallesi, Darıca, 41420 Kocaeli, Türkiye.

3 Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Batarya Sistemleri ve Hidrojen Teknolojileri, Karacaoğlan Yerleşkesi, 80000, Osmaniye, Türkiye.

4 T Dinamik Enerji A.Ş. Kısıklı, İncir Sk. No:6/B, Üsküdar, 34692 İstanbul, Türkiye.

5 Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, 26 Ağustos Yerleşkesi, İnönü Mah., Kayışdağı Cad., Ataşehir, 34755 İstanbul, Türkiye.

6 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Üniversiteler Mah., Dumlupınar Bul. No:1, Çankaya, 06800 Ankara, Türkiye.

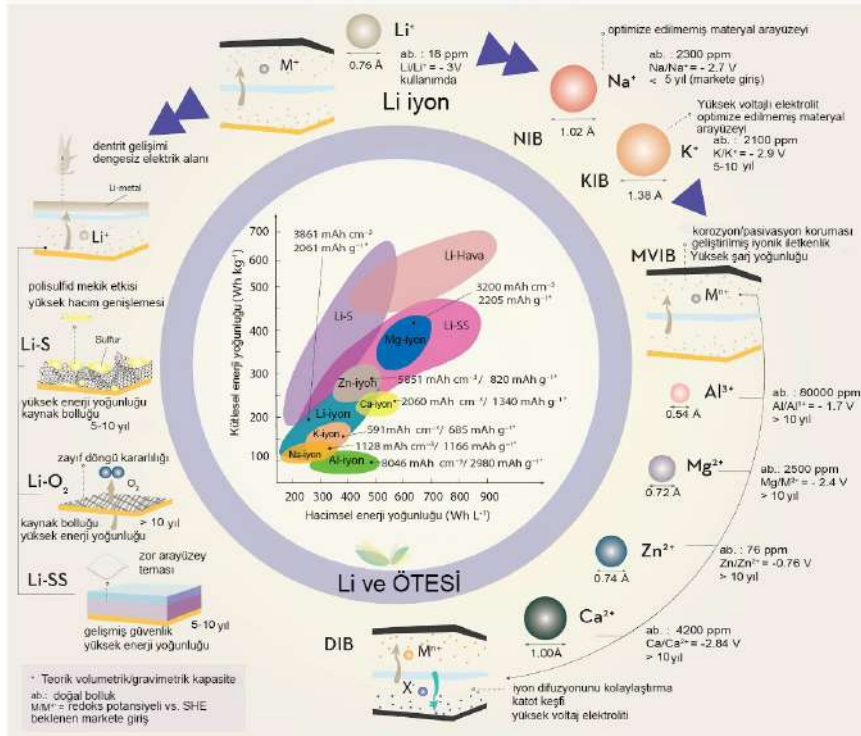
1. GİRİŞ

İklim değişikliğinin insan hayatı ve küresel ekonomi üzerindeki etkilerinin giderek artması düşük karbon ekonomisine geçilmesini bir ihtiyaç haline getirmiştir. Bu kapsamda karbondan arındırma hedefleri doğrultusunda elektrikli araçlara geçiş hızlanmıştır. Batarya türleri içerisinde lityum iyon piller kısa sürede ve esnek kurulum imkânı sunması, parçalı bir sistem oluşu, hızlı bir şekilde tepki verebilmesi ve enerji depolama maliyetinin kW-sa başına ideal olması gibi özellikleri ile diğer batarya çeşitlerinin önüne geçmektedir (Chen vd. 2020). Lityum iyon pil teknolojisi 20. yüzyılda akademik ve ticari anlamda birçok gelişmeyi tetiklemiş ve son teknoloji taşınabilir elektronik cihazların tüm dünyada yaygın bir şekilde kullanımına imkân sağlamıştır (Lee vd. 2020). Hatta 2019 yılında bu pil sistemini geliştiren, John Goodenough, Akira Yoshino, Stanley Whittingham Nobel Kimya Ödülü'ne layık görülmüşlerdir. Lityum iyon piller yüksek enerji yoğunluğu (~230 W-sa/kg), yüksek enerji verimliliği (%95'ten fazla) ve uzun çevrim ömrü (3.000 çevrim boyunca %80 derin deşarj yapabilmesi) ile ön plana çıkmaktadır (Chen vd. 2020). Elektrikli araçlar, drone gibi mobil sistemlerde güç kaynağı olarak kullanılmasının yanı sıra, büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinde de kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu yeni kullanım alanları ise daha yüksek kapasiteye sahip şarj edilebilir pillere duyulan ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır. Bu doğrultuda lityum iyon pillerde hem pil bileşenleri ile ilgili hem de batarya modülünün geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar devam etmektedir (Komaba 2020). Ancak lityum iyon pillerde kullanılan lityumun kaynaklarının bazı coğrafi bölgelerde ve sınırlı miktarda olması yaygınlaşan kullanım alanlarına paralel olarak fiyatının artmasına neden olmaktadır. Yapılan değerlendirmeler gelecekte, lityum kaynaklarının tüketim ihtiyaçlarına cevap veremeyeceği yönündedir (Yang vd. 2021). Ek olarak küresel ısınma ve iklim değişikliğinin önüne geçilmesi için "yeşil" olarak tabir edilen lityum iyon pil gibi teknolojilerin enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmasına olanak sağlaması bakımından da önemi büyüktür (Gao vd. 2022, Jens vd. 2019).

Bu nedenlerden farklı elektrokimyasal enerji depolama sistemlerine duyulan ihtiyaç artarak devam etmektedir. Lityum iyon pil teknolojisine alternatif olan pil sistemlerine bakıldığında;

- lityum sülfür (Li-S),
- lityum hava (Li-O₂),
- sodyum iyon (NIB),
- sodyum sülfür (Na-S),
- sodyum hava (Na-O₂),
- çinko iyon (ZIB),
- potasyum iyon (KIB)

gibi organik elektrolit veya sulu elektrolit içeren sistemler olduğu görülmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Lityum iyon pile alternatif pil sistemleri (Au vd. 2022 kaynağından uyarlanmıştır.)



Ayrıca lityumun veya sodyumun anot olarak kullanıldığı, tüm katı hal pil sistemlerinin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar da devam etmektedir. Ek olarak, kalsiyum, magnezyum ve alüminyum gibi birden fazla değerliği olan metallerin kullanıldığı pil sistemlerinin araştırma geliştirme faaliyetleri de sürdürülmektedir. Farklı pil sistemlerinin kıyaslaması Tablo 1'de özetlenmiştir.

Elektrikli araçlara ve diğer yoğun elektrikle çalışan ulaşım araçlarına olan talepte artış ve elektrikli araçların geliştirilmesine yönelik politikalar ve ülkelerin "karbon nötr" yönelik hedeflerinin pazarın büyümesini yönlendirmesi beklenmektedir. Pandemi döneminde yaşanan enerji krizinin ardından dünya genelinde büyük ülkelerin rüzgar santralleri ve güneş santralleri gibi yenilenebilir enerji sektörlerine artan yatırımları, enerji depolama cihazlarına olan talebi artırmıştır. Küresel ısınma nedeniyle sıcaklığın artması, gelişmiş ve gelişmekte olan büyük ülkelerin termik santralleri aşamalı olarak devre dışı bırakmasına ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmasına neden olmuştur. Bu doğrultuda araştırmalar, daha çok lityum iyon pil sistemine odaklanmış ve bu teknoloji belirli bir olgunluğa ulaşmıştır. Lityum iyon pille ilgili, yapılan araştırma- geliştirme çalışmaları devam etmesine rağmen, alternatif olabilecek diğer pil teknolojileri de artık bilimsel araştırma konusu haline gelmiştir. Lityum iyon pilin Ar-Ge atyapısı ile diğer pil sistemleri de çalışabilmektedir. Bunlardan pazara girmek üzere teknolojisi hazır sodyum iyon pil (NIB/SIB), 5-10 yıl içerisinde pazara girmesi beklenen katı hal lityum pil (Li-SS), lityum sülfür pil (Li-S) ve lityum hava/oksijen (Li-O₂) pili elektrikli araçlarda kullanılabilme potansiyeli olan alternatif pil sistemleridir.

Tablo 1. Farklı metal/metal iyon bataryaları ve özellikleri.

Element	Batarya	Redoks Potansiyeli SHE (V)	Mol Kütlesi (g·mol ⁻¹)	Bolluğu* (ppm)	İyonik Çap (Å)	Kapasite (mA·sa·cm ⁻³)/(mA·sa·g ⁻¹)
Li	Li-iyon	Li/Li ⁺ :-3,0401	6,941	20	0,76	3.861/2.061
Na	Na-iyon	Na/Na ⁺ :-2,71	22,990	23.600	1,02	1.128/1.166
K	K-iyon	K/K ⁺ :-2,931	39,098	20.900	1,38	591/685
Al	Al-iyon	Al/Al ³⁺ :-1,662	26,982	82.300	0,54	8.046/2.980
Mg	Mg-iyon	Mg/Mg ²⁺ :-2,372	24,305	23.300	0,72	3.200/2.205
Zn	Zn-iyon	Zn/Zn ²⁺ :-0,7618	65,38	70	0,74	5.851/820
Ca	Ca-iyon	Ca/Ca ²⁺ :-2,868	40,078	41.500	1,00	2.060/1.340

* Denizler hariç doğada elementlerin bolluğu (CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th edition).

2. LİTYUM HAVA (Li-O₂) PİLLER

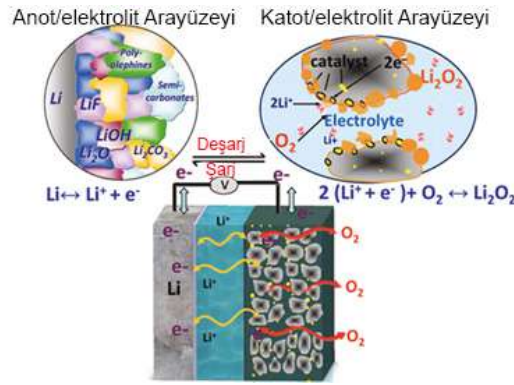
Lityum-hava piller, birçok uygulama için yeni nesil güç kaynakları olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte, bu teknolojinin ticarileştirilmesi, yüksek aşırı gerilim, zayıf enerji verimliliği ve sınırlı çevrim ömrü dahil olmak üzere çeşitli teknik sorunlar nedeniyle henüz gerçekleşmemiştir. Organik elektrolitli tersinir bir Li hava pili 1996 yılında Abraham ve Jiang tarafından tanıtılmıştır (Sun 2018, Abraham 1996). Li hava pillerin performansı, örneğin bağıl nem (Zhang vd. 2010) oksijen basıncı (Read vd. 2003), katalizörler (Débart vd. 2008), elektrolit bileşenleri (Akgül vd. 2019), katotların mikro/nano yapısı (Xiao vd. 2010) ve hücre tasarımı (Xiao vd. 2010) gibi çeşitli faktörlerden etkilenir.

Hücre voltaj düşüşü genellikle oksijen katodundan kaynaklandığından, Li hava pillerin performansını oksijen katodu belirler (Kraytsberg ve Ein-Eli 2011). Bu nedenle, Li hava pillerinde oksijen indirgenme reaksiyonu (ORR) ve oksijen çıkış reaksiyonu (OER) için etkin katalizörlerin tasarımı ve üretimi önemlidir. Etkin ORR/OER katalizörler Li hava pillerinde aşırı potansiyeli azaltılırken döngü yeteneklerini artırılacaktır (Zhang vd. 2019). Elektrot malzemelerinin düzgün bir şekilde dağıtılmasıyla birlikte yüksek aktif katalizörlerin ve optimum katalizör yüklemelerinin kullanılması katodun yapısını iyileştirecektir (Pan vd. 2019). Metaller ve/veya metal oksitler, şarj-deşarj işlemi sırasında elektrot aşırı gerilimini azaltmak ve pilin genel performansını iyileştirmek için katalizörler olarak Li hava pillerin katotlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Li hava piller için katotlarla ilgili daha önceki çalışmalarda kullanılan en başarılı katalizör olan mangan oksitler, pilin şarj/deşarj verimliliğini artırmakla kalmamış, aynı zamanda spesifikdeşarj kapasitesini de artırmıştır (Song vd. 2013, Thapa ve Ishihara 2011, Guo vd. 2012, Khan vd. 2018). Değerli metaller ve/veya bunların oksitleri, ister endüstriyel ister elektrokataliz süreçlerinde olsun, genellikle kimyasal reaksiyonlar için en iyi katalizörler olarak kabul edilir. Li hava pillerin katot tarafında katalizör olarak araştırılan başlıca değerli metaller Pt, Au, Pd, Ru ve Ir'dir. Ancak bu metaller yerine ucuz ve etkili katalizörlerin kullanılması hayati bir zorunluluk olmuştur (Song vd. 2013, Guo vd. 2012, Tan vd. 2017, Du vd. 2014, Han vd. 2014, Srivastava vd. 2015, Yanga vd. 2012, Cao vd. 2012, Wang vd. 2019).

2.1. Lityum Hava Pili Hücre Bileşenleri

Li-hava için anot; negatif elektrot olarak da adlandırılan hücrede deşarj sırasında oksidasyonun gerçekleştiği elektrottur. Li-O₂ pillerinde, yüksek enerji yoğunluğunu elde etmek için anot olarak Şekil 2'de verilen şematik Li-hava pilinde görüldüğü gibi metalik lityum kullanılır. Li, tüm metaller arasında en hafif metaldir (6,941 g·mol⁻¹), parlak gümüş renkli olup kolayca şekillendirilebilir. Lityum, standart hidrojene karşı 3,04 V olan yüksek negatif potansiyele sahip ve teorik enerji yoğunluğu yaklaşık 3.500 W·sa·kg⁻¹'dir. Anot güvenliği, alkali metallerin oksijen ve nem ile yüksek reaktivitesi ve yangınlığı nedeniyle dikkate alınması gereken kritik bir konudur. Saf lityum metali kullanımında temel sorun çevrim sırasında dentrit büyümesidir, dentrit büyümesi kritik bir güvenlik sorunu oluşturur.

Katot; deşarj sırasında hücrede oksijen indirgenme reaksiyonunun (ORR) gerçekleştiği pozitif elektrottur. Havadaki oksijen elektrotta aktif madde olarak kabul edilir. Ancak bununla birlikte, bir hava elektrodunun oksijenin sisteme girmesini sağlamak için gözenekli bir malzeme olması gerekir. Genel olarak, gözenekli yapı oksijen geçişinden, ürün oluşumu, ayrışması ve ürünün depolanmasından sorumludur. Uygun bir gözenekli yapı seçmek için şu parametreler dikkate alınmalıdır; gözenek boyutu dağılımı, gözenek hacmi ve kalınlığı. Bir diğer yandan, kimyasal kararlılık, iletkenlik, yüzey/hacim oranı ve fiyat önemli parametrelerdir ve pil hücresinin performansı etkiler. Lityum hava pillerde deşarj sırasında ORR, şarj sırasında OER için elektrokatalizörler gereklidir.



Şekil 2. Lityum hava pili hücre (Girishkumar vd. 2010 kaynağından uyarlanmıştır. Telif hakkı 2010 American Chemical Society'ye aittir.)

İdeal bir seperatörde katot elektrot ve elektrolit ile temasının önlenmesinin yanı sıra, gaz geçişinin önlenmesi, elektrolit için yüksek depolama, uygun mekanik özellikler sağlanmalıdır (Wang ve Zhou, 2010). Lityum hava pillerde inorganik seramik, polimer-seramik (PC) ve polimer seperatörler olmak üzere üç tip seperatör kullanılır (Kumar vd. 2010, Wang vd. 2010). İnorganik seramik seperatörler, son zamanlarda geliştirilmiş LISICON ve LIPON gibi hızlı iyonik geçirgenlik sağlayan seramiklerdir. Bu seperatör hücreye gaz erişimini önlenmesi ve yüksek iyonik iletkenlik gibi özellikler gösterir. Bununla birlikte, pratik Li-hava hücre için bu seperatörlerin dezavantajları, kırılğan davranışı ve yüksek maliyetli olması gibi sorunlar mevcuttur. Bu nedenle, mekanik mukavemeti artırmak ve maliyeti aynı anda azaltmak için PC seperatör öne çıkmaktadır. Genel olarak, gözenekli poliolefin seperatörler ve cam elyaf gibi geleneksel Li iyon pillerde kullanılan polimer seperatörler, yüksek iyonik iletkenlikleri, düşük dirençleri ve düşük maliyetleri gibi özellikleri nedeniyle Li hava pillerinde kullanılmaktadır (Devanathan, 2008).

Elektrolit; katot ve anot arasındaki iyon taşıma mekanizmasını sağlar ve ana rolü, sistemin deşarj ürününü oluşturmasını ve ayrıştırmasını sağlamaktır. Bu durum oksijen indirgenme (ORR) ve oksijen çıkış reaksiyonlarını (OER) kolaylaştırır. Ayrıca, uzun bir süre boyunca elektrolitin kararlılığı bir pilin çevrim ömrü için çok önemlidir. Li-O₂ pil sistemlerinin farklı yapılar da kullanılan çok çeşitli elektrolit grubu vardır. Bunlar arasında genellikle tercih edilentler karbonat temelli, eter temelli ve dimetil sülfoksit (DMSO) temelli elektrolitlerdir (Hwang vd. 2015).

2.2. Lityum Hava Pili Gelişmeye Açık Alanlar

Li-hava pil sistemleri, büyük ölçekli enerji gerektiren sistemler için umut verici olmalarına rağmen hala geliştirilme aşamasındadır. Bu sistemlerin şarj ve deşarj sırasındaki karmaşık elektrokimyasal reaksiyonları anlamak ve teknik zorlukların üstesinden gelmek için anot ve katot elektrot tasarımı oldukça önemlidir. Li-hava piller ticari kullanım için hazır olmadan önce, özellikle katot ile ilgili olanlar olmak üzere, uygun çevrim ve şarj edilebilirliği sağlamak için birçok sorunun çözülmesi gerekir. Li-hava pillerde meydana gelen ve aşılması gereken sorunlar Tablo 2'de verilmiştir. Bu pil kimyasında aşılması gereken her bir sorun bu sistemlerin Ar-Ge çalışmalarına açık alanlarını oluşturmaktadır. Bu sorunların çözülmesi Li-hava pillerinin ticarileşme sürecinin hızlanmasında etkili olacaktır.

Tablo 2. Lityum hava pili önemli özellikleri ve aşılması gereken sorunlar

Öne Çıkan Özellikler	Aşılması Gereken Sorunlar
<ul style="list-style-type: none"> Hafif lityum metalinin kullanılması tasarım için önemli Yüksek teorik güç yoğunluğu Düşük pil boyutları 	<ul style="list-style-type: none"> Saf lityum kullanımı yüzünden kısa devre ve güvenlik problemi Lityum aktif bir metal olduğundan su buharı ve oksijenden etkilenmesi Li_xO_x ürünleri tarafından gözenekli karbon katodun tıkanması Deşarj aşırı gerilimine kıyasla daha yüksek şarj aşırı gerilimi, düşük çevrim verimliliğine yol açması Çevrim verimliliğini artırmak için uygun katalizör geliştirilmesi Lityum oksitler tarafından gözenekli katottaki boşlukların tıkanması nedeniyle deşarj çevriminin sınırlanması Deşarj sırasında karbonat ve eter bazlı elektrolitlerin bozunması Oksijen seçici bir seperatör kullanılarak katodun nem ve CO_2'den korunması Pillin şarj edilebilirlik ve uzun ömürlü çevrim döngüsünde iyileşme

2.3. Mevcut Teknolojinin Hazırlık Seviyesi ve Pazara Girme Potansiyeli

Li-hava pillerinin kendiliğinden deşarj oranı yüksek ve döngü ömrü ise düşüktür. Bu da lityum hava pil pazarı için büyük engel olarak görülmektedir. Lityum hava pillerinde henüz ticarileşmeye uygun doğrulanmış prototip yapılamadığı için mevcut teknoloji hazırlık seviyesi (THS) 3-5 aralığındadır (Şekil 3).

Elektrikli araçlara ve diğer yoğun elektrikle çalışan ulaşım araçlarına olan talepte artış ve elektrikli araçların geliştirilmesine yönelik hükümet politikaları ve ülkelerin "karbon nötr" yönelik hedeflerinin pazarın büyümesini yönlendirmesi beklenmektedir. Pandemi döneminde yaşanan enerji krizinin ardından dünya genelinde büyük ülkelerin rüzgâr santralleri ve güneş santralleri gibi yenilenebilir enerji sektörlerine artan yatırımları, enerji depolama cihazlarına olan talebi artırmıştır. Küresel ısınma nedeniyle sıcaklığın artması, gelişmiş ve gelişmekte olan büyük ülkelerin termik santralleri aşamalı olarak devre dışı bırakmasına ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmasına neden olmuştur. Çin'de yenilenebilir enerji üretimindeki ani artış, enerji iletim ve dağıtım sistemine büyük yük bindirmiş ve bu da fazla gücü depolamak için pil teknolojilerinin öne çıkmasına yol açmıştır. Yukarıda belirtilen uygulama ve talep, lityum hava pil pazarının büyümesini destekleyen ana faktörlerdir. Uygulama bazında, otomotiv sektörü 2020 yılında Global Lityum Hava Pil pazarında çoğunluk pazar payını elde etmiştir. Elektrikli araçlar (EA) arasında karbon emisyonunu azaltmak için Li-hava pillere olan talebin yüksek olduğu görülmüştür. Latin Amerika batarya pazarı, EA'lara yapılan artan yatırımlar ve emisyon kontrolüne yönelik hükümet normları ve politikaları tarafından yönlendirilmektedir. Lityum hava pilinin, Latin Amerika'nın çeşitli bölgelerinde tıbbi uygulamalarda, otomotivde ve diğer alanlarda potansiyel bir büyümeye sahip olduğu görülebilir. Orta Doğu ve Afrika'da, yenilenebilir enerji için büyüyen altyapı ve elektrikli araçlara yönelik artan talep, lityum hava pil pazarını yönlendirdiği görülmektedir (Fortune Business Insights, Energy&Power/Lithium-Air Battery Market Report). Çeşitli sübvansiyonlar getirerek EA'ların satışlarını ilerletmek için artan hükümet girişimi, Hindistan gibi gelişmekte olan ülkelerde EA'ların üretimine yönelik yatırımların artırılması ve ulaşımın gelişen elektrifikasyonu, küresel olarak lityum-hava batarya pazarının büyümesine güçlü bir şekilde katkıda bulunan faktörlerdir. Küresel lityum-hava batarya pazarında önemli bir pazar payına sahip kilit oyuncular arasında Tesla Inc., Mullen Technologies, Poly Plus Battery Company (PPBC) ve Lithium Air Industries yer almaktadır (Fan ve Huang 2022).


Şekil 3. Lityum hava pili mevcut teknolojik hazırlık seviyesi ve ticari uygulamalar.

3. LİTYUM SÜLFÜR (Li-S) PİLLER

1962'de Herbert ve Ulam, katot olarak ilk kez elementel kükürdü önermiştir (Rauh vd. 1979). Elementel kükürt, doğadaki bolluğu, düşük maliyeti ve daha düşük çevresel etkileri nedeniyle yüksek enerji yoğunluğuna sahip şarj edilebilir piller için umut verici bir katot malzemesi olarak görülmektedir (Fan ve Huang 2022). Lityum-sülfür (Li-S) piller; yüksek kapasite ($1.675 \text{ mA}\cdot\text{sa}\cdot\text{g}^{-1}$) ve yüksek enerji yoğunluğu ($2.600 \text{ W}\cdot\text{sa}\cdot\text{kg}^{-1}$) nedeniyle öne çıkmaktadır. Ayrıca Li-S piller, hafif, güvenli, uzun ömürlü şarj edilebilir özellikleri ile düşük karbon emisyonu istenen bu dönemde enerji depolama ve taşımada lityum iyon pillerin yerini alabilir (Fotouhi vd. 2017).

Kükürt, Li-S pillerin ana katot malzemesidir ve yüksek termodinamik kararlılığa sahip sekiz kükürt atomunu içeren taç benzeri bir yapıya sahiptir (Walle vd. 2022). Optimum çalışma sıcaklığı aralığı çok daha küçük olsa bile, uygulamalarda kullanıldıklarında $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında çalışabilecekleri varsayılmaktadır (Fotouhi vd. 2017).

Deşarj işlemi sırasında, Li anotta Li iyonlarına yükseltgenir ve katoda doğru hareket eder. Katotta Li iyonları kükürt ile reaksiyona girerek polisülfid oluşturur ve enerji açığa çıkar.

Li-S pillerin önemli avantajlarına rağmen katot için pratik uygulamalarını ciddi şekilde engelleyen bazı dezavantajları vardır. Bunlar aşağıda verilmiştir:

Mekik etkisi; elementel kükürt, lityum ile reaksiyona girer ve deşarj işlemi sırasında uzun zincirli lityum polisülfidler (LiPS) oluşturur (Şekil 4). LiPS'ler organik elektrolit içinde çözülür ve anoda göç eder, lityum anot ile reaksiyona girerek daha düşük dereceli polisülfidler oluşturur. Bu, Li anodunun bozunması "mekik etkisi" olarak adlandırılır (Ren vd. 2019, Pang vd. 2016). Daha spesifik olarak, çözünür polisülfidin Li anot ile sürekli reaksiyonu, önemli ölçüde kendi kendine deşarja ve çözünmeyen katı Li_2S_2 ve Li_2S 'nin anot üzerinde birikmesine yol açar, bu da aktif kütle kaybı ve kapasitenin azalmasıyla sonuçlanır (Busche vd. 2014, Fang vd. 2017). Anot yüzeyi bu yalıtkan maddelerle tamamen kaplandığında, deşarj işlemi durur ve bu da şarj edilebilir Li-S pilin veriminin düşmesine ve kısa çevrim ömrüne neden olur. Mekik etkisinden kurtulmak için karbon malzemeler kullanılarak çalışmalar yapılmıştır (Jayaprakash vd. 2011, Guo vd. 2011, Liang vd. 2009, Lu vd. 2020).

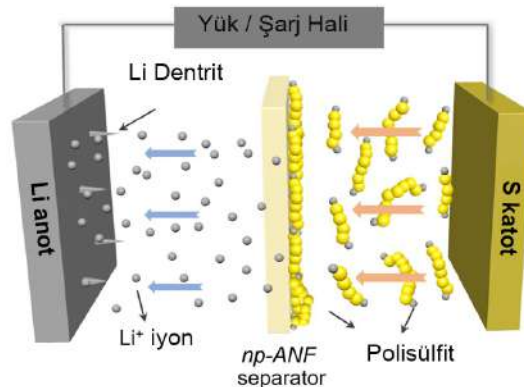
Hacim genişlemesi; şarj/deşarj sırasında önemli hacim değişikliği ($\sim \% 80$) (Seh vd. 2013) ve morfoloji değişikliği meydana gelir, bu da tozlaşmaya ve elektrotların hızlı yaşlanmasına neden olarak kapasitede hızlı bir azalmaya yol açar (Pope ve Aksay 2015).

Zayıf elektrik iletkenlik; kükürt (oda sıcaklığında 1×10^{-7} ila $1 \times 10^{-30} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$) ve Li_2S 'in yalıtkan doğası, zayıf elektrokimyasal reaksiyonlara neden olan ve katotta aktif malzemelerin düşük kullanımına yol açan başka bir zorluktur (Liu vd 2018, Moon vd. 2013, Fang vd. 2016). Bu nedenle, kükürt katodu yapılırken çok sayıda iletken maddeye ihtiyaç vardır.

Güvenlik sorunları; lityum metal anodun kendisi, kullanılan elektrolite göre büyük ölçüde yarı kararlıdır. Şarj/deşarj işlemi sırasında yüzeydeki akım yoğunluğunun homojen olmayan dağılımı nedeniyle oluşan lityum dendritler seperatöre nüfuz edebilir ve kısa devre nedeniyle güvenlik sorunlarına neden olabilir (Liu vd. 2016, Ma vd. 2015, Borchardt vd. 2016).

3.1. Lityum Sülfür Pili Hücre Bileşenleri

Li-S pil, organik bir elektrolit içine daldırılmış metalik lityum anot, kükürt katot ve seperatörden oluşur (Şekil 4).



Şekil 4. Lityum sülfür pil (Wang vd. 2022 kaynağından uyarlanmıştır.)

Li-S pillerin başarılı çalışması, karbonlu ve polimerik malzemelerle kükürt katot geliştirilmesiyle sağlanmıştır. Bu kompozitlerde, kükürt partikülleri, kompozitin elektrik iletkenliğini artıran ve polisüflitlerin elektrolit içinde çözünmesini engelleyen iletken karbon veya polimer matrislerine gömülür (Zhao vd. 2012).

Elektrolit; sıvı elektrolitler, düşük yüzey gerilimleri ve düşük viskoziteleri nedeniyle yalnızca Li-S pillerde değil, aynı zamanda diğer elektrokimyasal hücrelerin çoğunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Li-S pillerde eter bazlı elektrolitler, lityum tuzları, iyonik sıvı ve katı polimer elektrolitler kullanılmaktadır. Li-S pillerin kapasitesini ve çevrim sayısını iyileştirmeye yönelik çalışmalarda elektrolit optimizasyonu sıvı elektrolitte çözünme sonucu oluşan kükürt kaybını azaltmaya yöneliktir.

Seperatör, Li-S'lerin mekik etkisini baskılayabilen, lityum polisüflürlerin (LiPS) dönüşümünü arttırabilen ve dendrit oluşumunu önleyebilen çok işlevli seperatörler lityum sülfür piller için çok önemlidir (Demir-Cakan 2017). Bu pillerde, poliolefin bazlı modifiye seperatörler (He vd. 2019), PP üzerinde polipirol (ppy) modifiye lityum-montmorillonit kompozit (Yang vd. 2021), Ni-MOF-74/grafenoksit kompozit (Sun vd. 2020), FeOOH mikroküreler ve karbon nanotüplerden oluşan seperatör (Chen vd. 2020) ve poliviniliden-florür (PVDF) bazlı kompozitler (Xiang vd. 2016) seperatör olarak kullanılmaktadır. Li-S pillerdeki mekik etkisinin, seperatörün polisüflit türleri fiziksel olarak yakalanması veya kimyasal etkileşimleri yoluyla etkili bir şekilde engellenebileceği kanıtlanmıştır. Hem polisüflitleri fiziksel olarak tutabilen hem de kimyasal etkileşimler yoluyla polisüflitleri uzaklaştırabilen seperatörün geliştirilmesinin mekik etkisini daha etkin bir şekilde önlemesi beklenmektedir (Xiang vd. 2016).

3.2. Lityum Sülfür Pili Gelişmeye Açık Alanlar

Yüksek enerji yoğunluklu piller geliştirmek için devlet kurumlarının ve özel işletmelerin yatırımlarının artması, çevresel faktörler nedeniyle elektrikli araçlara olan ihtiyacının artması Li-S pazarının gelişimi için geniş fırsatlar sağlamaktadır. Ancak Li-S pillerin önemli avantajlarına rağmen katot için pratik uygulamalarını ciddi şekilde engelleyen dezavantajları vardır. Li-S pillerde aşılması gereken sorunlar Tablo 3'de verilmiştir. Bu pillerde aşılması gereken sorunlar aynı zamanda gelişmeye açık alanları ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Lityum sülfür pili önemli özellikleri ve aşılması gereken sorunlar.

Öne Çıkan Özellikler	Aşılması Gereken Sorunlar
<ul style="list-style-type: none">• Yüksek güç yoğunluğu• Elementel kükürtün doğada bol bulunması• Düşük maliyet	<ul style="list-style-type: none">• Kükürtün elektrik iletkenliğinin düşük olması• Mekik etkisi• Kükürtün reaksiyon kinetiğinin düşük olması• Kısa çevrim sayısı• Anot yüzeyinde yalıtkan sülfür bileşiklerinin oluşumu• Çözünür polisüflidin Li anot ile sürekli reaksiyonu• Katodun çözünmesi ile aktif kütle ve kapasite kaybı

3.3. Lityum Sülfür Pili Mevcut THS ve Pazara Girme Potansiyeli

Lityum ve kükürdün kimyasal birleşimi ile oluşturulan Li-S bataryalar dünyada ilk defa Sion Power şirketi tarafından üretilmiştir. Şirket, dünyadaki en yüksek enerji yoğunluğu ve özgül enerjili Li-S hücresini üretmiştir. Sion Power'ın Li-S hücreleri, kesintisiz uçuş için dünya rekoru kıran Zephyr 7 Yüksek İrtifa Platform İstasyonu (HAPS) uçuşu için Airbus Defence ve Space şirketi tarafından 2014 yılında kullanılmıştır (Ankara Lityum Sülfür Batarya Üretimi Fizibilite Raporu-2021). Ancak Li-S bataryaların özelliklerinin iyileştirilmesi için geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Teknoloji geliştirme ve doğrulanmış prototip aşamasında olması nedeniyle Li-S piller THS 3-5 seviyesindedir (Şekil 5). Lityum iyon pile kıyasla yüksek lityum sülfür maliyeti ve pil sisteminin üretim için karmaşık mekanizması, lityum kükürt pil pazarının büyümesini kısıtlayan faktörlerdir. Dendritleri ve mikro kısa devreleri önlemek için grafit bazlı kompozitlere duyulan ihtiyaç ve üreticilerin lityum iyon pilleri geliştirmek için hızlı yenilikler pazarın gelişimini engelleyen diğer faktörlerdir (Allied Market Research, Lithium Sulfur Battery Market Report).

Geleneksel Li-S hücreleri, nispeten yüksek gravimetrik enerji ($W\text{-sa}\cdot\text{kg}^{-1}$) sunar, ancak hacimsel enerji yoğunluğunda ($W\text{-sa}\cdot\text{L}^{-1}$) ve çevrim ömrü gibi diğer temel özelliklerde yetersizdir. Sion Power, geniş bir pazara hitap etmek için bu parametreler arasında daha iyi bir dengenin gerekli olduğunu kabul etmiştir. Çözüm, tescilli bir lityum metal anot teknolojisini geleneksel lityum iyon katotlarla eşleştirmektir.

Lityum sülfür pil pazarında yer alan başlıca şirketler arasında Advanced Energy Materials, Ilika PLC, Johnson Matthey, LG Chem, Morrow Piller, NOHMs Technologies, OXIS Energy, PolyPlus, Sion Power ve Williams Advanced yer almaktadır.



Şekil 5. Lityum sülfür pili mevcut teknolojik hazırlık seviyesi ve ticari uygulamalar.

4. KATI HAL LİTYUM (Li-SS) PİLLER

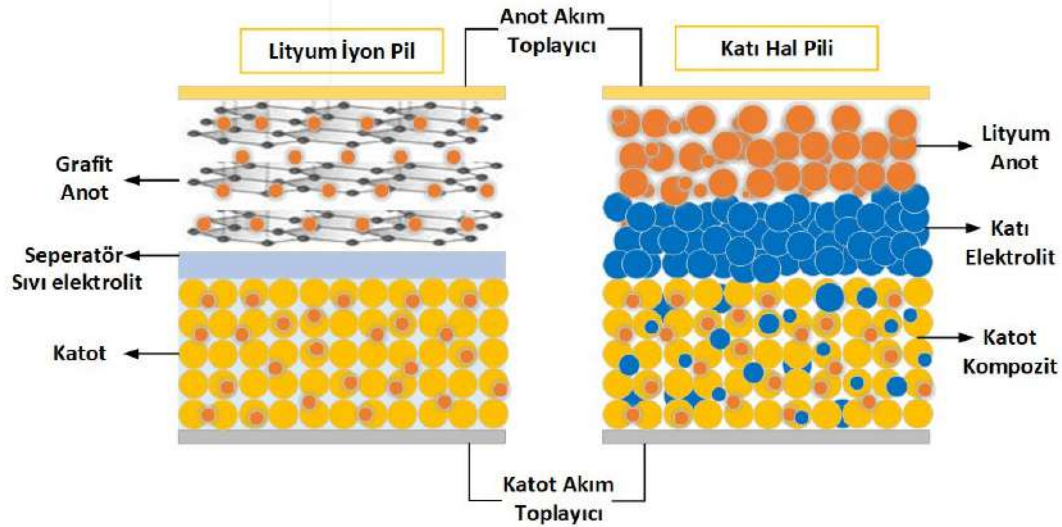
Katı hal lityum-iyon (Li-SS) pil, geleneksel lityum iyon pillerin güvenlik sorununa bir çözüm olarak önerilmiştir. Katı hal pillerinde, sıvı elektrolit malzemeler yerine iletken katı elektrolit malzemeler kullanılmaktadır. Burada en önemli yarar, katı elektrolitlerin fiziksel şok, suyla temas ve kısa devre gibi zorlu koşullarda güvenli olmalarıdır. Güvenlik problemini çözerek, paketlenme için üretim işlemlerini kolaylaştırırken tasarım çeşitliliği de artırılabilir. Bu nedenle, düşük üretim maliyetinin yanı sıra daha yüksek enerji yoğunluğu elde edilebilir. Bu özellik sayesinde, katı hal lityum iyon piller, gelecek nesillerin pil sistemi için en umut verici pil tipi olarak kabul edilmektedir. Günümüzde, Li-SS teknolojisinde var olan teknik zorlukları çözmek için birçok araştırma grubu çalışmaktadır. Li-SS için zorlukların çoğu elektrot-elektrolit ara yüzeyinde ortaya çıkmaktadır (Barut, 2019). Katı elektrolitte, elektrot elektrolit teması elektrotlar arasındaki nokta-temas halindeyken, sıvı elektrolit içinde ise yüzey teması halindedir. Bu nedenle, katı elektrolitte lityum iyonların aktarıldığı kanallar sınırlıdır. Elektrotlar ve katı elektrolit arasında iyon transferlerini ve akımı engelleyen büyük ara yüzey direnci üretilir (Gellert vd., 2015). Halen, sıvı elektrolitler, lityum iyon pillerde kullanım için baskın elektrolittir, çünkü yüksek iyonik iletkenlik, yüksek kapasiteli elektrotlarla kusursuz temas alanı ve şarj/deşarj döngüleri sırasında elektrotların boyut değişikliklerinin uyumu gibi birtakım avantajlar sağlar. Bununla birlikte, sıvı elektrolitler son derece yanıcı ve tehlikelidir. Sıvı lityum-iyon pillerin termal kaçağı patlamaya neden olabilir. Bu nedenle sıvı elektrolit içeren pillerin, sıvıyı güvenli bir şekilde kapatmak ve güvenlik sorunlarını önlemek için ekstra güvenlik katmanları ve cihazları içermesi gerekir. Bu ekstra güvenlik katmanları ve cihazları, pillerin toplam enerji yoğunluğuna ilave ağırlık olarak yüklenir. Ayrıca, sıvı elektrolit piller özellikle yüksek sıcaklık ortamlarında çözücü sızıntısı ve kendiliğinden hızlıdeşarj gösterir. Günümüzün mevcut pilleri, performansları benzersiz olduğundan, güvenlik sakıncalarına rağmen bu tehlikeli sıvı elektrolitleri içerir. Pillerin daha yüksek güvenlik derecesine sahip olması için, sıvı elektrolitlerin yanıcı olmayan katı elektrolitlerle değiştirilmesi ilgi odağı olmuştur (Trevey, 2011). Son araştırmalar, lityum iyon piller için katı elektrolitlerin, yanıcı sıvı elektrolitlerin yerini almasının daha uygun olduğunu göstermektedir. Katı elektrolitler, mükemmel kimyasal ve fiziksel dengesinin yanı sıra mükemmel raf ömrü gibi sıvı elektrolitlere göre birtakım avantajlara sahiptir. Ek olarak, katı elektrolit kullanan piller, ilave pil katmanlarının ve cihazların kullanılmasını gerektirmez, bu da pillerin toplam enerji yoğunluğunun üretimden sonra yüksek kalmasını sağlar. Ayrıca, yalnızca lityum iyonları katı elektrolitlerde hareketlidir, bu durum istenmeyen yan reaksiyonların sayısını ve performans kaybını veya güvenlik sorunlarına neden olabilecek elektrolitlerin ayrışmasını azaltır (Trevey, 2011).

Katı hal lityum iyon pilleri kullanmanın önündeki en büyük engel, pil kapasitesini ve çevrim ömrünü güçlü bir şekilde etkileyen büyük hücre direncidir. Direnç; elektrot/ katı elektrolit ara yüzeyi ve elektrotlarda meydana gelmektedir. Katı hal lityum piller Duracell tarafından 1970'lerde geliştirildi ve 1980'lerde piyasaya sunuldu fakat artık üretilmemektedir. Hücrelerde, lityum metal anot, lityum iyodür ve Al_2O_3 'ün dağılmış bir faz elektroliti ve katot olarak bir metal tuzu kullanmıştır. $Li/Li(Al_2O_3)/metal$ tuzu yapısı gerçek bir katı hal pilidir. Bu üretilen piller şarj edilemeyen katı elektrolit pillerdir.

Li-SS piller, daha küçük boyutta daha fazla enerji yoğunluğu, daha uzun ömür ve daha fazla güvenlik sunması ile halihazırda satılan mevcut pillere göre daha avantajlı görülmektedir. Katı hal piller, uçucu ve dolayısıyla daha yanıcı olduğu için güvenlik açısından en zorlu bileşenlerden biri olan sıvı elektrolit içermez. Ayrıca özellikle yakın zamanda yapılan ar-ge çalışmaları dikkate alındığında, mekanik olarak yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı (çeşitli katkı maddelerine sahip seramik bir bileşime sahip) bir malzemedan oluşan daha kalın bir seperatör geliştirilmiştir. Bu durum, anot ve katot arasındaki ayrımı daha güvenilir hale getirir, yanlış kullanım veya bozulma durumunda bile kısa devreleri önleyerek hücrelerin içsel güvenliğini artırır.

4.1. Katı Hal Lityum Pili Hücre Bileşenler

Geleneksel lityum pillerde elektrolit sıvı iken, Li-SS pillerde elektrolit katı haldedir. Li-SS hücre, lityum iyon pil ile aynı katottan (veya pozitif elektrot) (örn. LFP, NMC, LMO, vb.) ve elektrolit olarak, genellikle seramik bazlı veya katı polimer, anot lityum metalinden oluşur (Şekil 6). Pil sisteminde katı seperatör, iyonların içinde hareket ettiği ortam haline gelerek anot ile katot arasında mekanik bir ayırıcı görevi görür. Ayrıca yalıtkan özelliğe sahiptir. Arada böyle bir katmanın olması, dirençli desteğin olması anot kısmındaki grafit yapının çıkarılmasını ve lityum metalin doğrudan anot üzerinde birikmesini sağlar. Pil hücresinin şarj aşamasında: lityum parçacıkları katottan katı elektroliti oluşturan atomların yapısı boyunca hareket eder ve anot yüzeyinde katı bir saf lityum tabakası oluşturur. Bu şekilde sadece lityum tabakasından oluşan anot, grafit yapıyı içeren lityum teknoloji bir anoda göre daha küçük bir hacme sahip olacaktır. Li-SS pilindeki katot, şarj işlemi sırasında pile gerekli iyonları sağladığı ve deşarj işlemi sırasında bunun tersi olduğu için önemlidir. Bu işlem sırasında katot yapısal olarak kararlı olmalıdır. Li-SS piller için yaygın olarak kullanılan katot malzemeleri genellikle lityum metal oksitlerdir. LiCoO_2 , LiFePO_4 , lityum kobalt oksit (LCO), lityum mangan oksit (LiMn_2O_4) yaygın olarak kullanılan katot malzemelerdir (Kim vd. 2015). Li-SS pilde anot olarak saf lityum metal kullanılmaktadır. Ancak saf lityum metal anotların dezavantajları vardır. Lityum anotlarla ilgili önemli bir problem, lityum metalinin çok yüksek hassasiyeti nedeniyle yüksek sıcaklıklarda kullanılamamasıdır. Bir başka dezavantajı, dendrit oluşumunun, hücre boyunca homojen olmayan akım yoğunluğuna sebep olması, bunun da hücre yüzeyi boyunca sıcaklık değişimlerine yol açmasıdır. Bu, sıcaklık değişimleri tehlikeli hale geldiğinden, özellikle minyatür cihazlarda hücrenin entegre edilmesini zorlaştırır. Ayrıca, bu dendrit oluşumu, hücre döngüsü süreci için gerekli olan lityum miktarını sürekli olarak tüketir ve hatta hücrenin kısa devre yapmasına neden olabilmektedir (Kim vd. 2015).



Şekil 6. Katı hal lityum pil hücresi.

4.2. Katı Hal Lityum Pili Gelişmeye Açık Alanlar

Li-SS piller, daha küçük boyutta daha fazla enerji yoğunluğu, daha uzun ömür ve daha fazla güvenlik sunması ile halihazırda satılan mevcut pillere göre daha avantajlı görülmektedir. Katı hal piller, uçucu ve dolayısıyla daha yanıcı olduğu için güvenlik açısından en zorlu bileşenlerden biri olan sıvı elektrolit içermez. Ayrıca özellikle yakın zamanda yapılan Ar-Ge çalışmaları dikkate alındığında, mekanik olarak yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı (çeşitli katkı maddelerine sahip seramik bir bileşime sahip olduğu için) bir malzemedan oluşan daha kalın bir seperatör geliştirilmiştir. Bu durum, anot ve katot arasındaki ayrımı daha güvenilir hale getirir, yanlış kullanım veya bozulma durumunda bile kısa devreleri önleyerek hücrelerin içsel güvenliğini artırır.



Katı hal lityum iyon pilleri kullanmanın önündeki en büyük engel, pil kapasitesini ve çevrim ömrünü güçlü bir şekilde etkileyen büyük hücre direncidir. Direnç; elektrot/ katı elektrolit ara yüzeyi ve elektrotlarda meydana gelmektedir. Bu sistemlerde aşılması gereken en önemli sorunların başında katı elektrolitten kaynaklı yüksek dirençtir (Tablo 4). Katı elektrolitler ve elektrot Ar-Ge çalışmaları bu pillerin pazara girmesini hızlandıracaktır.

4.3. Katı Hal Pili Mevcut Teknolojik Hazırlık Seviyesi ve Pazara Girme Potansiyeli

Katı hal lityum piller için en büyük gelişme beklentilerinden biri, bu pillerin elektrikli otomobillerde kullanılmasıdır. Amerika Birleşik Devletleri, Birleşik Krallık, Çin, Almanya ve Japonya gibi ülkelerde lehte mevzuatın uygulamaya konması nedeniyle, dünya çapında elektrikli arabalara olan talep giderek artmaktadır. Ayrıca, Amerika Birleşik Devletleri, Birleşik Krallık ve Almanya gibi ülkelerde elektrikli otomobillerin tercih edilmesi, ülkelerin ithal petrole olan bağımlılıklarını azaltmalarına ve ulaşım sektöründeki sera gazı emisyonlarını düşürmelerine yardımcı olmaktadır. Her yıl, hafif elektrikli araçların dünya çapındaki satışları önemli ölçüde artmaktadır. Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Birleşik Krallık, Almanya, Fransa ve Japonya, elektrikli otomobil satışlarını artıran önemli ülkelere sadece birkaçını oluşturmaktadır. Bu durum katı hal pillerine olan ilgiyi artırmaktadır. Elektrikli otomobillerin artan popüleritesi, katı hal pillerinin gelişimini teşvik etmektedir. Teknoloji geliştirme ve prototip aşamasında olduğu düşünüldüğünde katı-hal piller THS 3-8 seviyesindedir (Şekil 7).

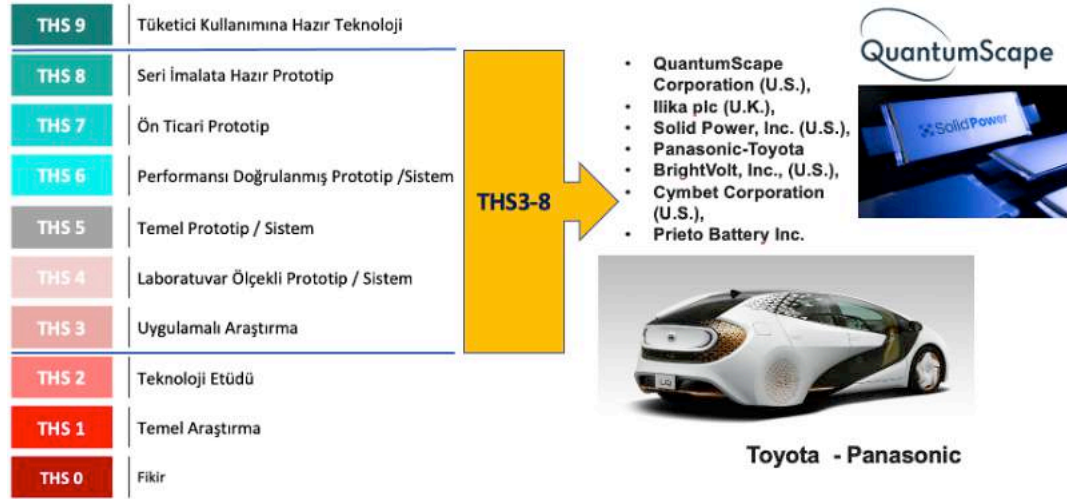
Tablo 4. Katı Hal Lityum pili önemli özellikleri ve aşılması gereken sorunlar

Öne Çıkan Özellikler	Aşılması Gereken Sorunlar
<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek teorik kapasite • Güvenlik • Sıvı elektrolit kullanılmaması 	<ul style="list-style-type: none"> • Pil kapasitesini ve çevrim ömrünü etkileyen hücre direnci • Dentrit oluşumu • Katı elektrolitlerde iyonik iletkenliğin düşük olması • Katı elektrolitin Li anot varlığında bozunması riski • İnce katı elektrolit elde edilmesi zorluğu • Düşük sıcaklıklarda hızlı performans düşüşü

2030 yılında, katı hal pil pazarının, 2021'deki 290 milyon dolardan, önümüzdeki yıllarda %33,5'lik devasa bir CAGR'de (yıllık birleşik büyüme oranı) 3,915 milyon \$'a ulaşacağı ön görülmektedir. Burada elektrikli araçların artan eğilimi, pil yönetimi ve enerji depolama sistemlerinin artan etkinliği, sektörü zorlayan ana faktörlerdir. Ayrıca, bu pazar dünya çapında artan robot seviyatı hacminden etkilenecektir. Ek olarak, katı hal pillerle ilgili artan Ar-Ge çalışmaları, IoT'nin (iletişim ağı) artan eğilimi ve elektronik cihazların daralması en önde gelen itici güçler olarak ortaya çıkmıştır. 2021 yılında APAC firması, katı hal pil pazarında yaklaşık %50 ile en büyük paya sahip olup bu durumun yakın gelecekte de devam edeceği öngörülmektedir. Yenilenebilir enerji sektöründeki ilerlemeler, teknolojik gelişmeler için geniş bir müşteri tabanı ve pil yönetim sistemlerinin kullanımındaki ilerleme, bu pillerin satışını tetikleyen unsurlardır.

Katı hal pilleri, lityum iyon pillerle karşılaştırıldığında eşit veya daha iyi performans sunabilmektedir. Quantum Scape, Solid Power ve Samsung SDI bu teknoloji hakkında çalışmalarını yürütürken Sakuu, 3 A-sa kapasiteye sahip kendi katı hal pilini üretmiştir (Int. Kyn. 1).

Gogoro firması, dünyanın ilk değiştirilebilir katı hal EA pil prototipini 2022 yılında tanıtmıştır. Pil, Lityum Seramik Piller (LCB'ler) konusunda uzmanlığa sahip katı hal pil endüstrisi lideri ProLogium Technology ile birlikte geliştirilmiştir. Şirket, e-mobilet (scooter) ve motosikletler gibi hafif elektrikli araçları anında şarj etmek için pil değiştirme istasyonunda saniyeler içinde değiştirilebilen beslenme çantası boyutunda 1 milyondan fazla pil üretmiştir. Gogoro kendi elektrikli scooterlarını üretmekte, ancak Yamaha gibi büyük şirketlerle pillerini kendi elektrikli scooterlarına koymak için ortaklık kurmaktadır. Gogoro'nun elektrikli motosikletler için sunduğu prototip katı hal pili, firmanın kullandığı mevcut lityum-iyon pillerin boyutu değiştirmeden kapasiteyi 1,7 kW-sa seviyesinden 2,5 kW-sa seviyesine çıkarmaktadır.

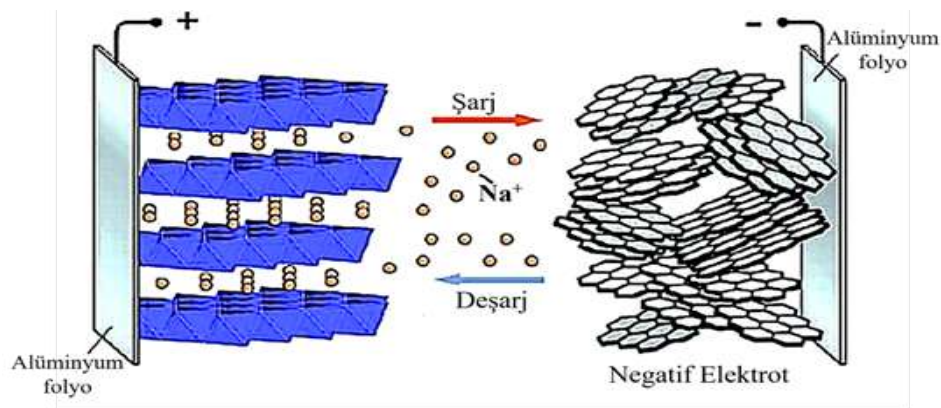


Şekil 7. Li-SS pili mevcut teknoloji hazırlık seviyesi ve ticari uygulamalar.

5. SODYUM İYON (NIB/SIB) PİLLER

Sodyum iyon piller, sodyumun yüksek miktardaki rezervleri, düşük maliyeti ile birlikte, lityum metaline en yakın fiziksel ve kimyasal özellikleri taşıması sebebiyle öne çıkmıştır (Sun vd. 2020). Lityum iyon pil sisteminde kullanılan anot, katot, elektrolit bileşenleri bu benzerlikten dolayı sodyum iyon pil sistemine adapte edilebilmiştir. Dolayısıyla da Tablo 1’de gösterilen sistemlerden endüstriyel ürüne dönüşen tek sistem şimdilik sodyum iyon pil sistemidir (Rudola vd. 2021).

Sodyum iyon pil sistemi lityum iyon pil sistemi gibi pil bileşenlerine ve benzer yük aktarım mekanizmasına sahiptir. Şekil 8’de pil sisteminin çalışma prensibi gösterilmiştir. Şarj esnasında sodyum katot tarafında iyonlaşır ve katottan anoda doğru aktarılır. Bu esnada sodyum iyonları uygulanan elektrik alanın etkisiyle iyonik olarak iletken olan elektrolitte ilerlerken, elektronlar dış devre boyunca yol alır. Sonuçta sodyum iyonları anodun tabakalar arası boşluklarında tekrar metalik sodyuma dönüşür. Deşarj esnasında ise aynı tepkime tam tersi şekilde gerçekleşir ve depolanan enerji salınır (Tang vd. 2015).

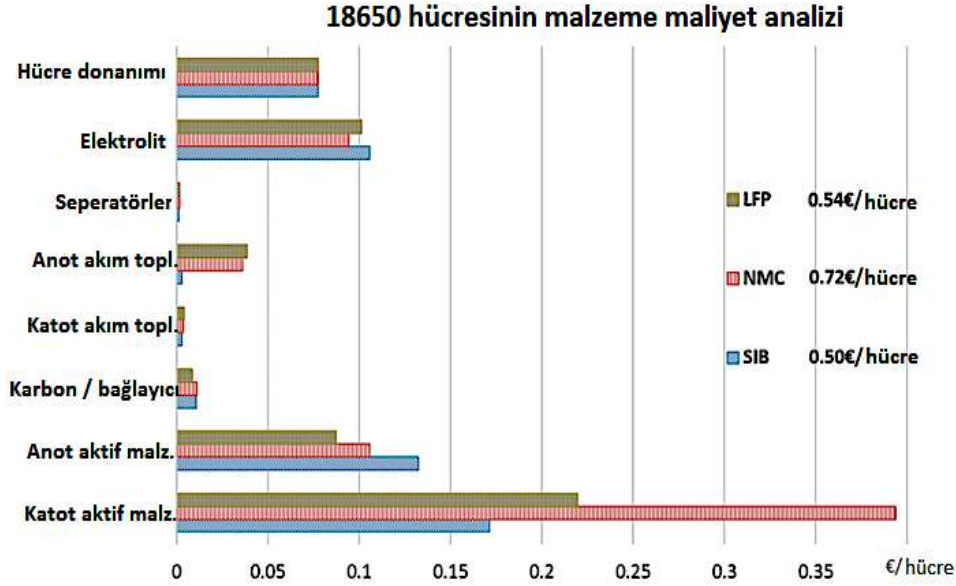


Şekil 8. Sodyum iyon pil hücresi (Komaba vd. 2011 kaynağından uyarlanmıştır.)

Sodyum iyon pillerin maliyet analizi ile ilgili literatürde çok fazla çalışma yer almamaktadır. Genel anlamda lityuma göre daha ucuz olan sodyumun kullanılması ile bir maliyet avantajı sağlamaktadır. Ayrıca lityum düşük gerilim değerlerinde alüminyum akım toplayıcı ile tepkimeye girer. Ancak sodyum kullanıldığında böyle bir tepkime meydana gelmez, bu doğrultuda bakır akım toplayıcı, alüminyum akım toplayıcı ile değiştirilebilmiştir. Bu değişiklik ise hem maliyet hem de hücre ağırlığının hafiflemesine yardımcı olmuştur (Vaalma vd. 2018).

Sodyum iyon pili oluşturan maliyette, lityum iyon pillerde olduğu gibi anot, katot ve elektrolit olarak kullanılan malzemelerin çeşidi önemli rol oynamaktadır. Örneğin, NMC tipi katot malzemesinde enerji yoğunluğu yüksek olduğu için birim güç miktarına düşen maliyet de düşük çıkmış ve 168,5 €/kW-sa olarak hesaplanmıştır. Öte taraftan katot

malzemesi LFP tipi katot olduğunda pil maliyeti 229,3 €/kW-sa olmuştur. Bu yüksek maliyet değerinin sebebi ise elde edilebilecek kapasitenin NMC tipi katota göre düşük olması şeklinde açıklanmıştır. Aynı şekilde benzer pil kimyasallarının kullanıldığı sodyum iyon pillerde de birim güç miktarına düşen maliyette seçilen katot, anot ve elektrolit çeşidi maliyeti belirleyen unsurdur (Peters vd. 2019). Şekil 9'da lityum demir fosfat (LFP), nikel mangan kobalt (NMC) ve sodyum iyon pil maliyetinin kıyaslaması görülmektedir. Tek bir 18650 yuvarlak hücre esas alınarak değişen maliyet ise listelenerek kıyaslanmıştır.



Şekil 9. LFP, NMC ve SIB (NIB) sisteminin maliyet analizinin kıyaslaması (€/hücre; her bir hücrenin farklı enerji yoğunlukları/depolama kapasiteleri dikkate alınmaz) (Peters vd. 2019).

5.1. Sodyum İyon Pili Hücre Bileşenler

Sodyum iyon pillerin bileşenleri diğer elektrokimyasal hücrelerde olduğu gibi, anot, katot, elektrolit, seperatör şeklindedir. Anot olarak sert karbon, metal oksitler, metal sülfürler, metal selenürler ve bu malzemelerin ikili/çoklu metal içeren türevleri ile birlikte organik anot malzemeleri de çalışılmaktadır (Dogrusoz ve Demir-Cakan 2020). Katot olarak lityum iyon pilde kullanılan katot malzemelerindeki lityumun sodyum ile yer değiştirdiği türevleri kullanılmaktadır. Ek olarak Prusya mavisi ve organik katotlar da sodyum iyon pil sisteminde denenmektedir.

Lityum iyon pil üretiminin başladığı 1991 yılından bu yana pil teknolojisi ile ilgili gelişmeler süreklilik arz etmiş ve oldukça rekabetçi bir sektör haline almıştır. Rekabetin temel unsuru ise, özgün değeri yüksek olan araştırma geliştirme çalışmalarıdır. Pil teknolojilerinin ilerleyen süreçte çeşitlendirilmesi ile sektörün daha çok büyümesi söz konusudur. Bu büyümede elbette mevcut lityum iyon pil altyapısının geliştirilmesi ve güçlendirilmesi gerekecektir. Dolayısıyla da yeni pil teknolojileri üzerinde yapılacak araştırma geliştirme çalışmaları, lityum iyon pil sistemine alternatif olabilecek, daha ucuz, daha verimli pil teknolojilerinin geliştirilmesi amacıyla yapılacaktır. Bu rekabetçi ve hızlı gelişen teknolojinin gelişmesine katkı sağlamak için işbirliklerine, özgün değeri yüksek projelere ihtiyaç vardır.

5.2. Sodyum İyon Pili Gelişmeye Açık Alanlar

Sodyum-iyon pil teknolojisi lityum iyon pil teknolojisine benzer olması, bu pil sisteminin geliştirilmesinde ve pazara hazır olmasında bir avantaj sağlamıştır. Bu pillerin lityum iyon pillere göre en önemli üstünlüğünü maliyet oluştururken, enerji yoğunluğunun düşük olması bu alanda Tablo 5'de verilen gelişmeye açık alanları öne çıkarmaktadır. Sodyum-iyon pillerin enerji yoğunluğunu artırmak, enerji depolama kapasitelerini en üst düzeye çıkarmak için oldukça önemlidir. Sodyum iyon pili birim kütle veya hacim başına depolanabilecek enerji miktarını artırmak için yeni elektrot malzemeleri, elektrotların bileşimi ve yapısının optimize edilmesi üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Ayrıca, sodyum-iyon pillerde uzun süreli performans için, çevrim sayısı ve kararlılığı artırmaya yönelik elektrot, elektrolit ve seperatör geliştirilmesi önemli Ar-Ge alanlarını oluşturmaktadır.

Tablo 5. Sodyum İyon pili önemli özellikleri ve aşılması gereken sorunlar

Öne Çıkan Özellikler	Aşılması Gereken Sorunlar
<ul style="list-style-type: none"> Doğada bol bulunması Li iyon ile benzer teknolojiye sahip olması Anot elektrotta alüminyum akım toplayıcı kullanımı Li iyon pillere kıyasla ekonomik olması Çoğu hammaddenin toksik olmayan bileşiklerden seçilmesi 	<ul style="list-style-type: none"> Enerji yoğunluğu Li-iyon pillerden düşük olması Çevrim sayısının düşük olması Alternatif yüksek kapasiteli anot arayışı Görece düşük akım yoğunluklarında çalışması Düşük sıcaklıklarla (< 10 °C) performansın hızlı düşmesi

5.3. Sodyum İyon Pili Mevcut Teknoloji Hazırlık Seviyesi ve Pazara Girme Potansiyeli

Sodyum-iyon pilde seri imalata hazır hale gelen teknoloji hazırlık seviyesi ile dünya üzerinde birçok elektrikli araç ve pil firması sodyum pil üretimine yönelmiştir. Bu ilgide önemli etken olarak hammadde fiyatlarının sürekli artması, elektrikli araç ve pil üreticilerin lityuma ulaşamama endişeleri verilebilir. Çin'deki birçok şirket sodyum iyon pil üretimine başlamaya hazır durumdadır. HiNa Battery ve Sehol, Sehol EX10 küçük elektrikli araç üzerine odaklanarak ortaklaşa bir sodyum-iyon pil test aracı geliştirmişlerdir. Bu test aracı, 25 kW-sa kapasiteye sahip ve 120 W-sa/kg enerji yoğunluğuna sahip bir batarya paketi ile donatılmıştır. Model, Çin standartlarına göre 252 km menzile sahip olup, 4C hızlı şarjı desteklemektedir. Pil takımı, 140 W-sa/kg enerji yoğunluğuna sahip sodyum-iyon hücrelerini kullanmaktadır. Bu şirketlerden CATL aynı zamanda en iyi lityum pil üreticileri arasında yer almakta ve diğeri HiNa Battery köklü lityum iyon pil üreticileri arasındadır. Çin otomobil üreticilerinden BYD Seagull modelinde seri üretimi Na iyon batarya ile yapacağını duyurmuştur. Çin'in yanı sıra, Avrupa ve Amerika'dan şirketler olmak üzere dünyanın dört bir yanından şirketler de aktif olarak sodyum iyon pilleri üretimine hazır haldedir. Bunlar İngiltere'de Faradion, Avrupa'da Tiamat ve ABD'de Natron Energy gibi tanınmış batarya üreticileridir. Sodyum iyon pil üreticileri, üretilecek pillerin özellikleri ve 2023 yılında üretime başlayacak firmaların özeti Tablo 6 da verilmiştir.

Mevcut sodyum iyon pili teknoloji hazırlık seviyesi, performansı geliştirme Ar-Ge çalışmaları ve pazara hazır bir pil olması nedeniyle 3-8 olarak değerlendirilmiştir (Şekil 10).


Şekil 10. Sodyum iyon pili mevcut teknolojik hazırlık seviyesi ve ticari uygulamalar



Tablo 6. Bazı sodyum iyon pil üreticileri ve üretilecek sodyum iyon pil özellikleri.

Şirket, Ülke	Katot	Anot	Hücre Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Sayısı, Çalışma Sıcaklığı	Beklenen Uygulamalar	Planlanan Üretim Tarihi ve Miktarı
Faradion, İngiltere	Tabakalı oksit	Sert Karbon	155	3.000 çevrim, -20°C, 60°C	Düşük hızlı EA, sabit enerji depolama	Hindistan'da GW fabrika
Natron Energy, ABD	Prusya Mavisi benzeri	Prusya Mavisi benzeri	20-30	5.000 çevrim, -20°C, 40°C	Telekomünikasyon tesisleri ve veri merkezleri gibi sabit enerji depolama, endüstriyel araçlar	0,6GW/yıl 2023
HiNa Battery, Çin	Tabakalı oksit	Oksit yapılı	145	4.500 çevrim -20°C, 80°C	Skuter vb. düşük hızlı EA, sabit enerji depolama	2022'de 1 GW, 2025'te 5 GW
CATL, Çin	Prusya Mavisi benzeri	Sert Karbon	160	-20°C, -	Düşük hızlı EA, sabit enerji depolama	2023
Tiamat Energy, Fransa	Poli anyonik bileşik	Sert Karbon	90-120	5.000 çevrim -	Skuter ve diğer hareketli araçlar, sabit enerji depolama	6 GW/yıl 2030
Li-Fun Technology, Çin	Tabakalı oksit	Sert Karbon	140	4.000 çevrim -20°C / -	Düşük hız EA, EA otobüs, evsel kullanım için sabit enerji depolama	2023
Nippon Elect. Glass, Japonya	Kristal cam	Kristal cam	-	-20°C / 120°C	Otomotiv ve sabit enerji depolama	2025
Zoolnasm, Çin	Poli anyonik bileşik	Sert Karbon	-	-	İki tekerlekli araçlar, düşük hızlı EA, forklift, sabit enerji depolama	2023
Natrium Energy, Çin	Tabakalı oksit	Sert Karbon	130-160	5.000 çevrim -40°C / 80°C	Sabit enerji depolama, İki ve üç tekerlekli araçlar, düşük hızlı EA	2022

6. ÜRÜN YAŞAM DÖNGÜSÜ (LCA) ANALİZİ

Ürün yaşam döngüsü analizi, ürünlerin, çevresel etkilerinin belirlenmesini sağlayan bir metottür. Bu analizde ürünün, hammadde üretiminden, üretim basamaklarına, ikincil kullanım alanları ve atık olarak nasıl bir giderim prosedürüne tabii tutulduğuna kadar tüm ömrü değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme pil kimyasına göre yani kullanılan anot, katot ve elektrolit malzemesinin çeşidine göre değişmektedir.

Yapılan bir çalışmada, sodyum iyon pil kimyası NMC katot ve sert karbon anot olarak seçilmiş ve ReCiPe ortalama modeli ile analiz edilmiştir. Bu analizin yapılabilmesi için, OpenLCA yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar; küresel ısınma potansiyeli (GWP: global warming potential), fosil yakıt azaltma potansiyeli (FDP: fossil depletion potential), karasal asitleme potansiyeli (TAP: terrestrial acidification potential), insana etki edebilecek toksisite potansiyeli (HTP: human toxicity potential), tatlı su kaynaklarını ve deniz suyunu ötrofikasyon potansiyeli (EP: eutrophication potential) olarak raporlanmıştır. Sonuçlara bakıldığında ise, 1 kW-sa'lık bir sodyum iyon pil üretimi ile elde edilen GWP değerinin 140,33 kg eşdeğer CO₂ olduğu, FDP değerinin 37,35 kg eşdeğer petrol, TAP değerinin ise 1,51 kg eşdeğer SO₂ olduğu, HTP değerinin 168,15 kg eşdeğer 1,4 DCB (Dikloro benzen) olduğu, EP değerinin 0,12 kg eşdeğer P (fosfor) olduğu bulunmuştur (Peters vd. 2016).

Bu değerlerin düşürülmesi için, batarya malzemelerinin optimizasyonunda, seçilen kimyasalların, üretim metotlarının çevresel etkileri de göz önüne alınarak belirlenmesi önemlidir. Ek olarak, pilin şarj-deşarj çevriminin uzun olması da önemlidir. Eğer çevrim performansı artırılırsa, çevresel etkileri de azaltılmış olacaktır.

7. ÖNERİLER

Küresel ısınma, hava kirliliği ve enerji arzının güvenliği insanlığın yüz yüze geldiği önemli problemlerdir. Küresel ısınma ile ilgili yapılan tahminler, modellemeler, hesaplamalar bu yüzyılın ortasında sıcaklık artışını 2°C ile sınırlı tutabilmek için tedbir alınması gerekliliğini net bir şekilde ortaya koymuştur. Hava kirliliği ise hem kronik hastalıklarda artışa hem de ölümlere yol açacak boyuta ulaşmıştır. Enerji arzının güvenliği ise, petrol ve doğalgaz kaynaklarının bazı coğrafi bölgelerden çıkarılabiliyor olması nedeniyle önemlidir. Tüm bu konular değerlendirildiğinde, güneş, rüzgar, dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerjinin yaygınlaşması çok önem taşımaktadır.

Yenilenebilir enerjinin depolanması için verimli, kolay kurulumu olan depolama sistemlerinin geliştirilmesi bu anlamda kritik ve acildir. Ayrıca AB ülkelerinde 2030 yılında karbon salınımını %55 oranında düşürme hedefi mevcuttur. Dünya’da en fazla karbon Çin tarafından yayılmaktadır, ancak Çin’de 2060 yılından önce karbon nötr olma hedefini belirlemiştir. Bilindiği gibi Türkiye’de 10 Kasım 2021’de Paris Anlaşmasına taraf olmuştur. Bu gelişmelerin tamamı Dünya genelinde karbon emisyonlarının azaltılması, hatta sıfırlanması için “yeşil dönüşüm” için, ticari faaliyetler yeniden planlanmakta ve uygulamaları geliştirilmektedir (Servaa 2022). Enerji üretimi için kullanılan fosil yakıtlar nedeniyle ortaya çıkan CO₂ emisyonu, toplam emisyonların %40’ını oluşturmaktadır. Dolayısıyla da enerji üretiminde karbon nötr olmak oldukça önemli hale gelmektedir. Bu doğrultuda yenilenebilir enerjinin kullanımı, verimli depolama sistemleri ile mümkün olduğu için enerjinin depolanması, sadece ihtiyaç duyulduğunda kullanılması büyük önem taşımaktadır.

Dünya’da birçok ülke enerjinin verimli depolanabileceği ve CO₂ emisyonlarının azaltılmasını sağlayacak teknolojiler için Ar-Ge çalışmalarına yatırımlar yapmaktadır.

Türkiye’de lityum iyon pil üretimi ile ilgili faaliyete geçen firmalar mevcuttur. Aynı altyapı ile sodyum iyon pil üretimi de gerçekleştirilebilmektedir. Bu firmalardan Aspilsan öncü olma özelliği taşımaktadır. NMC-grafit pil kimyası ile üretilecek lityum iyon piller savunma sanayi başta olmak üzere, telekomünikasyon amacıyla da kullanılacaktır. Ayrıca TOGG marka yerli aracın bataryası SiRo Energy tarafından üretilecektir. Ek olarak LFP-grafit pil kimyası ile lityum iyon pil üretimi Pomega Enerji tarafından üretilecektir.

TÜBİTAK MAM’da Enerji Enstitüsü bünyesinde çalışan Batarya Laboratuvarı’nda ise pilot ölçekli üretim tesisi bulunmaktadır. Bu laboratuvar da farklı pil kimyaları çalışılmaktadır. Yukarıda bahsi geçen Türkiye’deki araştırma gruplarının bir araya gelmesi ile yeni gelişmelerin de takip edilebileceği çalıştaylar düzenlenebilir. Bu doğrultuda bir bilgi ağı veya portal kurularak Ulusal Batarya Topluluğu adı altında bir topluluk oluşturulabilir. Bu topluluk hem sanayicilerin bulunduğu, hem de üniversitelerde bu konularda araştırma yapan öğretim görevlilerinin yer aldığı bir oluşum olabilir. Böylece üniversite- sanayi işbirliği için yeni bir temas alanı yaratılabilir. Doktora ve yüksek lisans düzeyindeki araştırmacıların bursiyer olabilmesi için seçme kriterleri ile ilgili düzenleme yapılabilir. Dolayısıyla etkileşimin yüksek olduğu yenilikçi çalışmaların teşvik edildiği, bir ekosistem oluşturulabilir. Bu toplulukta yer alan Ar-Ge Merkezlerinde bu konularda çalışan personel istihdamını özendirici teşvikler verilebilir. Ayrıca topluluğa dahil olan her araştırma laboratuvarındaki altyapı ve kimyasal listesi topluluğa ait portala yüklenerek, ihtiyaç duyulan kimyasalların hızlı temini, ileri analizlerin hızlı ve verimli bir şekilde yapılması gibi faydalar sağlanabilir. Bu topluluğa başkanlık edecek kişi veya kuruluşlar dönemsel belirlenerek, farklı kişilerin vizyonu ile en verimli yönetim/liderlik anlayışı ortaya konabilir. Bu topluluk, ileri elektrokimya alanında yapılacak teorik ve uygulamalı eğitimlerle bilgi seviyesini artırabilir. Topluluk bünyesinde anot çalışma grubu, katot çalışma grubu, elektrolit çalışma grubu, seperatör çalışma grubu, batarya yönetim sistemi çalışma grubu, geri dönüşüm çalışma grubu, matematiksel modelleme çalışma grubu gibi alt gruplar oluşturularak, elde edilen deneysel bilgilerin artırılması ve bilimsel niteliğinin yükseltilmesi sağlanabilir. Bu çalışma alanı farklı pil sistemlerinin, farklı kullanım amaçları için geliştirilmesi ile daha da büyüyecektir. Araştırma geliştirme faaliyetleri ise, bu sektörde öne geçmek için ana çalışma alanıdır. Yenilikçi, rekabetçi bu çalışma alanı medikal, savunma, otomotiv, elektrikli teçhizat, telekomünikasyon, robotik gibi çok farklı alanlarda kullanılacağı için hala gelişmeye açıktır.

Sonuç olarak günümüzde bataryalar, mobil cihazlardan elektrikli araçlara kadar geniş bir yelpazede enerji depolama konusunda kritik bir rol oynamaktadır. Hızla gelişen teknoloji ile birlikte yüksek depolama kapasitesine ve ömre sahip bataryalara olan talep artmaktadır. Elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji depolama sistemleri ve taşınabilir cihazlar gibi alanlarda, düşük maliyetli ve verimli bataryalar ile ilgili araştırmalar öne çıkmaktadır. Bataryalara olan ihtiyaç, teknolojinin ilerlemesi ve elektrikli araç kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte katlanarak artacaktır. Bu nedenle, teknolojiye ilerleme, batarya teknolojisindeki gelişmelerle yakından ilişkilidir. Elektrikli araçlarda bataryalardaki her bir gelişme, bu araçların yaygınlaşmasını hızlandırmaktadır. Bugün lityum iyon bataryaların yaygın olarak kullanılmasının ardından, katihal lityum bataryalar geleceğe yönelik önemli bir gelişme olarak öne çıkmaktadır. Bu bataryalar, menzil



artışı ve güvenlikle ilgili üstünlükleriyle dikkat çekmektedir. Ülkemizde yapılacak geliştirme çalışmaları ve işbirlikleri, yeni nesil bataryaların üretimini teşvik ederek bu alandaki ilerlemeyi hızlandıracaktır.

KAYNAKLAR

- Abraham, K.M., 1996. A Polymer Electrolyte-Based Rechargeable Lithium/Oxygen Battery. *Journal of The Electrochemical Society*, 143, 1.
- Akgül F.S., Farsak, M., Kardaş, G., Dehri, İ., 2019. Comparison of nonaqueous electrolytes on oxygen reduction in Li-air batteries. *Journal of Molecular Liquids*, 223, 343-349.
- Ankara İli Lityum Sülfür Batarya Üretimi Fizibilite Raporu, 2021. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 42.
- Au, H., Crespo-Ribadeneyra, M., Titirici, M. M. 2022. Beyond Li-ion batteries: performance, materials diversification, and sustainability. *One Earth*, 5, 207-211.
- Débart A., Paterson A.J., Bao J., Bruce P.G., 2008. α -MnO₂ Nanowires: A Catalyst for the O₂ Electrode in Rechargeable Lithium Batteries, *Angewandte Chemie International Edition*, 47, 4521-4524.
- Barut, G.N., 2019. Katı Hal Li iyon pillerinin üretimi ve elektrokimyasal karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, 72.
- Borchardt, L., Oschatz, M., Kaskel, 2016. Carbon materials for lithium sulfur batteries-ten critical questions. *Chemistry A European Journal*, 22, 7324-7351
- Busche, M.R., Adelhelm, P., Sommer, H., Schneider, H., Leitner, K., Janek, J., 2014. Systematical electrochemical study on the parasitic shuttle-effect in lithium-sulfur-cells at different temperatures and different rates. *Journal of Power Sources*, 259, 289-299.
- Cao, Y., Wei, Z., He, J., Zang, J., Zhang, Q., Zheng, M., Dong, Q., 2012. α -MnO₂ nanorods grown in situ on graphene as catalysts for Li-O₂ batteries with excellent electrochemical performance. *Energy & Environmental Science*, 5, 9765.
- Chen, T., Jin, Y., Lv, H., Yang, A., Liu, M., Chen, B., Xie, Y., Chen, Q., 2020. Applications of lithium-ion batteries in grid-scale energy storage systems. *Transactions of Tianjin University*, 26, 208-217.
- Chen, X.S., Zhu, Y.G.G.R., Chen, H.J, Chen, S.C., Wang, X.L., Wu, G., Wang, Y.Z., 2020. Multifunctional interlayer with simultaneously capturing and catalytically converting polysulfides for boosting safety and performance of lithium-sulfur batteries at high-low temperatures. *Journal of Energy Chemistry*, 50, 248-259.
- Demir-Cakan, R., 2017. Li-S Batteries: The Challenges, Chemistry, Materials, and Future Perspectives. World Scientific Publishing Europe Ltd, ISBN:1786342499.
- Devanathan, R., 2008. Recent developments in proton exchange membranes for fuel cells. *Energy & Environmental Science*, 1, 101-119.
- Dogrusoz, M., Demir-Cakan, R., 2020. Mechanochemical synthesis of SnS anodes for sodium ion batteries. *International Journal of Energy Research*, 44, 10809-10820.
- Du, J., Zhang, T., Cheng, F., Chu, W., Wu, Z., Chen, J., 2014. Nonstoichiometric Perovskite CaMnO_{3- δ} for Oxygen Electrocatalysis with High Activity. *Inorganic Chemistry*, 53, 9106-9114.
- Energy & Power/Lithium-Air Battery Market Report, 2022-2029. Fortune Business Insights, Report ID: FBI105644.
- Fan K., Huang H., 2022. Two-dimensional host materials for lithium-sulfur batteries: A review and perspective, 696-717.
- Fang, R., Zhao, S., Pei, S., Qian, X., Hou, P.X., Cheng, H.M., Liu, C., Li, F., 2016. Toward more reliable lithium-sulfur batteries: an all-graphene cathode structure. *ACS nano*, 10, 8676-8682.
- Fang, R., Zhao, S., Sun, Z., Wang, D.W., Cheng, H.M., Li, F., 2017. More reliable lithium-sulfur batteries: status, solutions and prospects. *Advanced Materials*, 29, 1606823.
- Fotouhi, A., Auger, D.J., O'Neill, L., Cleaver, T., Walus, S., 2017. Lithium-Sulfur Battery Technology Readiness and Applications A Review. *Energies*, 10, 1937.
- Gao, Y., Pan, Z., Sun, J., Liu, Z., Wang, J., 2022. High-Energy Batteries: Beyond Lithium-Ion and Their Long Road to Commercialisation. *Nano-Micro Letters*, 14, 1-49.
- Gellert, M., Gries, K.I., Zakel, J., Kranz, S., Bradler, S., Hornberger, E., Müller, S., Yada, C., Rosciano, F., Volz, K., Roling, B., 2015. Charge transfer across the Interface between LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ high-voltage cathode films and solid electrolyte films. *Journal of The Electrochemical Society*, 162, 754-759.



- Girishkumar, G., McCloskey, B., Luntz, A. C., Swanson, S., & Wilcke, W., 2010. Lithium–air battery: promise and challenges. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(14), 2193-2203.
- Global Lithium-Air Battery Market Report: Compound Annual Growth of 9.5% Forecast During, 2021-2026. MarkNtel Advisors, Report Code EN44020.
- Guo, J., Xu, Y., Wang, C., 2011. Sulfur-impregnated disordered carbon nanotubes cathode for lithium–sulfur batteries. *Nano Letters*, 11, 4288-4294.
- Guo, Z., Zhu, G., Qiu, Z., Wang, Y., Xia, Y., 2012. High performance Li–O₂ battery using γ -MnOOH nanorods as a catalyst in an ionic-liquid based electrolyte. *Electrochemistry Communications*, 25, 26-29.
- Han, X., Hu, Y., Yang, J., Cheng, F., Chen, J., 2014. Porous perovskite CaMnO₃ as an electrocatalyst for rechargeable Li–O₂batteries. *Chemical Communications*, 50, 1497-1499.
- He, Y., Wu, S., Li, Q., Zhou, H., 2019. Designing a Multifunctional Separator for High-Performance Li–S Batteries at Elevated Temperature. *Small*, 15, 1904332.
- Hwang Y., Yun K.H., Chung Y.C., 2015. Carbon-free and two-dimensional cathode structure based on silicene for lithium-oxygen batteries: A first-principles calculation, *Journal of Power Sources*, 275, 32–37.
- Jayaprakash, N., Jingguo, S., Sekhar, M.S., Corona, Lynden, A., 2011. Porous hollow carbon@sulfur composites for high-power lithium–sulfur batteries. *Angewandte Chemie*, 50, 5904-5908.
- Khan, A., Wang, H., Liu, Y., Jawad, A., Iftikhar, J., Liao, Z., Wanga, T., Chen, Z., 2018. Highly efficient α -Mn₂O₃@MnO₂-500 nanocomposite for peroxy monosulfate activation: Comprehensive investigation of manganese oxides. *Journal of Materials Chemistry A*, 6, 1590-1600.
- Kim, J.G., Son, B., Mukherjee, S., Schuppert, N., Bates, A., Kwon, O., Choi, M.J., Chung, H.Y., 2015. A review of lithium and non-lithium based solid state batteries. *Journal of Power Sources*, 282, 299-322.
- Komaba, S., 2020. Sodium-driven rechargeable batteries: an effort towards future energy storage. *Chemistry Letters*, 49, 1507-1516.
- Komaba, S., Murata, W., Ishikawa, T., Yabuuchi, N., Ozeki, T., Nakayama, T., Ogata A., Gotoh K., Fujiwara, K., 2011. Electrochemical Na insertion and solid electrolyte interphase for hard-carbon electrodes and application to Na-Ion batteries. *Advanced Functional Materials*, 21(20), 3859-3867.
- Kraytsberg, A., Eli, Y.E., 2011. Review on Li–air batteries—Opportunities, limitations and perspective. *Journal of Power Sources*, 196, 886-893.
- Kumar, B., Kumar, J., 2010. Cathodes for Solid-State Lithium–Oxygen Cells: Roles of Nasion Glass-Ceramics. *Journal of The Electrochemical Society*, 157, 611.
- Lee, J.M., Singh, G., Cha, W., Kim, S., Yi, J., Hwang, S.J., Vinu, A., 2020. Recent advances in developing hybrid materials for sodium-ion battery anodes. *ACS Energy Letters*, 5, 1939-1966.
- Liang, C., Dudney, N.J., Howe, J.Y., 2009. Hierarchically structured sulfur/carbon nanocomposite material for high-energy lithium battery. *Chemistry of Materials*, 21, 4724-4730.
- Lithium Sulfur Battery Market Report, 2021. Allied Market Research, Report ID:A12076.
- Liu, B., Fang, R., Xie, D., Zhang, W., Huang, H., Xia, Y., Wang, X., Xia, X., Tu, J., 2018. Revisiting scientific issues for industrial applications of lithium–sulfur batteries, *Energy & Environmental Materials*, 1, 196-208.
- Liu, Y., Lin, D., Liang, Z., Zhao, J., Yan, K., Cui, Y., 2016. Lithium-coated polymeric matrix as a minimum volume-change and dendrite-free lithium metal anode. *Nature Communications*, 7, 10992.
- Lu, R., Cheng, M., Mao, L., Zhang, M., Yuan, H., Amin, K., Yang, C., Cheng, Y., Meng, Y., Wei, Z., 2020. Nitrogen-doped nanoarray-modified 3D hierarchical graphene as a cofunction host for high-performance flexible Li–S battery. *EcoMat*, 2, 12010.
- Ma, G., Wen, Z., Wang, Q., Shen, C., Jina, J., Wu, X., 2014. Enhanced cycle performance of a Li–S battery based on a protected lithium anode. *Journal of Materials Chemistry A*, 2, 19355–19359.
- Ma, Z., Yuan, X., Li, L., Ma, Z., Wilkinson, D., Zhang, L. and Zhang, J., 2015. A review of cathode materials and structures for rechargeable lithium–air batteries. *Energy & Environmental Science*, 8(8), 2144-2198.
- Moon, S., Jung, Y.H., Jung, W.K., Jung, D.S., Choi, J.W., Kim, D.K., 2013. Encapsulated monoclinic sulfur for stable cycling of Li–S rechargeable batteries. *Advanced Materials*, 25, 6547–6553.
- Pan, J., Tian, X.L., Zaman, S., Dong, Z., Liu, H., Park, H.S., Xia, B.Y., 2019. Recent Progress on Transition Metal Oxides as Bifunctional Catalysts for Lithium-Air and Zinc-Air Batteries. *Batteries&Supercaps*, 2, 336–347.



Pang, Q., Liang, X., Kwok, C.Y., Nazar, L.F., 2016. Advances in lithium–sulfur batteries based on multifunctional cathodes and electrolytes. *Nature Energy*, 1, 16132.

Peters, J., Buchholz, D., Passerini, S., Weil, M., 2016. Life cycle assessment of sodium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 5, 1744-1751.

Peters, J.F., Cruz, A.P., Weil, M., 2019. Exploring the economic potential of sodium-ion batteries. *Batteries*, 5, 10.

Pope, M.A., Aksay, I.A., 2015. Structural design of cathodes for Li-S batteries. *Advanced Energy Materials*, 5, 1500124.

Rauh, R., Abraham, K., Pearson, G., Surprenant, J., Brummer, S., 1979. A lithium /dissolved sulfur battery with an organic electrolyte. *Journal of The Electrochemical Society*, 126, 523.

Read, J., Mutolo, K., Ervin, M., Behl, W., Wolfenstine, J., Driedger, A. and Foster, D. 2003. Oxygen Transport Properties of Organic Electrolytes and Performance of Lithium/Oxygen Battery. *Journal of The Electrochemical Society*, 150, 1351.

Ren, W., Ma, W., Zhang, S., Tang, B., 2019. Recent advances in shuttle effect inhibition for lithium sulfur batteries. *Energy Storage Mater*, 23, 707–732.

Rudola, A., Rennie, A.J.R., Heap, R., Meysami, S.S., Lowbridge, A., Mazzali, F., Sayers, R., Wright, C.J., Barker, J., 2021. Commercialisation of high energy density sodium-ion batteries: Faradion's journey and Outlook. *Journal of Materials Chemistry A*, 9, 8279-8302.

Seh, Z.W., Li, W., Cha, J.J., Zheng, G., Yang, Y., McDowell, M.T., Hsu, P.C., Yi Cui, 2013. Sulphur–TiO₂ yolk–shell nanoarchitecture with internal void space for long-cycle lithium–sulphur batteries. *Nature Communications*, 4, 1331.

Servaa, O.E., 2022. Achieving 1.5 °C and net-zero emissions target: The role of renewable energy and financial development. *Renewable Energy*, 188, 967-985.

Solid State Battery Market Size to Hit US\$ 1645.6 MN by 2030, 2021. Precedence Research.

Solid State Battery Market Size, 2021 – 2028. Grand View Research, Report ID:GVR-4-68039-000-4.

Song, K., Jung, J., Heo, Y.U., Lee, Y.C., Cho, K., Kang, Y.M., 2013. α -MnO₂ nanowire catalysts with ultra-high capacity and extremely low overpotential in lithium–air batteries through tailored surface arrangement. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15, 20075.

Srivastava, M., Singh, J., Kuila, T., Layek, R.K., Kime, N.H., Lee, J.H., 2015. Recent advances in graphene and its metal-oxide hybrid nanostructures for lithium-ion batteries, *Nanoscale*, 7, 4820-4868.

Sun, C., 2018. Recent advances in lithium-air batteries. *Advanced Materials Letters*, 9, 336-344.

Sun, F., Qu, Z., Wang, H., Liu, X., Pei, T., Han, R., Gao, J., Zhao, G., Lu, Y., 2020. Vapor deposition of aluminium oxide into N-rich mesoporous carbon framework as a reversible sulfur host for lithium-sulfur battery cathode. *Advanced Energy Materials*, 10, 2000907.

Sun, Y., Shi, P., Chen, J., Wu, Q., Liang, X., Rui, X., Xiang, H., Yu, Y., 2020. Development and challenge of advanced nonaqueous sodium ion batteries. *EnergyChem*, 2, 100031.

Tan, P., Liu, M., Shao, Z., Ni, M., 2017. Recent Advances in Perovskite Oxides as Electrode Materials for Nonaqueous Lithium-Oxygen Batteries, *Advanced Energy Materials*, 7, 1602674.

Tang, J., Dysart, A.D., Pol, V.G., 2015. Advancement in sodium-ion rechargeable batteries. *Current opinion in chemical engineering*, 9, 34-41.

Thapa, A.K., Ishihara, T., 2011. Mesoporous α -MnO₂/Pd catalyst air electrode for rechargeable lithium–air battery. *Journal of Power Sources*, 196, 7016-7020.

Trevey, J.E., 2011. Advances and development of all-solid-state lithium-ion batteries. PhD Thesis, University of Colorado Department of Mechanical Engineering, 210.

Vaalma, C., Buchholz, D., Weil, M., Passerini, S., 2018. A cost and resource analysis of sodium-ion batteries. *Nature reviews materials*, 3, 1-11.

Walle, M.D., 2022. Environmental Solid Waste-derived Carbon for Advanced Rechargeable Lithium-Sulfur Batteries: A Review. *Chemistry Select*, 7.

Wang, C., Xie, Z., Zhou, Z., 2019. Lithium-air batteries: Challenges coexist with opportunities, *APL Materials*, 7, 040701.

Wang, D., Xiao, J., Xu, W., Zhang, J.G., 2010. High Capacity Pouch-Type Li–Air Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 157, 760..

Wang, Y., Zhou, H., 2010. A lithium-air battery with a potential to continuously reduce O₂ from air for delivering energy. *Journal of Power Sources*, 195, 358–361.



- Wang, M., Emre, A. E., Kim, J. Y., Huang, Y., Liu, L., Cecen, Huang, Y., Kotov, N. A., 2022. Multifactorial engineering of biomimetic membranes for batteries with multiple high-performance parameters. *Nature Communications*, 13(1), 278.
- Xiao, J., Wang, D., Xu, W., Wang, D., Williford, R.E., Liu, J., Zhang, J.G., 2010. Optimization of Air Electrode for Li/Air Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 157, 487.
- Xiao, J., Xu, W., Wang, D., Zhang, J.G., 2010. Hybrid Air-Electrode for Li/Air Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 157, 294.
- Xiang Y., Li J., Lei J., Liu D., Xie Z., Qu D., Li K., Deng T., Tang H., 2016. Advanced separators for lithium-ion and lithium-sulfur batteries: a review of recent progress. *ChemSusChem*, 9(21), 3023-3039.
- Yang, M., Nan, J., Chen, W., Hu, A., Sun, H., Chen, Y., Wu, C., 2021. Interfacial engineering of polypropylene separator with outstanding high-temperature stability for highly safe and stable lithium-sulfur batteries. *Electrochemistry Communications*, 125, 106971.
- Yang Z., Liu X.H., He X.X., Lai X.H., 2021. Rechargeable Sodium-Based Hybrid Metal-Ion Batteries toward Advanced Energy Storage, *Advanced Functional Materials*, 31(8), 2006457.
- Yanga, Y., Shi, M., Zhou, Q.F., Li, Y.S., Fua, Z.W., 2012. Platinum nanoparticle-graphene hybrids synthesized by liquid phase pulsed laser ablation as cathode catalysts for Li-air batteries. *Electrochemistry Communications*, 20, 11-14.
- Zhang, X., Fan, W., Zhao, S., Cao, R., Li, C., 2019. An efficient, bifunctional catalyst for lithium-oxygen batteries obtained through tuning the exterior Co²⁺/Co³⁺ ratio of CoOx on N-doped carbon nanofibers. *Catalysis Science & Technology*, 9, 1998-2007.
- Zhang, J.G., Wang, D., Xu, W., Xiao, J., Williford, R.E., 2010. Ambient operation of Li/air batteries. *Journal of Power Sources*, 195, 4332-4337.
- Zhao, Y., Zhang, Y., Gosselink, D., Doan, N.L., Sadhu, M., Cheang, H.J., Chen, P., 2012. Polymer electrolytes for lithium/sulfur batteries. *Membranes*, 2, 553-564.

Internet Kaynakları

- [1] <https://www.techspot.com%252fnews%252f90878-sakuu-3d-printed-solid-state-battery-could-boon.html>, 12.04.2024.



SON SÖZ

Ülkemizdeki batarya ile ilgili çalışmalar özelinde insanlık için gerekli yeni teknolojilerinin fikrinin oluşumundan son aşamada teknoloji ve/veya teknolojik ürünün dünya pazarında yerini almasına kadar geçen süreçte akıllı stratejilerin, taktiklerin oluşturulup azim ve kararlılıkla uygulanması gereklidir. Umut ederiz ki, kanun yapıcılar, uygulayıcılar ve kullanıcılar için batarya çalışma grubu olarak gerçekleştirmiş olduğumuz analiz ve çözüm önerilerimiz batarya teknoloji yol haritasının oluşturulmasına ışık olur.

Rekabetçi, bağımsız, sürdürülebilir ve inovatif batarya ekosistemi oluşturmak için aşağıdaki konular hakkında detaylı çalışmalar yapılmalıdır:

- **Yatırım koşullarının iyileştirilmesi:** Hem üretim hem de bilimsel çalışmaların yatırımlarında sübvansiyonlar ve finansman mekanizmaları aktive edilmeli, bürokratik süreçlerin sadeleşmesi de sürece uyumu kolaylaştırılmalıdır. Bu noktada ülkeler arasında ortak üretim ve inovasyon işbirlikleri ile ortakların güçlü yönlerini bir araya getirerek Asya, Avrupa ve ABD'ye karşı daha güçlü ve rekabetçi bir ekosistem oluşumu sağlanabilir.
- **Enerji maliyetlerinin ve üretime ait karbon ayak izinin düşürülmesi:** Uygun maliyetli, sürdürülebilir yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimde kullanımının teşvik edilmesi gereklidir.
- **Nitelikli işgücünün artırılması:** Nitelikli işgücünün ve entelektüel özsermayenin geliştirilmesi için yüksek okul ve üniversitelerde var olan batarya endüstrisi ile işbirliğinde uçtan uca eğitim için müfredatın oluşturulması gereklidir. Beyin ve zihin göçünün engellenerek nitelikli akıl ve iş gücünün (mühendis, teknisyen, uzman vb) ülkemizde çalışmalarına devam etmesi için uygun koşulların oluşturulması gereklidir.
- **Tedarik değer zinciri oluşturmak:** Batarya konusunda hali hazırdaki hammadde ve teknolojilerimizle tedarik sağlayacağımız alt bileşenlerde sürdürülebilir ve kendi kendine yeten değer zinciri oluşturmak için uygun teşviklerin sağlanması. Pazarlama vb. faaliyetler için şirketlere teknik destek verilmesi.
- **Batarya Geri Dönüşüm Yönetim Sistemi:** Geri dönüşüm ve atıkların yeniden kullanılmasını sağlamak için gerekli teknolojilerin geliştirilmesinde üniversite ve endüstri işbirliklerinin oluşumu ve teşvik edilmesi.
- **Yerli Bilgi, Teknoloji, Ürünlerin ve Üreticilerin Korunumu:** Rekabette pozitif ayrımcılık yapılarak bilimsel çalışmalar sonucunda üniversitelerde THS 4 seviyesinde kanıtlanmış bilimsel çıktılarının ve yerli üreticilerin üretimleri ara ve son ürünlerin kullanımının teşvik edilmesi. Alanında yetkin uzmanların danışmanlığı ve yetişmiş insan gücünün sürdürülebilir olarak etkin kullanımı yönünde akademi ve iş dünyasına yeni mekanizmaların oluşturulması.
- **Batarya İnovasyon Kültürü Merkezi Kurulumu:** Ülkemizdeki alanında uzman araştırmacıların kolektif akıllarını ve üniversite ve/veya enstitülerindeki çalışmalarını, yurt içi ve dışı bilimsel, endüstriyel inovasyon odaklı ortaklıkları koordine eden ve alt yapısında tüm batarya araştırmacıların ortak kullanımını sağlayacak yüksek teknolojik karakterizasyonların bulunacağı, teknoloji transferini gerçekleştirecek ve sürekliliğinin sağlanabileceği sistem eşliğinde bir kurum oluşumu.

Dünya çok büyük ve kararlı bir dönüşüm içerisindedir. İnovasyon ise; yaratıcı bir düşünce ile başlayıp sonunda insanlığın içinde bulunduğu tüm ekosisteme değer yaratarak devam eden bir süreçtir. İnovasyon süreci sonunda elde edilecek kazanımlar özellikle ve öncelikle pazarda oluşturulan büyüklük ve maddi kazançlarla değil, iklim değişikliğine katkı gibi paha biçilmez kazanımlarla değerlendirilmelidir.

Tablo 1. Türkiye'nin Elektrikli Araçlarda Lityum İyon Bataryalar GZFT analizi

Güçlü Yönler
<ul style="list-style-type: none"> • Ülkenin jeopolitik önemi. • Genç araştırmacı nesil varlığı. • Kamu – Sanayi – Üniversite – Araştırma Merkezi vb. bilgi seviyesi. • Çevik hareket edebilecek insan sermayesinin varlığı. • Üniversite ve enstitülerde yeni alanları araştırıp geliştiren ve inovasyona dönüştürebilecek yetkinlikte, çalışkan ve akıllı insan sermayesinin varlığı. • Endüstride yeni teknolojik gelişmeleri takip ve uygulama isteği. • Üniversitelerde yeni teknolojilere yönelik temel laboratuvar varlığı. • Üniversitelerde yeni teknolojilere yönelik derslerin varlığı. • Ülkemizde var olan yenilenebilir enerji kaynakları düşük karbon ayak izli batarya üretmek isteyen yatırımcıların ilgisini çekme potansiyeli.

Zayıf Yönler
<ul style="list-style-type: none"> • Yaratıcılığı kendine yakıştıramayan toplum bilinci. • Bilim ve teknolojinin ülkemiz insanı tarafından üretilebileceği inancının olmayışı. • Bireysel kıskançlıkların toplumu yanlış yönlendirilerek “yapılamaz, yapmak yerine var olanı kullanmanın maliyetinin düşük olduğunu” söylemleri ile bilim ve teknolojiye kendi insanı ile üretme cesaretinin olmayışı. • Bireysel sevgi ve özgüven eksikliğine dayalı toplumun başarıma inancının olmayışı, güvensizliği. • Başarmaya inanç eksikliği, güvensizlik nedeniyle kendi insanına, kendine yatırım yapmak yerine yurt dışına yönelim. • Fon kaynakların etkin kullanımına yönelik ülke ölçeğinde plan olmaması. • Fon kaynaklarında bütçelerin kısıtlı olması. • Bursiyerlere sağlanan mali ve özlük imkanların yetersizliği. • Ürün odaklı bilim ve teknoloji yatırımlarının azlığı. • Bilim ve teknoloji ile doğrudan ilgili insan kaynaklarında uzmanlaştığı alanda sürekliliğin sağlanmaması. • Doktora çalışmasını bitiren bireylerin doktora sonrası aynı konuda, aynı kurumda uzun süre istihdamının mümkün olmayışı nedeniyle bilimsel çalışmalarda sürekliliğin sağlanamaması. • Doktora sonrası araştırma yapma durumunda kişilere sunulan mali imkanların yetersizliği nedeniyle yetişmiş beyinlerin o alanda kullanılamaması. • Teknik personel ve bakım onarım hizmetlerinin kurumlarda etkin yapılmaması ve bütçelendirilmemesi nedeniyle alt yapının etkin ve sürekli kullanımında güçlükler. • Kamu – Sanayi – Üniversite – Araştırma Merkezi vb. birlikte sürekli çalışma kültürünün yokluğu. • Endüstri tarafından sürekli ve hedef odaklı desteklenen işbirliklerinin olmayışı. • Kamu – Akademi – Endüstriyel kurumların stratejilerindeki bütünlüğün olmayışı. • Alanında uzman ve yetkin personel ve yönetimdeki liderliklerin yüksek devir oranı. • Atalet. • Kararsız ekonomi. • Yüksek enflasyon. • İnovasyon kültürü yönetiminde yaşanan gecikme. • Doğru stratejileri yapmak için gerekli verilere ulaşma ve bu verilere dayalı analiz raporlarındaki eksiklik.

**Fırsatlar**

- Diğer ülkelerde artan iş gücü maliyeti nedeniyle yatırımcıların daha ucuz üretim yapacakları yeni alternatifleri değerlendirme istekleri.
- Yatırım yapacak şirketlere sübvansiyon oranlarının artırılıp teknolojinin ülkemize gelmesinin sağlanması.
- Yatırımlarda genç, dinamik ve akıllı bilim iş gücünü içine alacak şekilde uluslararası bilim ve teknoloji ortaklıklarının ülkemizde yapılması.

Tehditler

- Diğer ülkelerin devletlerinin uzun dönem öngörü ile bilim ve teknolojiye zamanında inovatif stratejiler ve taktikler geliştiriyor olmaları.
- Diğer ülkelerde var olan bilgi ve teknolojinin hali hazırda ileri seviyede olması.
- Yabancı ülke yatırımcılarının projeksiyonlarında Avrupa Birliği ve Çin Halk Cumhuriyeti'ne öncelik veriyor olması.
- Yetiştirilmiş genç insan değerinin ülkedeki yeni teknolojik sektörün olmayışı ve/veya sağlanan mali ve özlük ile ilgili şartların yetersizliği nedeniyle yurt dışına gitmesi.

Ülke olarak gelişmek ve ilerlemek için inovasyona önem vermemiz ve lityum iyon batarya inovasyon ekosistemini oluşturup sürekliliği sağlamamız gereklidir. Bu da ancak bilinçli, doğru, cesur ve özgür zihinleri bilim ışığında kararlar almaları için teşvik eden bir eğitim sistemi ile mümkündür. Bu kitap bilime ve topluma değer veren özverili, kolektif bir aklın ürünüdür. Kitabın tüm yazarları olarak umarız okurlarımıza küçükte olsa değer katabilmiş ve Türk insanının önce kendilerine, sonra kendi insanına gösterdiği sevgi, saygı ve güvencle birlikte neleri başardığını ve neler başarabileceğini göstermişizdir.

Saygılarımızla,

OTEP Batarya Çalışma Grubu Üyeleri

19 Mayıs 2024





YAZARLARIMIZ

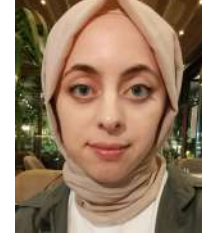
Maden Rezervleri ve Zenginleştirme Yöntemleri



Prof. Dr. M. Olgaç Kangal
kangal@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0003-4993-064X



Ar. Gör. Zeynep Üçerler
ucerler@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0003-4000-683X



Ar. Gör. Tülay Türk
turktu@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-4219-8487



Ar. Gör. Oğuzhan M. Gürkan
gurkanog@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-9154-7495



Yük. Müh. Emir Çuhadar
e.cuhadar@exitcom.com
Orcid: 0000-0001-9718-4368



Yük. Müh. Çağrı Eyüboğlu
c.eyuboglu@exitcom.com

Anot Malzemeleri



Prof. Dr. Nilgün Yavuz
knnilgun@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-7392-4103



Ar. Gör. İpek Tunç
ipektunc@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0003-2347-3604



Dr. Ömer Eroğlu
eroglu_3544@hotmail.com
Orcid: 0000-0002-3334-5123



Doğan Mert Bulut
mertbulut1@gmail.com



Yük. Müh. Selin Özen
selinozen@itu.edu.tr
Orcid: 0009-0005-6002-2556



Prof. Dr. Edip Bayram
ebayrams@akdeniz.edu.tr
Orcid: 0000-0001-9800-7451



Cem Hakan Yılmaz
cyilmaz@mutlu.com.tr
Orcid: 0000-0003-1023-2596

Katot Malzemeleri



Doç. Dr. B. Deniz Karahan
bdkarahan@itu.edu.tr
Orcid: 000-0002-7839-2222



Doç. Dr. Halil Şahan
halilsahan@kayseri.edu.tr
Orcid: 0000-0002-6815-2604



Ar. Gör. Semih Engün
semihengun@beun.edu.tr
Orcid: 0000-0003-1754-3485



Prof. Dr. Şaban Patat
patat@erciyes.edu.tr
Orcid: 0000-0001-6417-9888



Yük. Müh. Barış C. Alpay
baris.cem.alpay@uni-muenster.de
Orcid: 0000-0001-6161-3685



Çağrı K. Barbas
kultigincagri.barbas@aspilsan.com
Orcid: 0009-0005-1344-7877



Dr. M. Emre Çetintaşoğlu
emre.cetintasoglu@istanbul.edu.tr
Orcid: 0000-0001-8207-238X



Yük. Müh. H. Gençer Kül
gencer@baterials.com
Orcid: 0000-0001-9304-4421



Yük. Müh. Reyhan Solmaz
reyhansolmaz2016@gmail.com
Orcid: 0000-0002-9991-1212



Gülgün Z. Şenyurt
gulgun.senyurt@altinay.com.tr
Orcid: 0009-0006-0052-3460



Seperatör Malzemeleri



Prof. Dr. Bihter Zeytuncu
bihtzeytuncu@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-3691-7000



Öğr. Gör. Beril Tañç Kaya
tancb@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-1757-0566



Ar. Gör. Fatma Nur Uyumaz
fatmanur.uyumaz@marmara.edu.tr
Orcid: 0009-0004-6294-6819



Ar. Gör. Erhan Şükrü Cengiz
sukru.cengiz@marmara.edu.tr
Orcid: 0009-0001-8889-0196



Prof. Dr. M. Vezir Kahraman
mvezir@marmara.edu.tr
Orcid: 0000-0003-1043-6476

Elektrolitler



Doç. Dr. Alp Yürüm
alp.yurum@sabanciuniv.edu
Orcid: 0000-0002-1284-3924



Dr. Mohammed A. Zabara
mz527@cam.ac.uk
Orcid: 0000-0002-4195-6258



Dr. Begüm Yazar Kaplan
begumyazar@alumni.sabanciuniv.edu
Orcid: 0000-0002-1691-0645



Dr. K. Burak Dermenci
Kamil.Burak.Dermenci@vub.be
Orcid: 0000-0002-9439-6098



Prof. Dr. A. Levent Demirel
ldemirel@ku.edu.tr
Orcid: 0000-0002-1809-1575



Prof. Dr. Selmiye Alkan Gürsel
selmiye.gursel@sabanciuniv.edu
Orcid: 0000-0002-7966-6352

Polimerik Bağlayıcılar



Prof. Dr. Ömer Suat Taşkın
omert@istanbul.edu.tr
Orcid: 0000-0002-6284-1337



Dr. M. Emre Çetintaşoğlu
emre.cetintasoglu@istanbul.edu.tr
Orcid: 0000-0001-8207-238X



Doç. Dr. Emre Güzel
eguzel@subu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-1142-3936



Doç. Dr. H. Aylin Karahan Toprakçı
aylin.toprakci@yalova.edu.tr
Orcid: 0000-0001-7078-9690



Doç. Dr. Ozan Toprakçı
ozan.toprakci@yalova.edu.tr
Orcid: 0000-0001-7944-4269

Hücreden Pakete: Batarya ve Alt Bileşenleri



Yük. Müh. H. Gençer Kül
gencer@baterials.com
Orcid: 0000-0001-9304-4421



Çağrı K. Barbas
kultigincagri.barbas@aspilsan.com
Orcid: 0009-0005-1344-7877



Dr. Yasin Cengiz Çelik
yasin.celik@aspilsan.com
Orcid: 0009-0000-9941-4569



Yük. Müh. Feyza Zengin
feyza.suleymanoglu@marun.edu.tr
Orcid: 0000-0003-1804-5963



Dr. Arda Kocaman
arda@metcom.co
Orcid: 0000-0003-2702-6342



Dr. Ahmet Altınay
ahmet.altinay@corecelltech.com
Orchid: 0000-0002-4623-8028



Dr. Öğr. Üyesi M. Nurullah Ateş
mehmet.ates@bogazici.edu.tr
Orcid: 0000-0002-3557-6769



Nedim Uğur Bakoğlu
nedimugur.bakoglu@aspilsan.com
Orcid:0009-0005-7139-2261



K. Can Bayar
can.bayar@everinovasyon.com.tr

Hücreden Pakete: Batarya Üretim Teknolojileri



Prof. Dr. Serdar Altın
serdar.altin@inonu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-4590-907X



Fatih Şahin
fatih.sahin@altinay.com



K. Can Bayar
can.bayar@everinovasyon.com.tr

Batarya Güvenliği, Test ve Karakterizasyon



Doç. Dr. Davut Uzun
davutuzun65@gmail.com
Orcid: 0000-0001-7844-0418



Prof. Dr. Emre Biçer
emre.bicer@sivas.edu.tr
Orcid: 0000-0002-9871-4102

Batarya Kodlama İzlenebilirlik ve Geri Dönüşüm



Prof. Dr. Gökhan Orhan
gorhan@iuc.edu.tr
Orcid: 0000-0002-1684-5548



Ar. Gör. Elif Gütoğlu
elifguloglu@iuc.edu.tr
Orcid: 0000-0001-7371-6075



Doç. Dr. Mehmet Şeref Sönmez
ssonmez@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0001-7766-1198



Prof. Dr. Fırat Burat
buratf@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0001-7051-0063



Dr. Öğr. Üyesi Mert Zorağa
mzoraga@iuc.edu.tr
Orcid: 0000-0002-7723-728X



Dr. Öğr. Üyesi Gökçe Hapçı Ağaoglu
gokceh@iuc.edu.tr
Orcid: :0000-0002-5966-0949



Murat Ilgar
m.ilgar@exitcom.com



Rümeyza Ercan
rumeysa.ercan@tap.org.tr

Bataryaların Yaşam Döngüsü Değerlendirilmesi



Prof. Dr. Osman Atilla Arıkan
arikan@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-0716-1865



Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Güven
guvenhu@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0001-6754-0106



Meral Turan Akırmak
meral@osd.org.tr



Prof. Dr. Müfide Banar
mbanar@eskisehir.edu.tr
Orcid: 0000-0003-2795-6208



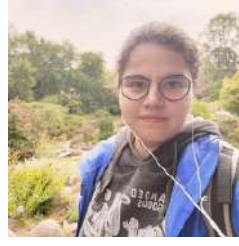
Prof. Dr. Fehmi Görkem Üçtuğ
gorkem.uctug@izmirkonomi.edu.tr
Orcid: 0000-0002-7231-5154



Doç. Dr. Burçin Atılğan Türkmen
burcin.atilganturkmen@bilecik.edu.tr
Orcid: 0000-0003-3220-3817



Ar. Gör. Serra Selin Övez
ovez17@itu.edu.tr
Orcid: 0009-0007-1256-323X



Öğr. Gör. Dr. Kadriye Elif Maçın
macin@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-5989-7954



Ar. Gör. Kadir Özçelik
ozcelikk@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0001-6863-1261



Orhan Atacan
orhan.atacan@metsims.com

Sektörel Bakış: Elektrikli Araç Dünyası



Dr. Sibel Eserdağ
seserdag@incigsyuasa.com



Dr. İ. Kağan Yıldırım
Kagan.Yildirim@tofas.com.tr



Hürkan Ölmez
hurkan.olmez@sabanciuniv.edu
Orcid: 0000-0002-6718-7784



Gökmen Umdu
gumdu@incigsyuasa.com



Salim Mutlucan
smutlucan@incigsyuasa.com



İlkin Bulur
bulur@incigsyuasa.com



Doç. Dr. Gamze Gediz İliş
ggediz@gtu.edu.tr
Orcid: 0000-0001-8366-5427

Sektörel Bakış: Şarj İstasyonları ve Şebeke Yönetimi



Doç. Dr. Seda Yanık
sedayanik@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0001-6260-7981



Ar. Gör. Osman Ögünçlü
ogunclu20@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-0564-7757



Y. Müh. Hasan Cem Çitak
cem.citak@e-autotrek.com



Dr. Öğr. Üyesi A. Elvan Bayraktaroğlu
bayraktaroglu@itu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-9948-3414



Okan Hüsrevoğlu
okan.husrevoglu@elektronsarj.com.tr

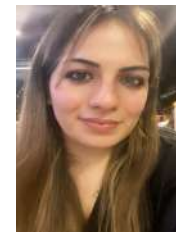
Geleceğe Bakış:Lityum İyon Sonrası



Prof. Dr. Gülfeza Kardaş
gulfeza@cu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-7871-6303



Leyla Basat
uranbeyleyla@gmail.com
Orcid: 0000-0002-3736-6132



Seyran Altun
seyrangunduz@gmail.com
Orcid: 0000-0002-9631-3188



Mehbare Doğrusöz
mdogruso@gtu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-3064-8081



Prof. Dr. Rezan Demir Çakan
demir-cakan@gtu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-8667-6567



Doç. Dr. Murat Farsak
muratfarsak@osmaniye.edu.tr
Orcid: 0000-0001-7540-7970



Doç. Dr. Muhsin Mazman
muhsin.mazman@tdinamik.com
Orcid: 0000-0002-8667-6567



Prof. Dr. Taner Akbay
taner.akbay@yeditepe.edu.tr
Orcid: 0000-0002-7115-9970



Dr. Öğr. Üyesi Çiğdem Toparlı
ctoparli@metu.edu.tr
Orcid: 0000-0002-4374-4910

Not: İlgili bölümlerin başkanlarının fotoğrafları grup başında yer almış sonrasında bölümdeki yazar sıralamasına göre fotoğraflar dizilmiştir.

OTEP Batarya Çalışma Grubu
Elektrikli Araçlarda Lityum İyon Batarya Çalıştayı
16 Ocak 2023









Kısaltmalar Listesi

A

Å	Angström ($1\text{Å} = 10^{-8}\text{ cm}$)
AB	Avrupa Birliği
AC	Alternatif akım
ADR	Uluslararası Tehlikeli Malların Taşınması Yönetmeliği
AFIR	Alternatif Yakıt Altyapısı Yönetmeliği
ALD	Atomik Katman Biriktirme (atomic layer deposition)
AlF ₃	Alüminyum florür
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
ALOOH	Böhmit (alüminyum oksihidroksit)
AMC	Atıl metil karbonat
AP	Asidifikasyon, asitleşme potansiyeli
APAK	Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü
ARRA	Amerikan Kurtarma ve Yeniden Yatırım Yasası (American Recovery and Reinvestment Act)
Ar-Ge	Araştırma - Geliştirme

B

BEA	Bataryalı Elektrikli Araç (Battery Electric Vehicle, BEV)
BM	Birleşmiş Milletler (United Nation, UN)
B ₂ O ₃	Bor oksit
BP	Bifenil
BS	Butil sulton
BYD	Çinli Otomotiv Firması (Build Your Dream)
BYS	Batarya Yönetim Sistemi (Battery Management System, BMS)

C

CAGR	Yıllık bileşik büyüme oranı, YBBO (compound annual growth rate)
CATL	Contemporary Ampere Technology Co., Ltd
CALB	China Aviation Lithium Battery. Ltd
CAN	Denetleyici Alan Ağı
CapEx	Sermaye harcamaları (capital expenditure)
CCS	Birleşik Şarj Sistemi (Combo Charging System)
CeO ₂	Seryum oksit
CID	Akım kesici cihazı (current interrupt device)
CLF	Akım limitleme sigortası (current limiting fuses)
CMC	Karboksi-metil selüloz
CNT	Karbon nanotüpler
CSS	Kompakt ikincil trafo merkezi (Compact Secondary Substation)
CO ₂	Karbondioksit

D

DAO	Dağıtım ağı operatörleri
DC	Doğru akım
DCB	Dikloro-benzen
DEATMS	N,N-dietilaminotrimetilsilan
DEC	Dietil karbonat
DMAc	Dimetil asetat
DMC	Dimetil karbonat
DMSO	Dimetil sülfoksit
DOE	Amerika Enerji Bakanlığı
DVA	Divinil adipat

E

EA	Elektrikli araç (Electric Vehicle, EV)
EAŞİ	Elektrikli araç şarj istasyonları
EAŞİS	Elektrikli araç şarj istasyonu sahipleri
EC	Etilen karbonat
ECU	Araç motor kontrol ünitesi
EDS	Enerji depolama sistemleri
Eİ	Enerji ihtiyacı
EIPS	Buharlaşmayla İndüklenen Faz Ayrımı (Evaporation Induced Phase Separation)
EMC	Metil etil karbonat
EMC	Elektromanyetik uyumluluk
EMI	Elektromanyetik etkileşim
EMSP/EMP	e-Hareketlilik Hizmet Sağlayıcıları
EP	Ötrofikasyon potansiyeli (eutrophication potential)
EPDK	Enerji Piyasası ve Denetleme Kurumu
ESG	Çevresel, Sosyal ve Yönetişim
EVS	Envanter veri seti

F

FEC	Floroetilen karbonat
FDP	Fosil yakıt azaltma potansiyeli (fossil depletion potential)
FHEA	Fişli Hibrid Elektrikli Araç (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)

G

GEKAP	Geri Kazanım Katılım Payına İlişkin Yönetmelik
G2V	Şebekeden Araca
GW	Gigavat, (1GW = 1.000.000 kW)
GWP	Küresel ısınma potansiyeli (global warming potential)



H

HAN	Güney Kore İleri Ulusal Program (Highly Advanced National Program)
HDH	Hava değişim hızı
HE-NMC	Yüksek Enerjili Nikel Mangan Kobalt (High Energy Nickel Manganese Cobalt)
HF	Hidrojen florür
HG	Hücreden Gövdeye Tasarım (Cell-to-body, CTB)
HIL	Döngüdeki Donanım (Hardware-in-the-loop)
H ₂ O	Su
HP	Hücreden Pakete Tasarım (Cell-to-pack, CTP)
HOMO	En yüksek dolu moleküler orbital (Highest Occupied Molecular Orbital)
HŞ	Hücreden Şasiye Tasarım (Cell-to-chassis, CTC)
HTP	İnsana etki edebilecek toksisite potansiyeli (human toxicity potential)

I

IC	Entegre devre
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IEC	Uluslararası Elektro-teknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)

İ

İYM	İçten yanmalı motor
-----	---------------------

J

JARI	Japon Otomotiv Araştırma Enstitüsü
JEVA	Japon Elektrikli Araç Birliği
JPE	Jel Polimer Elektrolitler

K

KET	Kümülatif enerji talebi
KHE	Katı Hal Elektrolitler
KIB	Potasyum iyon
KID	Küresel ısınma değeri
KIP	Küresel ısınma potansiyeli
KKD	Kişisel Korunma Donanımları
KPE	Katı Polimer Elektrolit
KPI	Temel performans göstergesi (key performance indicator)
KVA	Görünür güç birimi (kilo volt amper)
KW	Aktif güç birimi (kilo vat)

L

LCO	LiCoO ₂ katot
LFP	LiFePO ₄ katot
Li	Lityum
Li ⁺	Lityum iyonu
LiAsF ₆	Lityum hekzafloraarsenat
LiB	Lityum iyon batarya
LiBF ₄	Lityum borofluorür
LiBOB	Lityum bis(oksالاتo) borat
LiC ₂ H ₃ O ₂	Lityum asetat
LiClO ₄	Lityum perklorat
Li ₂ CO ₃	Lityum karbonat
LiCoO ₂	Lityum kobalt okdist
LiFePO ₄	Lityum demir fosfat
LiFSI	Lityum Bis(florosülfonil)imid

LMO	LiMnO ₂ katot
LiMnO ₂	Lityum mangan oksit
LiO ₂	Lityum oksit
Li ₂ O ₂	Lityum peroksit
LiOH	Lityum hidroksit
LiPF ₆	Lityum hegzaflorofosfat
LIPON	Lityum fosfor oksinitrür
LiPS	Lityum polisülfidler
LiSICON	Lityum Süper İyonik İletken
LITFSI	Lityum bis(triflorometansülfonil)imid
Li-S	Lityum-sülfür
Li-SS	Katı hal lityum pil
Li-O ₂	Lityum hava/oksijen
LLZO	Lityum lantanum zirkonyum oksit (Li ₇ La ₃ Zr ₂ O ₁₂)
LOI	Oksijen indeksi
LTO	Lityum titanat (Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)
LUMO	En düşük dolu moleküler orbital (Lowest Occupied Molecular Orbital)
LV	Alçak gerilim (Low Voltage)

M

MATEPP	di(2-metakriloyltrioksi etil)fenil fosfonat
MD	Machine Direction, Makine Yönü
MEG	Mono etilen glikol
METI	Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı
MgO	Magnezyum oksit
MITI	Japonya Ticaret ve Sanayi Bakanlığı
MJ	Megajul (1MJ = 0,278 kW·sa)
MMA	Metil metakrilat
MP	Modülden Pakete (Module to Pack, MTP)
MPa	Megapaskal (1MPa = 1Newton/mm ²)
MOE	Güney Kore Çevre Bakanlığı (Ministry of Environment)
MOLIT	Güney Kore Toprak, Alt yapı ve Ulaşım Bakanlığı (Ministry of Land, Infrastructure and
MOTIE	Güney Kore Sanayi, Ticaret ve Enerji Bakanlığı (Ministry of Trade, Industry and Energy)
MŞ	Modülden Şasiye Tasarım (Module-to-chassis, MTC)
MT	m-terphenyl
MV	Orta gerilim (Medium Voltage)
MW	Megavat, (1MW = 1.000 kW)

N

NaF	Sodyum florür
Na-O ₂	Sodyum hava/oksijen
Na-S	Sodyum sülfür
NCA	Li(Ni _x Co _y Al _z)O ₂ katot
NDC	Ulusal Katkı Beyanları (National Determined Contribution)
NDRC	Ulusal Kalkınma ve Reform Komisyonu (The National Development and Reform Commission)
NEDO	Japonya Yeni Enerji ve Endüstriyel Teknoloji Geliştirme Organizasyonu
NIB/SIB	Sodyum iyon pil
NiCd	Nikel Kadmiyum
NiMH	Nikel Metal Hidrit
NiO	Nikel oksit
NMC	Li(Ni _x Mn _y Co _z)O ₂ katot
NMP	N-metil-2-pirolidon



O

O ₂	Oksijen
OCPI	Açık Şarj Noktası Arayüzü
OCV	Açık Devre Voltajı (Open Circuit Voltage)
ODP	Ozon tabakası incelme potansiyeli (Ozone Layer Depletion Potential - ODP)
OEE	Genel Ekipman Verimliliği (Overall Equipment Effectiveness)
OEF	Kuruluşun Çevresel Ayak İzi (Organisation Environmental Footprint)
OEM	Orijinal Ekipman Üreticisi
OER	Oksijen çıkış reaksiyonu
OGPC	Güney Kore Devlet Politika Koordinasyon Ofisi (The Office of Government Policy Coordination)
OKKE	Sekizyüzlü Konum Kararlılık Enerjisi
ORR	Oksijen indirgenme reaksiyonu
OSD	Aşırı şarj güvenlik cihazı (Overcharge Safety Device)
OSE	Organik Sıvı Elektrolit
OT	o-terphenyl

P

PAN	Poliakrilonitril
PAni	Polianilin
PC	Polikarbonat
PC	Polimer-seramik
PDMS	Polidimetilsiloksan
PE	Poliyeten
PEDOT	Poli(3,4-etilendioksitiyofen)
PEEK	Polieter eter keton
PEF	Ürünün Çevresel Ayak İzi (Product Environmental Footprint)
PEG	Poli(etilen glikol)
PEGBCDMA	Poliyeten glikol-bis-karbamat dimetakrilat
PEI	Polieterimittler
PEO	Poliyeten oksit
PEO-KFSI	Poliyetenoksit-Potasyum Bis(florosülfonil) imid
PES	Prop-1-en-1,3-sulton
PET	Poliyeten tereftalat
PFA	Polifluoroalkil
PFB	Perflorobutil
PFH	Perfloroheksil
PFO	Perflorooktil
PFO-EC	Perflorooktil etilen karbonat
PI	Polimid
PMA	Polimetil akrilat
PMIA	Polimetilen izoftalamid
PMMA	Polimetil metakrilat
P ₂ O ₅	Fosfor pentoksit
POCP	Fotokimyasal ozon oluşumu potansiyeli (photochemical ozone creation potential)
PP	Polipropilen
P2P	Eşler arası
PPFOMB	poli(9,9-dioktifloren-ko-metilbenzoik asit)
PPy	Polipirol
PS	Propan sulton
PTC	Pozitif sıcaklık katsayısı (Positive Temperature Coefficient)
PTFE	Politetrafloroetilen
PTSI	p-toluenesülfonil isosiyanat
PU	Poliüretan

PV	Güneş fotovoltaik
PVA	Polivinil alkol
PVDF	Poliviniliden-florür
PVDF-HFP	Polivinilidenflorit-Hekza florpropilen
PyS	Propilen sülfid

R

RD	Kaynak tüketimi (resource depletion)
RF	Radyo frekansı
ROCO ₂ Li	Lityum alkil karbonatlar
(ROCO ₂ Li) ₂	Lityum alkil karbonatlar

S

SAE	Amerikan Otomotiv Mühendisleri Derneği
SBR	Sitren bütadien kauçuğu
SEI	Katı elektrolit arayüzeyi (solid electrolyte interphase)
SeO ₂	Selenyum oksit
SiNT	Silisyum nanotüpler
SiNW	Silisyum nanoteller
SiO ₂	Silisyum oksit
SiS ₂	Silisyum di sulfür
SKA	Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları
SLI	Marş, yıldırım ve ateşleme bataryaları (Starting, Light, and Ignition)
SOC	Pilin şarj durumu (state of charge)
SOH	Pilin sağlık durumu (state of health)

Ş

Şİ	Şarj istasyonları
ŞNO	Şarj Noktası Operatörleri

T

TAP	Karasal asitleme potansiyeli (terrestrial acidification potential)
TFM	Triflorometil
TD	Ters Yönde (Transverse Direction)
TFMA	Trifloroetil metakrilat
TiO ₂	Titanyum dioksit
TIPS	Isıl Yolla İndüklenen Faz Ayrımı (Thermally Induced Phase Separation)
THS	Teknoloji Hazırlık Seviyesi
TOGG	Türkiye'nin Otomobili Girişim Gurubu

U

UL	Underwriter Laboratories
USABC	United States Advanced Battery Consortium
US DoE	Amerikan Enerji Bakanlığı
USGS	Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırma Kurumu (United States Geological Survey)
USP	Benzersiz Satış Noktası (Unique selling point)

V

VA	Vinil asetat
VC	Vinilen karbonat
VDA	Alman Otomotiv Endüstrisi Birliği
VDF	Vinilden florürür
VEC	Vinil etilen karbonat



VES	Vinil etilen sülfid
VIPS	Buhar Kaynaklı Faz Ayrımı (Vapor Induced Phase Separation)
V2G	Araçtan Şebekeye (Vehicle to Grid)
V2V	Araçtan Araca (Vehicle to Vehicle)

Y

YBBO	Yıllık bileşik büyüme oranı
YDD	Yaşam Döngüsü Değerlendirme (Life Cycle Assessment, LCA)
YE	Yüksek Enerji (High Energy, HE)
YEA	Yeni Enerji Araç (New Energy Vehicle, NEV)
YP	Yüksek Güç (High Power, HP)

Z

ZIB	Çinko iyon
ZrO ₂	Zirkonyum dioksit

W

WFOE	Çin Yabancı Mülkiyetli işletmeler
WLTP	Uluslararası Uyumlu Hale Getirilmiş Hafif Araç Test Prosedürü



OTOMOTİV TEKNOLOJİ PLATFORMU

DESTEKLEYEN KURULUŞLAR



OTOMOTİV SANAYİİ DERNEĞİ
AUTOMOTIVE MANUFACTURERS ASSOCIATION





Otomotiv Teknoloji Platformu (OTEP)

Altunizade, Atilla Sok. No: 10, Üsküdar
34676 İstanbul, TÜRKİYE • (216) 501 53 66
www.otep.org.tr • otep@otep.org.tr

