



**LİTYUM İYON PİLLERİN TARİHTEN BUGÜNE
GELİŞİMİ VE SON TEKNOLOJİDE GELİNER
NOKTA**

Hüseyin PEHLİVAN

Danışman: Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Ana Bilim Dalı

2024

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KATIHAL FİZİĞİ ANA BİLİM DALI

**LİTYUM İYON PİLLERİN TARİHTEN BUGÜNE GELİŞİMİ VE SON
TEKNOLOJİDE GELİNE NOKTA**

(Development of Lithium-ion Batteries From the History of Batteries to the Present and the
Latest Technology Statement)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin PEHLİVAN

Danışman: Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM

Erzurum
Aralık, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Hüseyin Pehlivan tarafından hazırlanan “Lityum İyon Pillerin Tarihten Bugüne Gelişimi ve Son Teknolojide Geline Nokta” başlıklı çalışması 26/12/ 2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Fizik Ana Bilim Dalı, Katıhal Fiziği Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Songül DUMAN Erzurum Teknik Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM Atatürk Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Erdinç ÖZ Atatürk Üniversitesi	Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM danışmanlığında sunulan “Lityum İyon Pillerin Tarihten Bugüne Gelişimi ve Son Teknolojide Geline Nöktä” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	27	30
Kuramsal Temeller	23	30
Materyal ve Metot	4	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	25	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5’den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Hüseyin PEHLİVAN	Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM
26.12.2024	26.12.2024
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu tezimin hazırlanmasında desteklerini, yardımlarını ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Değerli katkılarıyla yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Erdiñ ÖZ ve Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI'ya teşekkür ederim. Fizik Bölümü öğretim üyeleri ve aileme destekleri için çok teşekkür ederim.

Hüseyin PEHLİVAN



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LİTYUM İYON PİLLERİN TARİHTEN BUGÜNE GELİŞİMİ VE SON TEKNOLOJİDE GELİNER NOKTA

Hüseyin PEHLİVAN

Danışman: Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM

Amaç: Bu çalışmada, lityum-iyon pillerin tarihsel gelişimi, malzeme bileşenlerinin performansları ve teknolojik yenilikleri ele alınmıştır. Çalışmanın amacı, lityum-iyon pil teknolojisinin mevcut durumunu değerlendirmek ve gelecekteki potansiyel gelişim alanlarını ortaya koymaktır.

Yöntem: Araştırma, literatür tarama modeli ile gerçekleştirilmiş olup, ulusal ve uluslararası akademik kaynaklar sistematik bir şekilde incelenmiştir. Veri toplama sürecinde PubMed, Scopus, Web of Science ve Google Scholar gibi veri tabanlarından yararlanılmıştır.

Bulgular: Çalışmanın temel bulguları, lityum-kobalt oksit (LiCoO_2), nikel-manganez-kobalt (NMC) ve lityum-demir fosfat (LFP) gibi katot malzemelerinin enerji yoğunluğu ve çevrim ömrü açısından farklı performans sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, silikon bazlı anotların enerji yoğunluğunu artırma potansiyeline sahip olduğu ancak mekanik kararlılık sorunlarının çözülmesi gerektiği belirlenmiştir. Elektrolit teknolojilerinde katı hâl elektrolitler, güvenliği artırırken termal kaçak riskini azaltmaktadır. Son olarak, geri dönüşüm teknolojilerinin, lityum-iyon pillerin sürdürülebilirliği için kritik bir öneme sahip olduğu, ancak ekonomik ve teknik sınırlamaların bulunduğu görülmüştür.

Sonuç: Bulgular, lityum-iyon pillerin enerji depolama teknolojilerinde lider konumda olduğunu ve gelecekte daha sürdürülebilir bir yapıya kavuşması için inovasyonların devam etmesi gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: lityum-iyon piller, enerji depolama, katot malzemeleri, anot malzemeleri, elektrolit yenilikleri, geri dönüşüm.

Aralık 2024, 43 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

DEVELOPMENT OF LITHIUM ION BATTERIES FROM THE HISTORY OF BATTERIES TO THE PRESENT AND THE LATEST TECHNOLOGY STATEMENT

Hüseyin PEHLİVAN

Supervisor: Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM

Purpose: This study addresses the historical development, material performance, and technological advancements of lithium-ion batteries. The aim of the research is to evaluate the current state of lithium-ion battery technology and identify potential areas for future development.

Method: The study was conducted using a literature review model, systematically examining national and international academic resources. Data collection utilized databases such as PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar.

Findings: The main findings reveal that cathode materials like lithium-cobalt oxide (LiCoO_2), nickel-manganese-cobalt (NMC), and lithium-iron phosphate (LFP) exhibit varying performance in terms of energy density and cycle life. Furthermore, silicon-based anodes show significant potential for increasing energy density, though mechanical stability issues need to be addressed. In electrolyte technologies, solid-state electrolytes enhance safety and reduce the risk of thermal runaway. Finally, recycling technologies are critical for the sustainability of lithium-ion batteries, but economic and technical limitations remain.

Results: The findings confirm that lithium-ion batteries lead energy storage technologies and emphasize the necessity of continued innovation to achieve a more sustainable structure in the future.

Keywords: lithium-ion batteries, energy storage, cathode materials, anode materials, electrolyte innovations, recycling.

December 2024, 43 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Pil	4
Pilin tarihsel gelişimi	5
Şarj edilebilir pillerin keşfi.....	8
Pil Teknolojisi	9
Pil Çeşitleri.....	9
Birincil piller	9
İkincil piller.....	10
Pillerin Çalışma Prensipleri.....	15
Pillerin Teknik Özellikleri ile İlgili Kavramlar.....	16
Nominal gerilim (V).....	16
Özgül enerji.....	16
Özgül güç	17
Hacimsel enerji yoğunluğu	17
Deşarj derinliği.....	17
Çevrim ömrü	18
Kapasite.....	18
MATERYAL VE METOT	19
Araştırma Türü	19
Veri Toplama Süreci	19
Veri Analiz Süreci.....	19
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	20

Anot ve Katot Malzemelerinin Performansı	20
Katot malzemeleri	20
Anot malzemeleri	21
Katot ve anot malzemelerinin geleceği	21
Elektrolitlerin Yenilikçi Kullanımı	21
Geleneksel sıvı elektrolitler	21
Katı hâl elektrolitler	22
Su Bazlı (Aqueous) elektrolitler	22
Polimer elektrolitler	22
İyonik sıvılar	22
Performans Karşılaştırmaları ve Uygulamalar	23
Performans karşılaştırmaları	23
Uygulama alanları	24
SONUÇ	25
KAYNAKLAR	27
ÖZGEÇMİŞ	31

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Bazı Birincil Pillere Ait Özellikler	10
Tablo 2. Bazı İkincil Pillere Ait Özellikler	10
Tablo 3. Tekrar Şarj Edilebilir Lityum İyon Pillerin Avantaj ve Dezavantajları	11
Tablo 4. Katot Aktif Maddeleri ve Özellikleri	12
Tablo 5. Lityum-İyon Pil Elektrolitlerinde Kullanılan Tuzlar	13
Tablo 6. Farklı Malzemelerin Performans Karşılaştırması	24



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Bağdat Pili.....	5
Şekil 2. Voltanın icadı pil ve elektroskop (b) Voltanın pilin icadını ilan ederken yayımladığı mektup taslağı	6
Şekil 3. Volta Pili	7
Şekil 4. Daniell Pili	7
Şekil 5. Edison Pili	8
Şekil 6. Şarj ve boşaltma sırasında lityum iyon hücresinin diyagramı	15
Şekil 7. Lityum-iyon kristal yapısı	16
Şekil 8. Doldurulabilir pillerin kütle ve hacimsel enerji yoğunlukları	17

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

DEC	: Dietil Karbonat
DMC	: Dimetil Karbonat
DOD	: Deşarj Derinliği (Depth of Discharge)
EC	: Etilen Karbonat
LFP	: Lityum-Demir Fosfat (Lithium Iron Phosphate)
LiCoO₂	: Lityum-Kobalt Oksit
Li-ion	: Lityum-iyon
LiPF₆	: Lityum Heksaflorofosfat
Mpa	: Megapaskal, basınç birimi
NMC	: Nikel-Manganez-Kobalt (Nickel Manganese Cobalt)
SEI	: Katı Elektrolit Ara Yüzeyi (Solid Electrolyte Interface)
Wh/kg	: Birim kütle başına enerji yoğunluğu (Watt-saat/kilogram)
Wh/L	: Birim hacim başına enerji yoğunluğu (Watt-saat/litre)

GİRİŞ

Günümüzde dünya enerji talebinin büyük bir kısmı kömür, doğal gaz ve petrol gibi fosil yakıtlardan karşılanmaktadır (IEA, 2020). Bu kaynakların kullanımı, enerji üretim sürecinde havaya, suya ve doğal çevreye zarar veren karbon emisyonlarını artırarak küresel iklim değişikliği sorunlarını daha da kötüleştirmektedir.

18. yüzyılın sonundan bu yana fosil yakıtlar (örneğin kömür, petrol ve doğal gaz) enerji verimliliği için kullanılmaktadır. Sonuç olarak, karbondioksit emisyonları son iki yüzyılda önemli ölçüde artmıştır. Bu durum, karbondioksit emisyonlarının sera gazları nedeniyle küresel iklim değişikliğine neden olduğuna dair ciddi endişelere yol açmaktadır: Karbondioksit emisyonları 1751 ve 1950 yılları arasında hızlanarak artmıştır (Andres *et al* 1999). Ayrıca, fosil yakıtlardan kaynaklanan kümülatif karbondioksit emisyonları 1751 ve 1995 yılları arasında 250×10^9 ton olmuştur (Andres, 1999). Bu bağlamda, insanlar alternatif yeşil enerji sistemleri aramaktadır. Yenilenebilir enerji sistemleri, sürdürülebilir olmalarının yanı sıra temiz enerji sağlamaları nedeniyle de dikkat çekmektedir. Ancak, enerji üretimindeki süreksizlik (mevsimsel/haftalık zaman dalgalanmaları nedeniyle) nihai kullanımının önündeki en büyük kısıttır. Bu nedenle, yenilenebilir enerjinin etkin kullanımı genellikle karmaşık mühendislik tasarımı, planlama ve kontrol gerektirir. Burada, bu tür temiz enerjinin verimli bir şekilde depolanması büyük bir zorluktur (Turner, 1999).

Endüstriyel ve teknolojik yenilikler, teknolojik gelişmeler, dünya nüfusunun artması ve konfor talebi ile birleşerek enerji tüketiminde hızlı bir artışa yol açmıştır. Enerji üretimi ve tüketimi arasındaki fark her geçen gün artarken, enerji talebindeki hızlı artışın karşılanabilmesi, alternatif enerji kaynaklarından kesintisiz yararlanılabilmesi, enerji sisteminin sürdürülebilir ve uzun vadeli kullanılabilmesi ve her şeyden önemlisi enerji verimliliğinin artırılabilmesi için enerjinin doğru şekilde depolanması gerekmektedir. Özellikle giderek daha popüler hale gelmesi beklenen elektrikli araçlar, akıllı telefonlar, kameralar, tabletler, bilgisayarlar, insansız hava araçları ve IoT cihazları hafif, kolay erişilebilir, ucuz, güvenilir ve yüksek enerji potansiyeline sahip enerji kaynaklarına ihtiyaç duyduğundan enerji depolama giderek daha önemli hale gelmektedir.

Teknolojik gelişmeler ve artan maliyetler temiz enerji kaynaklarına olan ihtiyacı artırmıştır. Ters elektroliz olarak bilinen bir dizi kimyasal işlem, yakıt hücreleri gibi enerji dönüşüm araçlarının değerini artırmaktadır (NREL, 2020). Yakıt pilleri, gelecekteki enerji

ihtiyaçlarını karşılamak için temiz ve güvenli bir seçenek olarak kabul edilmektedir. Yakıt hücreleri, yakıt hücresindeki oksijen ile termokimyasal bir reaksiyon sonucunda elektrik enerjisi üretir. Yakıt olarak kullanılan gelen yakıt, doğrudan doğal kaynaklardan değil, çeşitli enerji kaynaklarından gelmektedir.

Yakıt hücreleri doğrudan enerji santrallerinden enerji sağlayabildiği gibi alkol (etanol veya metanol), fosil yakıtlar (petrol, kömür, doğal gaz), amonyak ve bor hidrür gibi hidrokarbon dispersiyonları ve biyokütle gibi alternatif yakıtlardan da enerji sağlanabilmektedir. Özellikle sodyum borohidrit, yakıt hücrelerinde kullanılmak üzere bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmekte ve borohidrit yakıt hücrelerinde doğrudan sıvı formda kullanılmaktadır. Böylece yakıt hücrelerinde olduğu kadar depolama yakıtı olarak da kullanılabilecek bir enerji kaynağı elde edilebilmektedir.

Türkiye'de yılda yaklaşık 9.000 ton (200-250 milyon adet) pil piyasaya sürülmekte ve bunların çoğu ithal edilmektedir. 2004 yılında yaklaşık 500 milyon pilin ithal edildiği bilinmektedir. İthal edilen pillerin çoğu in'den gelmektedir. Her yıl piyasaya sürülen 9,000 ton pilin sadece 325 tonu (%3.5) atılmakta ya da geri dönüştürülmektedir. Türkiye'de toplanan pilleri geri dönüştürecek herhangi bir tesis bulunmamaktadır. şarj edilebilir piller, toplanan pillerin %15'ini oluşturmakta ve geri dönüşüm için Avrupa'ya gönderilmektedir. Geri kalan %85'i ise pil üreticileri tarafından kurulan kuruluşlar tarafından düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmektedir (Güler, 2012).

Piller kimyasal enerjiyi depolayan ve elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Piller bir veya daha fazla elektrokimyasal hücre, yakıt hücresi, akış hücresi ve diğer elektrokimyasal cihazlardan oluşur.

İnsan yapımı en eski pil Bağdat pilidir. M 250 ile MS 640 yılları arasında üretildiği tahmin edilmektedir. Pillerin gelişimi 1800 yılında İtalyan fizikçi Alessandro Volta tarafından geliştirilen Volta pili ile başlamıştır. Küresel pil endüstrisi (2005 yaklaşık rakamları) 48 milyar ABD doları ciroya sahiptir. Piller 250 yıl önce geliştirildiklerinden bu yana en pahalı enerji kaynaklarından biri olmuştur. Piller pahalı oldukları gibi bazen cıva, kurşun ve nikel gibi zararlı kimyasallar da içerirler. Sonuç olarak, kimyasallar bugün insan metabolizmasını etkilemekte ve ölümlere neden olmaktadır. Günümüzde, kullanılmış pillerin içerdiği zehirli maddeleri geri kazanmak için çoğu bölgede geri dönüşüm merkezleri kurulmuştur. Çevreye atılan atık piller sadece evre kirliliğine neden olmakla kalmıyor, aynı zamanda içerdikleri kimyasallar nedeniyle güneş ısısının etkisiyle kaçınılmaz patlama olasılığı nedeniyle insan sağlığı için de risk oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı, pillerin tarihten bugüne gelişimi ve son teknolojiye

gelen nokta kapsamında incelemek ve bu doğrultuda konuyla ilgili yapılacak olan çalışmalara katkı sunmaktır.

İnsanlık tarihi boyunca enerji en önemli ihtiyaçlardan biri olmuştur. Geçtiğimiz yüzyılda enerji elde etme yöntemleri gezegenimizi hızla kirletmiş ve geri dönüştürülemez hale getirmiştir. Bu nedenle insanoğlu yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiş ve enerji depolama sistemleri giderek daha önemli hale gelmiştir. Taşınabilir cihazların sayısındaki hızlı artış ve elektrikli araçların varlığı enerji depolama sistemlerinin önemini daha da artırmıştır. Günümüzde Lityum-iyon pil sistemleri mobil cihazlarda ve elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda pratik uygulamalar için sodyum pil araştırmaları da tüm hızıyla devam etmektedir. Sodyumun, lityum ile olan elektrokimyasal benzerlikleri ve avantajları onu gelecek için son derece önemli bir pil malzemesi haline getirmektedir. Günlük alkalin iyon piller sıvı elektrolit içerir. Son yıllarda, sıvı elektrolit piller son derece güvenilir hale gelmiştir, ancak hala önemli güvenlik sorunları vardır. Özellikle elektrikli araçlarda ve yenilenebilir enerjide kullanılan büyük pil sistemleri bu güvenlik sorunlarından muzdariptir. Sonuç olarak gerek sanayide gerek evlerde kısaca hayatın her alanında ihtiyaç duyulan piller insanlık için büyük öneme sahiptir. Bu çalışmanın yapılma gerekçesi, pillerin yaşam döngüsünde önemini ortaya koymak ve teknolojiye olan katkısını ana hatlarıyla ele alıp incelenmesi hedeflenmektedir.

KURAMSAL TEMELLER

Pil

Pil olarak da bilinen elektrokimyasal güç kaynağı, kimyasal bir reaksiyon sonucu açığa çıkan enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen bir cihazdır. Bu tür reaksiyonlar, elektronların bir elektrik devresi aracılığıyla bir maddeden diğerine taşınmasıyla gerçekleşir (Aktaş, 2007). Piller enerjinin depolanmasını, taşınmasını ve kullanılmasını sağlayan güç kaynaklarıdır. Günümüzün artan enerji talebinde enerjinin depolanmasında önemli avantajlar sunan piller, kimyasal özelliklerine göre birincil ve ikincil piller olarak ayrılabilir. Biri 'birincil pil' olarak bilinen tek kullanımlık pil, diğeri ise birçok kez şarj edilip boşaltılabilen 'ikincil pil'dir. Birincil ve ikincil pillerin kimyasal bileşiminde lityum, kadmiyum, cıva, nikel, gümüş, çinko, manganez ve kurşun gibi çeşitli metaller bulunur. Birincil piller şarj edilemeyen pillerdir, başka bir deyişle iç kimyasal enerjileri bittiğinde yeniden şarj edilemez ve yeniden kullanılamazlar. Bu nedenle, şarj edilemeyen piller geri dönüşümsüz bir deşarj reaksiyonuna girer ve tek bir kullanımdan sonra atılmalıdırlar. Kuru hücreler olarak da adlandırılan bu piller, içerdikleri malzemelere göre adlandırılırlar. Bunlar arasında çinko piller, alkalın piller ve lityum piller bulunur. İkincil piller (şarj edilebilir piller) ise tersinir bir deşarj reaksiyonu sergiler, yani pil malzemesi her deşarj döngüsünde ilk durumuna geri dönebilir. Bu, enerjinin elektrotun atomik yapısında göç eden iyonlar tarafından nasıl korunduğuna ve daha sonra mobil elektronlar şeklinde akım toplayıcıya nasıl aktarıldığına dair genel bir yaklaşımı temsil eder. Artık istenilen boyutta pil üretmek mümkündür ve araştırmacılar pillerin performansını artırmak için sürekli olarak çalışmaktadır.

Piller üç temel bileşen ile karakterize edilir: bir katot, bir anot ve bir ayırıcı/elektrolit. Deşarj sürecinde elektron yayan elektrot anot, elektron alan elektrot ise katot olarak adlandırılır. Şarj işlemi sırasında elektrokimyasal hücredeki iyonların akışı ve deşarj işlemi sırasında harici devredeki elektronların akışı, taşınabilir şarj edilebilir pillerin uygunluğunu etkiler (Denholm *et al.* 2010).

Piller, düşük güç tüketen ekipmanların, el fenerlerinin, ölçüm aletlerinin, kontrol cihazlarının ve alarm sistemlerinin çalıştırılması da dahil olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Birincil pillerin yapısı üretim zamanından itibaren bozulur bu nedenle pil seçerken üretim tarihi ve son kullanma tarihi kontrol edilmelidir. Şarj edilebilir piller, uzun ömürlüdürler. Günümüzde birçok yerde görülebilen şarj edilebilir piller, taşınabilir elektronik

ve elektrikli ekipmanlarda mükemmel işlevleri ile dikkat çekmektedir. Kesintisiz güç sağlayan şarj edilebilir piller, ekipmanların dayanıklılığını artırır. Pilde depolanan enerji tükense bile şebeke güç kaynağından beslenerek etkin bir şekilde kullanılmaya devam edilir. Piyasada Nikel Kadmiyum (NiCd), nikel metal hidrit (NiMH), lityum-iyon (Li-ion) ve lityum polimer (Li-polimer) olmak üzere birçok pil çeşidi bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında literatürde pillerin tarihçesi incelenmiştir. Geçmişten günümüze pil prosesleri hakkında bilgi verilmiş, günümüzde yaygın kullanımda olan yüksek enerji yoğunluklu ve yüksek enerji kapasiteli lityum-iyon piller hakkında detaylı bilgi sunulmuştur.

Pilin tarihsel gelişimi

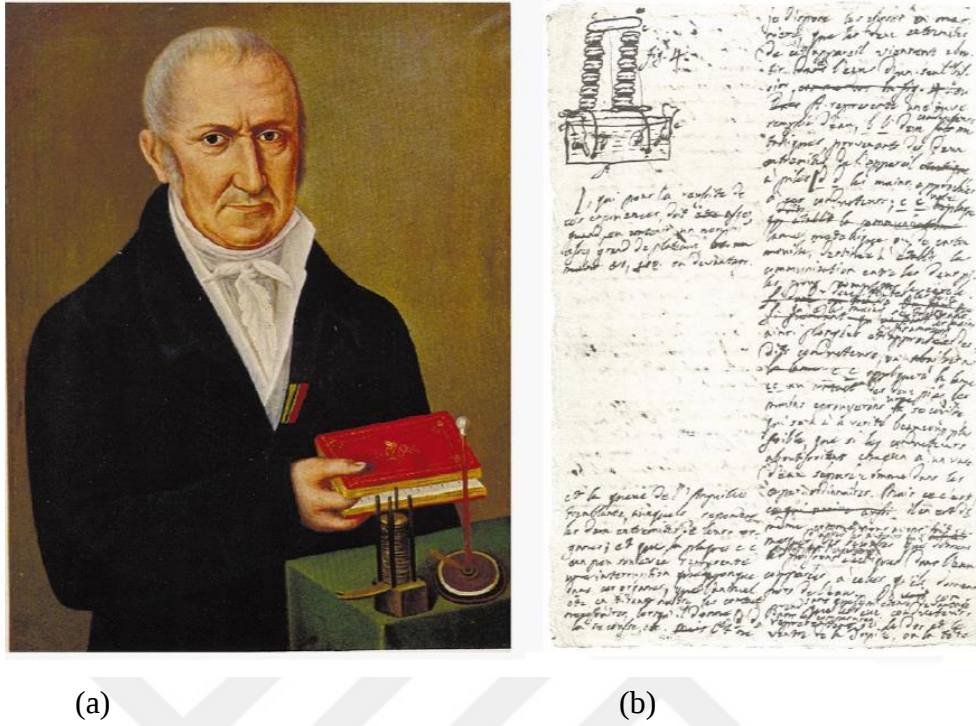
Bilim insanları, eski çağlardaki duvar oymalarında ve eski Mısır metinlerinde elektriğe dair referanslar görmüşlerdir. Tarihte keşfedilen ilk pillere Bağdat pilleri adı verilmektedir. Bağdat'taki Irak Müzesi müdürü Alman arkeolog Wilhelm König, 1936 yılında Bağdat'ın güneydoğusundaki Khujut Rabu bölgesinde arkeolojik kazılar gerçekleştirmiştir. 1938 yılında arkeolojik kazıların sonuçlarını incelerken Bağdat'tan gelen seramiğe benzeyen pillerle karşılaşmıştır (Von Handorf, 2002).



Şekil 1. Bağdat Pili (<http://www.thinkingsidewayspodcast.com>)

Bağdat seramiği, Şekil 1'de gösterildiği gibi, haddelenmiş bakır levhalar, demir çubuklar ve asfalttan oluşan, açık sarı kilden yapılmış, 13,5 cm uzunluğunda oval bir kaptır. Bakır silindirin altını ve üstünü kaplamak ve silindirin ortasındaki demir çubuğu desteklemek için asfalt kullanılmıştır. Arkeolog König, Bağdat pillerinin yaklaşık 2000 yıllık olduğunu belirtmiştir. Ancak diğer bilim adamları bunun MÖ 140'tan itibaren çok uluslu bir imparatorluk

haline gelen Part İmparatorluğu döneminde veya milattan sonra keşfedildiğini iddia etmiştir. (Şekil 2).



Şekil 2. Voltanın icadı pil ve elektroskop (b) Voltanın pilin icadını ilan ederken yayımladığı mektup taslağı (Riberio et al. 2013)

Volta, 1792 yılında Galvani'nin kurbağalar kullanarak yaptığı bir dizi deneyi tekrarlamış ve kurbağaların bacak kaslarının elektrik devresine bağlı olmadığında bile kasılabileceğini bulmuş ve bu durumları Galvani'den farklı şekilde nitelendirmiştir. Üretilen elektriğin kaynağının kurbağanın kasları değil, ona dokunan metal unsurlar olduğunu açıklamıştır. 1795 yılında Volta, yalnızca iki farklı metal parçası ve aralarına ıslak bir bez veya sıvı kullanarak, hayvan kullanmadan elektrik akımı üretebildiğini göstermiştir. Volta, Şekil 2'de görüldüğü gibi 1799 yılında buluşunu geliştirmiş ve buna voltaik pil adını vermiştir. Tuzlu suya batırılmış karton disklerle birbirinden ayrılan bu piller, bakır-çinko veya gümüş-çinko metal çiftlerinden oluşur. Volta'nın icat ettiği ilk pil Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Volta Pili (<https://www.youtube.com>)

1836'ya gelindiğinde John Frederic Daniell pil konusunda büyük ilerleme kaydetti. Daniel pili Şekil 4'te görüldüğü gibi iki bölmeli bir kaptan oluşmaktadır. İlk bölmede, bir çinko sülfat ($ZnSO_4$) çözeltisine çinko çubuk daldırılmış ve ikinci bölmede, bir bakır çubuk bir bakır (II) sülfat ($CuSO_4$) çözeltisine daldırılmıştır. Çözeltiler gözenekli bir kap ile birbirlerinden ayrılmıştır. Pozitif yüklü çinko iyonları bakır çubuğa girdiğinde ikinci bölümde negatif yüklü SO_4 iyonlarıyla karşılaşır ve reaksiyon başlar. Pozitif yüklü Cu^+SO_4 iyonları bakır çubuğa doğru ikinci kaba akar ve orada birikir. Bu iyonlar daha sonra elektrik yüklerini geri kazandırır. İkinci kaptan SO_4 iyonları çinko çubuğa akar ve onu eritmeye başlar. Çinko plakaya bağlanan tel, pilin negatif terminali, bakır plakaya bağlanan tel ise pozitif terminali görevi görür. Daniell'ın pili sonraki 100 yıl boyunca telgraflara, telefonlara ve kapı zillerine güç sağlamak için kullanıldığı bilinmektedir.



Şekil 4. Daniell Pili (<https://en.wikipedia.org/>)

1839 yılında William Robert Grove, suyun elektrolizinin ters reaksiyonu sonucunda sabit bir akım ve elektrik üretilebileceğini fark ettiğinde ilk yakıt hücresini geliştirmiştir. Daha sonra sıvı elektrotlar kullanarak pili ve elektrik üretmek için ilk yakıt hücresini geliştirmiştir.

1859'da Fransız fizikçi Gaston Plante, ilk şarj edilebilir pil olarak tarihe geçen kurşun-asit pili (pil) icat etmiştir. 1868'de Fransız bilim adamı Georges Leclanché, ilk telgraf sistemlerinde ve daha sonra fenerlerde ve pille çalışan radyolarda yaygın olarak kullanılan ağır kuru hücreli pili icat etmiştir; 1881'de Faure ve diğerleri ilk çinko-karbon ve 1899'da Waldemar Jungner ilk nikel-kadmiyum şarj edilebilir pili icat etmiştir. 1899'da Waldemar Jungner nikel-kadmiyum pilleri (NiCd) geliştirmiştir. Jungner aynı zamanda nikel-demir pillerin ve gümüş-kadmiyum pillerin de mucididir. 1949 yılında Eveready Battery çatısı altında Lewis Urry, bugün hala kullanımda olan alkalın manganez pili ve lityum pili icat etmiştir (Marsal *et al.* 1960).

1902 yılında Thomas Edison demir-nikel pil geliştirmeye başlamıştır (Şekil 5). 1908 yılında Edison elektrolite lityum hidroksit ekleyerek demir-nikel pilin performansını artırmıştır. Lityum-iyon piller ilk olarak 1912'de Gilbert Newton Lewis tarafından yapılmıştır, ancak 1970'lerde uygulanabilir hale gelmiştir ve ilk şarj edilemeyen lityum piller ticari pazara sunulmuştur (Whittingham and Fanwood, 1977).



Şekil 5. Edison Pili (<https://chem.libretexts.org>)

Şarj edilebilir pillerin keşfi

1980'lerde lityum içeren şarj edilebilir pillerin geliştirilmesi araştırılmış ve lityum metal anotlu şarj edilebilir pillerin yüksek voltajlarda mükemmel kapasite sağladığı görülmüştür. Bu piller teorik olarak yüksek enerji yoğunluğuna ulaşmalarına rağmen ancak sıcaklık değişimlerinin neden olduğu şiddetli kimyasal reaksiyonlar ve güvenlik endişeleri nedeniyle başarısız olmuştur. Bu nedenle, lityum metale göre nispeten daha güvenli olan lityum iyonlarının kullanıldığı metalik olmayan lityum piller araştırılmıştır. 1980'de John Bannister Goodenough ilk kez pozitif elektrot malzemesi olarak lityum kobalt oksiti (LiCoO_2) kullanmıştır (Mizushima *et al.* 1980). Lityum pillerin geliştirilmesindeki önemli bir gelişme,

lityumun ikincil pillerde ara malzeme olarak kullanıldığı interkalasyon malzemelerinin keşfi olmuştur, grafitte lityum interkalasyonunun elektrokimyasal özelliklerini incelemiştir (Yazami 1986). Lityum/polimer elektrolit/grafit yarı hücresinde lityumun grafitte tersinir dönüşümü gösterilmiştir (Paravasthu, 2012). Birkaç yıl sonra, Goodenough katot malzemesi olarak Li_xMO_2 ($M = \text{Co}, \text{Mn}, \text{Ni}$) malzeme ailesini önerirken, lityum metal anotların farklılaşmasını bulmak için araştırmalar yapılmıştır (<http://www.tamsat.org.tr/tr>).

Nihayetinde, John Goodenough'un ekibinin çalışmalarına dayanarak, ilk ticari lityum-iyon pil 1991 yılında Sony şirketi tarafından piyasaya sürülmüştür (Paravasthu, 2012). Bu elektrot yapısına sahip lityum-iyon piller günümüzde hala kullanılmaktadır.

Pil Teknolojisi

Şarj edilebilir piller, enerji fazlası olduğunda enerjiyi depolayabildikleri ve tüketicilerin ihtiyaç duyduklarında kullanmalarına olanak tanıdıkları için çok önemlidir. Lityum-iyon şarj edilebilir piller hafiflikleri, uzun ömürleri, yüksek enerji yoğunlukları ve yüksek güç yoğunlukları ile tercih edilirler (Poullikkas, 2013). Lityum-iyon pil teknolojisi, üstün özellikleri nedeniyle hızla popülerlik kazanmıştır. Bu noktada, katot malzemesini üretmek için kullanılan kobalt metalinin yüksek fiyatı ve çevreye verdiği zarar, bilim insanlarını lityum kobalt alternatifler aramaya yöneltmiştir. Bu arada, müşterilerin daha yüksek enerji yoğunluğuna olan talebi, anot malzemesi olarak grafitin yerini alacak alternatif malzemelerin aranmasına yol açmıştır (Kul, 2020). 250 yıllık tarihsel gelişime rağmen, pillerde enerji üretimi genel yapısında aynı kalmaktadır; pozitif ve pozitif olmayan negatif, iki elektrot arasına yerleştirilmiş bir elektrolitin indirgeme-oksidasyon (redoks) reaksiyonundan oluşur. Bugüne kadar elektrotlarda ve elektrolitte yapılan modifikasyonlarla çeşitli pil çalışmaları gerçekleştirilmiş olup yeni araştırmalar halen devam etmektedir.

Pil Çeşitleri

Pil çeşitleri birincil ve ikinci piller olmak üzere iki türe ayrılmaktadır. Aşağıda bu piller hakkında bilgi verilmektedir.

Birincil piller

Birincil pillerde reaksiyon geri döndürülemez. Pil tek kullanımlıktır ancak uzun ömürlüdür. Pildeki elektrokimyasal reaksiyon tamamlandığında enerji üretimi durur. En yaygın kullanılan pil türü kuru hücrelidir (Leclanche pili). Bu piller 1,5 V'a kadar potansiyel üretebilir. Elektrolit olarak amonyum klorür, anot olarak çinko ve katot olarak grafit kullanılır.

Günümüzde birincil piller olan alkalın piller yaygın olarak kullanılmaktadır. Alkalın pillerde elektrolit olarak amonyum klorür yerine potasyum hidroksit kullanılır.

Tablo 1’de yaygın olarak kullanılan bazı birincil pil sistemleri verilmiştir. Bu tür sistemler, tek kullanımlık olduklarından çevre dostu değildir.

Tablo 1. Bazı Birincil Pillere Ait Özellikler (Kiehne, 2003)

Pil sistemi	Hücre reaksiyonu	Potansiyel (V)
Leclanché	$Zn + 2MnO_2 + 2NH_4Cl \rightarrow Zn(NH_3)_2Cl_2 + Mn_2O_3 + H_2O$	1,5
Mangan alkalın	$Zn + 2MnO_2 + 2H_2O \rightarrow ZnO + Mn_2O_3$	1,5
Gümüş oksit-çinko	$Zn + Ag_2O + H_2O \rightarrow Zn(OH)_2 + 2Ag$	1,6
Çinko-hava (alkalın)	$2Zn + O_2 \rightarrow 2ZnO$	1,45
Lityum/mangan dioksit	$Li + MnO_2 \rightarrow LiMnO_2$	3,5
Tiyonil klorür	$4Li + 2SOCl_2 \rightarrow 4LiCl + S + SO_2$	3,9

İkincil piller

Taşınabilir elektronik ürünlerin uzun süreler boyunca verimli bir şekilde çalışabilmesi için enerji yoğun, dayanıklı, güvenli, bakımı kolay ve kısa sürede şarj edilebilen bir güç kaynağına ihtiyaçları vardır. Bu türden piller şarj edilebilir piller olarak bilinir. Bu pillerde elektrot reaksiyonu tersine çevrilebilir. Şarj edilebilir piller deşarj olduktan sonra yeniden şarj edilebilir ve yeniden kullanılabilir. Günümüzde şarj edilebilir piller taşınabilir elektrikli ekipmanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

İkincil pillere örnek olarak kurşun-asit piller, lityum-iyon piller, gümüş-çinko piller, sodyum sülfür piller, nikel-çinko piller, nikel-hidrojen piller ve nikel-kadmiyum piller verilebilir. En yaygın kullanılan şarj edilebilir pil, üstün özellikleri nedeniyle lityum-iyon pildir (Aifantis and Hackney, 2010). Tablo 2’de yaygın olarak kullanılan bazı ikincil pillere ait özellikler verilmiştir.

Tablo 2. Bazı İkincil Pillere Ait Özellikler (Luo *et al.* 2015)

	Kurşun Asit	Lityum İyon	Sodyum-Sülfür
Ömür (Yıl)	5 – 15	5 – 15	10 – 15
Çevrim Ömrü	500 – 1000	1000- 10000	2500
Kulombik Verim %	70 – 80	90- 98	75- 90
Enerji Yoğunluğu (Wh/L)	50 – 80	200- 500	150- 250

Lityum iyon piller: Enerji uygulamalarında lityum metal kullanmanın faydaları 1970 yılında fark edilmiş ve 1972'de Exxon, katot olarak titanyum disülfür ve anot olarak lityum metali içeren ilk lityum pili üretilmiştir. 1980'lerde kükürt içeren katot malzemesinin uzun çevrimler boyunca stabil kalmadığı fark edildi. Goodenough, aktif katot malzemesi olarak metal oksitlerin kullanılmasını önermiştir. Bu pilde katot olarak LiCoO_2 , anot olarak ise karbon kullanıldı ve pilin ölçülen voltajı 4,2V olarak bulunmuştur.

Bu hücre yapısı günümüzde kullanılan lityum iyon pillerin temelini oluşturmaktadır. Sonraki yıllarda lityum iyon pil teknolojisindeki rekabet yoğunlaştıkça, pillerin belirli kapasiteleri, kullanım ömrü, hacimsel enerji yoğunluğu ve güvenliği konusundaki araştırmalar hızlanmıştır (Ozawa, 2009).

Lityum-iyon pillerin diğer şarj edilebilir pillere (gümüş-çinko, nikel-çinko, nikel-hidrojen ve nikel-kadmiyum) kıyasla avantaj ve dezavantajları Tablo 3'te listelenmiştir.

Tablo 3. Tekrar Şarj Edilebilir Lityum İyon Pillerin Avantaj ve Dezavantajları (Reddy and Linden, 2010)

Avantajlar	Dezavantajlar
• Kapalı hücre olması ve bakım gerektirmemesi • Uzun ömürlü olması (300 – 500 çevrim) • Geniş çalışma sıcaklık aralığı (-20 ila 60°C arası) • Uzun raf ömrü (2 – 3 yıl) • Çabuk şarj olabilme kabiliyeti • Yüksek deşarj kapasitesi • Yüksek enerji verimi (%98) • Yüksek spesifik enerji ve enerji yoğunluğu • Hafıza etkisinin olmayışı	• Fiyatı (Talebin artmasıyla fiyat azalmaktadır) • Yüksek sıcaklıklarda bozunması • Koruyucu devre ihtiyacının oluşu • Aşırı şarj sonucunda kapasite kaybı veya termal bozunmanın olması

Lityum-iyon piller üç ana yapıdan oluşur: bir pozitif elektrot, bir anot ve bir elektrolit (Nazri, 2009). Anot ve katot, lityum iyonlarının geçişini engellemeyen mikro gözenekli bir polimer membran olan bir ayırıcı ile ayrılır. Katot genellikle katmanlı veya oluklu bir yapıya sahip bir metal oksitten oluşur. Anot da katmanlı bir yapıdan oluşur. Anot ve katodun bu geometrisi, pilin şarj ve deşarjı sırasında lityum iyonlarının anot ve katot arasında her iki yönde de hareket etmesini sağlamaktadır (Ozawa, 2009). Bu çift yönlü hareket topotaktik reaksiyon olarak bilinmektedir. Bu topotaktik reaksiyonda, aktif malzeme katot ve anot olarak lityum için bir tür konak görevi görür ve lityum anot ve katot arasında hareket eder (Keleş ve Polat, 2013).

Hücresel reaksiyonun gerçekleşmesi için elektrot malzemesinin elektrik iletkenliği sağlanmalıdır. Elektrot malzemesi, yüksek elektrik iletkenliğine sahip metal bir folyo üzerine kaplanmaktadır. Elektrotlar arasındaki kısa devreleri önlemek için mikro gözenekli ayırıcılar kullanılmaktadır. Lityum iyonlarının iletkenliğini sağlamak için bir elektrolit kullanılmaktadır. Lityum-iyon pillerin geliştirilmesi için birçok patent verilmiştir ve sadece ABD Patent Ofisi'nde lityum-iyon pillerle ilgili yaklaşık 2000 patent bulunmaktadır (Yoshio *et al.* 2009).

Anot: Lityum metali 1970'lerde lityum-iyon pillerde anot malzemesi olarak kullanılmıştır. Lityum metali yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen, kısa bir süre içinde suyla ekzotermik olarak reaksiyona girer ve bu da onu bir anot olarak güvenilir hale getirir (Van Schalkwijk and Scrosati, 2002). Daha sonra karbon bir anot malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Şu anda en yaygın kullanılan anot malzemesi olan grafit, 372 mAhg⁻¹ teorik özgül kapasiteye sahiptir. Karbonun ucuz ve güvenli kullanım avantajlarına rağmen, nispeten düşük kapasitesi bilim camiasını alternatif anot malzemeleri aramaya yöneltmiştir (Noh *et al.* 2005)

Katot: Pilin şarj olması sırasında, katot aktif malzemesindeki Li⁺ iyonları elektrolit aracılığıyla, serbest elektronlar ise dış bir iletken aracılığıyla anot malzemesine taşınır. Pilin deşarjı sırasında ise bu işlem ters yönde gerçekleşir. Katot malzemesi olarak kullanılan metal oksitlerin spesifik kapasite ve potansiyel değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Katot Aktif Maddeleri ve Özellikleri (Reddy and Linden, 2010)

Katot Maddesi	Spesifik (mAh/g)	Kapasite	Potansiyel (V)	Yorumlar
LiCoO ₂	155		3,88	Ticari olarak en yaygın, kobalt pahalıdır
LiNi _{0,7} Co _{0,3} O ₂	190		3,7	LiCoO ₂ 'e göre ucuz
LiNi _{0,8} Co _{0,2} O ₂	205		3,73	LiCoO ₂ 'e göre ucuz
LiNi _{0,9} Co _{0,1} O ₂	220		3,76	En yüksek spesifik kapasite
LiNiO ₂	200		3,55	En ekzotermik ayrışma
LiMn ₂ O ₄	120		4,00	Düşük toksisite, en az ekzotermik ayrışma

Elektrolit: Elektrolit, lityum-iyon pillerde oksidasyon reaksiyonu sonucu oluşan lityum iyonlarının pozitif ve negatif elektrotlar arasında transferinden sorumlu bileşendir. Elektrotlar arasında iyon taşınımında görev alan elektrolitler elektron taşınımına izin vermez. Dört tip elektrolit vardır. Bunlar sıvı elektrolitler, jel elektrolitler, polimer elektrolitler ve seramik elektrolitlerdir. En yaygın kullanılan sıvı elektrolitler organik çözücüler ve lityum tuzları ile

oluşturulmaktadır (Reddy and Linden, 2010). Lityum-iyon pillerde en yaygın kullanılan ticari lityum tuzu LiPF_6 'dır. Çözücü olarak etilen karbonat, dimetil karbonat ve dietil karbonat çeşitli oranlarda ve kombinasyonlarda kullanılmaktadır.

Sıvı elektrolitte, hücre direncini düşük tutmak ve böylece pilin ısınmasını önlemek için iyonik iletkenlik yüksek ve viskozite düşük tutulur. Elektrolit, anot veya katot ile reaksiyona girip bozulmaması için yüksek kimyasal ve elektrokimyasal dengeye sahip olmalıdır. Soğuk iklimlerde kullanılabilmesi için düşük erime noktasına sahip olmalıdır. Sıvı elektrolitlerde kullanılan lityum tuzları Tablo 5'te listelenmiştir.

Tablo 5. Lityum-İyon Pil Elektrolitlerinde Kullanılan Tuzlar (Reddy and Linden, 2010)

Elektrolit Tuzları	Molar Kütle (g /mol)	Yorumlar
LiPF_6	151,90	En yaygın kullanılan
LiBF_4	93,74	Suya karşı LiPF_6 'a göre kararlı
LiClO_4	106,39	Kuruyken alternatiflerine göre daha az kararlı
LiAsF_6	195,85	Arsenik içerir
LiSO_3CF_3	156,01	Suya karşı kararlı
$\text{LiN}(\text{SO}_2\text{C}_2\text{F}_5)_2$	387	Suya karşı kararlı

Elektrolit katkı malzemeleri: Pil performansını daha da artırmak için elektrolit katkı maddeleri geliştirilmiştir. Elektrolit katkı maddeleri, lityum iyon pillerin ömrünün uzatılmasında, enerji yoğunluğunun ve güvenliğinin artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Dünya çapındaki araştırmacılar yüzlerce makale yayınlamış olsa da katkı maddelerinin pil ömrünü nasıl iyileştirdiği hala tam olarak belli değildir (Burns *et al.* 2013). Kullanılan organik elektrolit çözeltilerinin yanıcılığı nedeniyle, lityum iyon pillerde elektrot bozulması ve bunun sonucunda ortaya çıkan termal dengesizlik her zaman potansiyel bir tehlike oluşturur. Bu nedenle pil performansını koruyan veya iyileştiren elektrolitlerin ve elektrolit katkı maddelerinin geliştirilmesi önemli bir çalışma alanıdır. Katkı maddelerinin çoğu, elektrotların yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturarak solventinin indirgenmesini veya oksidasyonunu önleyecek şekilde tasarlanmıştır.

Elektrolitte kullanılan çözücülerin anodik ve katodik olarak kararlı olması gerekir, ancak lityum ve LiC_6 içeren çözücüler çalışma potansiyeli aralığında termodinamik olarak kararsız olduğundan bu pratik değildir. Bu nedenle, bir lityum iyon pil ilk kez şarj edildiğinde elektrot yüzeyinde katı elektrolit arayüzü (SEI) adı verilen bir pasifleştirme katmanı oluşur ve elektroliti azaltır. İyi bir katı elektrolit yüzey (KEY) katmanı, döngü sırasında lityum-iyonlarının geçmesine izin verirken elektron taşınmasını bloke ederek elektrolitin daha fazla

bozulmasını önler. Bu katmanın oluşturulmasında katkı maddeleri rol oynar. Katkı maddeleri tipik olarak elektropolimerizasyon veya oksidasyon yoluyla elektrot yüzeylerinde birikir. Katkı maddesinin elektrolit çözücüyü göre daha yüksek bir indirgeme potansiyeli varsa KEY katmanının oluşumuna katkıda bulunur. Bu, çözücü yerine katkı maddesini azaltır ve elektrotu çözünmeyen bir katı katmanla pasifleştirir. KEY katmanı, elektrot malzemelerinin solventle reaksiyona girmesini önleyerek katalitik aktivitesini engeller (Dagger *et al.* 2018).

Elektrolite çeşitli amaçlarla bir veya daha fazla katkı maddesi eklenebilir. Elektrolitlerin elektrokimyasal özelliklerini arttırmak için Bor (B), Flor (F), Fosfor (P) ve Kükürt (S) içeren fonksiyonel gruplar katkı maddesi olarak kullanılır. Flor içeren katkı maddeleri, C-F bağının elektronları çekme konusundaki güçlü eğilimi nedeniyle depolama ve boşaltma kapasitesini artırırken, fosfor veya bor içeren fonksiyonel grupların eklenmesi, elektrolite alev geciktirici bir etki kazandırır (Reddy and Linden, 2010).

Elektrolit katkı maddelerinin bir örneği heksametildisilazandır (HMDS). HMDS, ortamda bulunabilecek su ile reaksiyona girerek arayüzey direncini azaltmak ve suya duyarlı maddeleri korumak için kullanılır (Reddy and Linden, 2010).

Kurşun asit piller: En yaygın kullanılan piller kurşun-asit pillerdir. Kurşun-asit piller genellikle ulaşımda bilgisayarlar ve telekomünikasyon sistemleri için yedek güç kaynağı olarak kullanılır. Bu pillerde kurşun dioksit (PbO_2) katot, kurşun (Pb) anot ve sülfürik asit (H_2SO_4) elektrolit olarak görev yapar. Kurşun-asit akülerin günlük kendi kendine deşarj oranı düşüktür ($<0,3$). Bu piller nispeten yüksek çevrim verimliliğine (>90), 50 ila 90 Wh/L enerji yoğunluğuna ve 25 ila 50 Wh/kg spesifik enerjiye sahiptir ve uygun maliyetlidir. Kurşun-asit akünün performansı sıcaklığa bağlıdır. Bu nedenle optimum performans için bu pillerin kullanıldığı sistemde bir termal yönetim sistemi gereklidir. Bu durum kurşun-asit akülerin büyük kapasiteli enerji depolama sistemlerinde kullanımını pahalı hale getirmektedir (Baker, 2008).

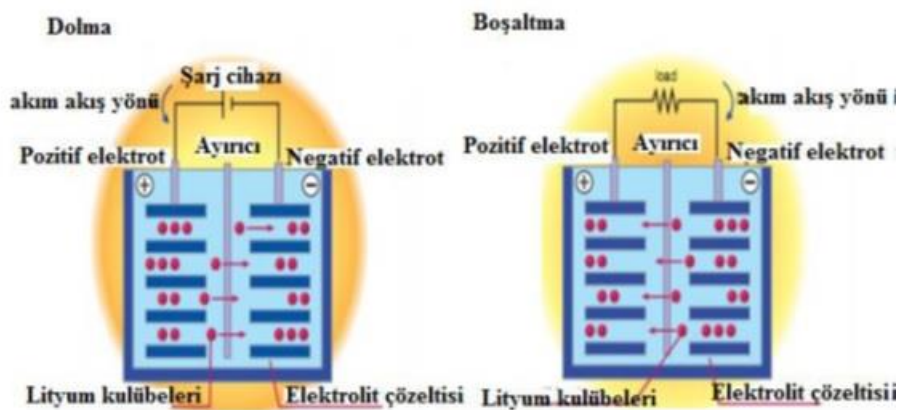
Sodyum-sülfür (NaS) piller: Sodyum-sülfür (NaS) pilleri erimiş sodyum ve erimiş sülfür elektrotları ve 'beta alümina' adı verilen katı bir elektrolit kullanır. Yüksek reaktivite elde etmek için NaS akülerdeki elektrotların erimiş halde kalması gerekir, bu da 574 ila 624°K arasındaki sıcaklıkları gerektirir. NaS pillerin avantajları arasında nispeten yüksek enerji yoğunluğu (150-300 Wh/L) ve çok düşük günlük kendi kendine deşarj oranı bulunmaktadır. NaS piller ucuz, toksik olmayan malzemeler kullanır ve %99 oranında geri dönüştürülebilir. Yıllık işletme maliyetleri çok yüksektir ve küçük ölçekli ticari kullanım için uygun değildir; NaS pilleri büyük ölçekli enerji depolama uygulamaları için en umut verici adaylardan biri olarak kabul edilmektedir (Díaz-González *et al.* 2012).

Pillerin Çalışma Prensibi

Lityum-iyon pillerde katot, lityum kobaltat (LiCoO_2), lityum nikelat (LiNiO_2) ve lityum demir fosfat (LiFePO_4) gibi metal oksitlerden oluşurken, anot karbon (grafit) veya titanattan ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) oluşur. Çoğu lityum pil karbon kullanır. Bunun nedeni, düşük enerji yoğunluklarına rağmen son derece güvenilir olmalarıdır: iki elektrot arasındaki elektrolit, iyonların hareketini sağlayan lityum tuzları ve organik çözücülerden oluşur. Pozitif ve negatif elektrotları ayırmak için bir ayırıcı kullanılır. Tüm lityum-iyon piller benzer şekilde çalışırlar.

Deşarj işlemi sırasında anottan gelen Li^+ iyonları elektrolit malzeme yardımıyla ayırıcıdan geçerek katoda ulaşır. Bu nedenle anotta elektron kaybına bağlı olarak bir oksidasyon reaksiyonu meydana gelir. Katotta ise indirgenme reaksiyonu gerçekleşir ve lityum metal oksit bileşiği oluşur. Şarj işleminde ise tam tersi bir reaksiyon meydana gelir. Şekil 8'de bir lityum-iyon pilin deşarj ve şarj sırasında çalışma prensibi gösterilmektedir. Lityum-iyon piller, patlamalara ve diğer olumsuz etkilere yol açabilecek aşırı şarj ve aşırı ısınmayı önlemek için elektronik kontrollere sahiptir.

Şarj sırasında lityum iyonları pozitif elektrodu terk eder, elektrolit aracılığıyla ayırıcıdan geçer ve negatif elektrotla bir bileşik oluşturur. Benzer şekilde, pozitif elektrottan ayrılan elektronlar harici bir devre aracılığıyla negatif elektrot tarafından yakalanır (Miller, 2015). Bu reaksiyonlar tersine çevrilebilir olduğundan, sistem deşarj edilebilir olarak adlandırılır (Nitta *et al.* 2015) Şarj ve deşarj devam ettikçe, elektrotlardaki potansiyel dalgalanmalar düşük seviyelerde kalmalıdır.

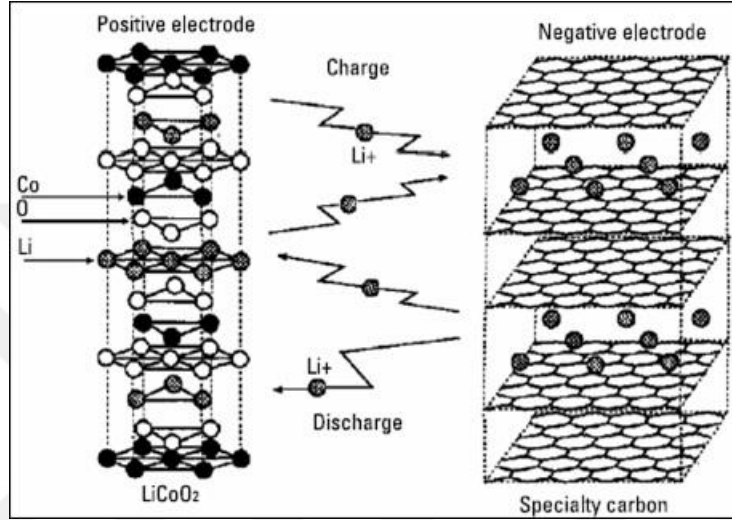


Şekil 6. Şarj ve boşaltma sırasında lityum iyon hücresinin diyagramı (Paravasthu, 2012).

Pillerin Teknik Özellikleri ile İlgili Kavramlar

Nominal gerilim (V)

Pil paketi üzerinde yer alan referans voltaj değeridir. Pilin normal çalışma gerilimidir (Young *et al.* 2013) Bir lityum iyon pilin nominal (anma) voltaj değeri 3,6 volt (V), maksimum şarj voltajı 4,2 volt ve minimum deşarj voltajı 2,7 volttur. Şekil 7’de lityum iyon malzemelerin şarj-deşarj reaksiyon şeması ve kristal yapısı gösterilmektedir (Barsukov and Qian, 2013). İyonlar deşarj sırasında anottan katoda ve şarj sırasında katottan anoda akar.



Şekil 7. Lityum-iyon kristal yapısı

Lityum-iyon piller, diğer pil türlerine göre birçok avantaja sahip oldukları için tercih edilmektedir. Bunlardan biri de lityum pillerin enerji yoğunluğunun daha yüksek olmasıdır. Yani bir lityum pilin birim hacim başına depolayabildiği enerji diğer pil gruplarına göre daha yüksektir (Ceylan, 2013).

Özgül enerji

Ağırlıksal (gravimetrik) enerji yoğunluğu olarak da adlandırılan özgül enerji, bir pilin birim kütle başına ne kadar enerji depolayabileceğini tanımlamak için kullanılır. Birim kilogram başına watt-saattir (Wh kg^{-1}). Ayrıca, belirli bir elektrikli araç menzili için gereken pil ağırlığının belirlenmesinde önemli bir parametredir (Ogura and Kolhe, 2017).

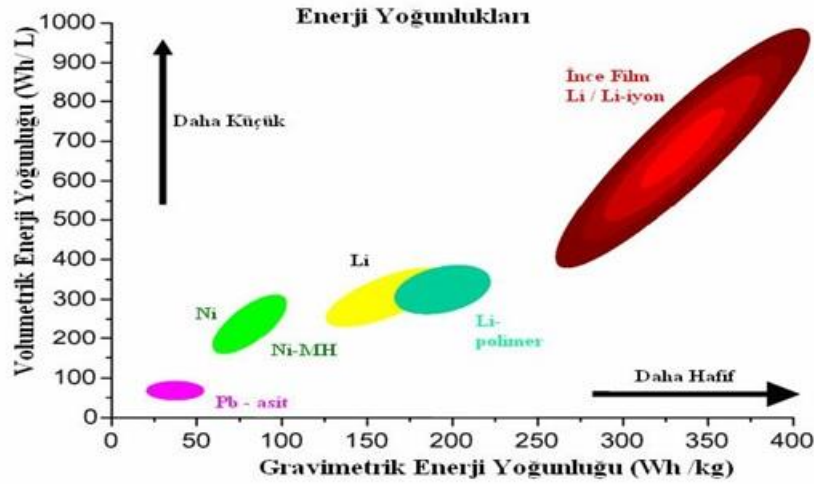
Geleneksel lityum-iyon pil teknolojisinin teorik özgül enerjisi 387 Wh/kg 'dır (Barghamadi *et al.* 2012) Şu anda üretilen ticari hücrelerin enerji yoğunluğu 240 Wh/kg 'dır ve teknolojisi açıkça sınırlarına ulaşmaktadır; seri üretilen elektrikli araçların tek şarjla 500 km'nin üzerinde bir menzile ulaşma hedefi ancak ticari pil teknolojisi yeni bir döneme girerse mümkün olacaktır (Chemali and Ephrem 2016).

Özgöl güç

Pil gravimetrik güç yoğunluğu olarak da adlandırılan özgül güç, $W\ kg^{-1}$ olarak ifade edilen birim kütle başına en yüksek güçtür (Young *et al.* 2013) Malzeme kimyasındaki yenilikler, enerji dönüşümü ve depolanmasındaki ilerlemelerin merkezinde yer almıştır (Fisher *et al.* 2013). Bununla birlikte, Li iyonlarının difüzyon sınırı, Li iyon pillerinin yüksek güçlü uygulamalarda kullanımını sınırlayıcı bir etkiye sahip olmuştur. Elektrokimyasal kapasitörler Li iyon pillerden çok daha yüksek özgül güç sağlayabilir. Uzun vadeli kararlılığın iyi bir örneği olarak, elektrokimyasal ultrakapasitörler $0,2\ kW\ kg^{-1}$ Li iyon pillere kıyasla yaklaşık $5\ kW\ kg^{-1}$ 'dir (Winter and Brodd, 2004).

Hacimsel enerji yoğunluğu

Birim hacim başına nominal pil enerjisidir ($Wh\ L^{-1}$). Belirli bir elektrikli araç menzili için gereken pil boyutunun belirlenmesinde de önemli bir parametredir (Dikmen vd 2018). Yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle lityum-iyon ve lityum-iyon polimer pillere olan talep hızla artmaktadır. Şekil 8'de görüldüğü gibi, lityum-iyon piller, kurşun-asit ve nikel-metal hibrit şarj edilebilir pillerle karşılaştırıldığında, şarj edilebilir piller arasında en yüksek kütle yoğunluğuna ($150\ Wh.kg^{-1}$) ve hacimsel enerji yoğunluğuna ($400\ Wh.L^{-1}$) sahiptir (Tarascon and Armand, 2001). Lityum-iyon piller 3.7 V elektromotor kuvvetine sahiptir ve bu değer diğer pillerin (Ni-MH ve Ni-Cd) yaklaşık üç katıdır.



Şekil 8. Doldurulabilir pillerin kütle ve hacimsel enerji yoğunlukları

Deşarj derinliği

Deşarj derinliği, bir pilin tam şarjdan (%100) tam deşarja (%0) kadar deşarj olduğu sürenin yüzdesidir. Örneğin, %80 deşarj derinliği, pilin amper-saat cinsinden belirtilen kapasitesinin %80'ine kadar deşarj olduğu anlamına gelir (Ogura and Kolhe, 2017., Dikmen vd

2018). Lityum-iyon piller güvenli çalışma, dengeleme, şarj ve deşarj derinliği ayarı, şarj durumu ve sağlık şarj durumu tahmini gibi işlevler, elektronik pil yönetim sistemleri ile kullanılarak pillerin kullanım ömürleri kontrollü bir şekilde uzatılmaktadır.

Çevrim ömrü

Bir pilin belirli bir deşarj derinliğine kadar boşaltılması ve ardından tamamen yeniden şarj edilmesine 'çevrim' denir. Bir akünün çevrim ömrü, kullanım süresini, yani ekonomik ömrünü belirleyen parametredir. Bir pilin ömrünün belirlenmesinde önemli olan süre değil, şarj/deşarj döngülerinin sayısıdır (Ogura and Kolhe, 2017). Bu pillerden lityum-iyon piller genellikle yüksek özgül enerjileri (118-250 Wh/kg), yüksek enerji yoğunlukları (200-400 Wh/L), yüksek özgül güçleri (200-430 W/kg), yüksek çevrim ömürleri (2000 yıl) ve ideal çalışma sıcaklıkları (-20°C ila 60°C) nedeniyle tercih edilmektedir (Yong *et al.* 2015). Farklı pil türleri özelliklerine göre karşılaştırıldığında, lityum bazlı piller ağırlık, maliyet, performans ve çevrim ömürleri nedeniyle elektrikli araçlar için en uygun pil türüdür.

Kapasite

Belirli koşullar altında bir pilden çıkarılabilecek maksimum enerji miktarı kapasitedir. Amper-saat (Ah) veya watt-saat (Wh) olarak ifade edilebilir, ikincisi elektrikli araçlarda daha yaygındır (Ogura and Kolhe, 2017). Mümkün olan en kısa sürede büyük miktarda enerji depolayabilen yeni teknolojilerin ortaya çıkması, elektrikli araçların başarısı için belirleyici bir faktördür, çünkü pilin kapasitesi, önemli bir faktör olduğu aracın otonomisini doğrudan etkiler.

MATERYAL VE METOT

Araştırma Türü

Bu çalışma, lityum-iyon pillerin tarihsel gelişimi, malzeme özellikleri ve teknolojik yeniliklerini ele alan bir derleme çalışmasıdır. Çalışmanın amacı, mevcut literatürü sistematik bir şekilde inceleyerek konuya ilişkin güncel bilgileri ve trendleri bir araya getirmektir.

Veri Toplama Süreci

Çalışmada, PubMed, Scopus, Web of Science, ScienceDirect ve Google Scholar veri tabanları kullanılmıştır. Ek olarak, sektörel raporlar ve konferans bildirileri incelenmiştir.

Literatür taramasında "Lityum-iyon piller", "anot malzemeleri", "katot malzemeleri", "elektrolit yenilikleri", "geri dönüşüm teknolojileri", "sürdürülebilir enerji depolama" anahtar kelimeleri kullanılmıştır.

Bu çalışma, 2010-2024 yılları arasında hakemli dergilerde yayınlanmış, İngilizce ve Türkçe yazılmış bilimsel çalışmalar dikkate alınarak hazırlanmıştır. Kısa özetler, poster bildirileri ve tam metni bulunmayan yayınlar ile lityum-iyon pillerle ilgisi olmayan veya yeterli teknik bilgi sunmayan çalışmalar göz ardı edilmiştir.

Veri Analiz Süreci

Bu çalışmada incelenen kaynaklardan elde edilen bulgular sistematik bir şekilde sınıflandırılmış ve özetlenmiştir. Malzeme performansı, elektrolit yenilikleri, geri dönüşüm teknolojileri ve uygulama alanlarına yönelik bilgiler ayrı başlıklar altında toplanmıştır. Elde edilen bilgiler, karşılaştırmalı tablolarla desteklenmiştir. Performans karşılaştırmaları için farklı malzeme türleri, çevrim ömrü ve enerji yoğunluğu gibi parametreler analiz edilmiştir.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, lityum-iyon pillerle ilgili yapılan en güncel araştırmalar ışığında elde edilen bulgular tartışılmıştır. Bulgular, lityum-iyon pillerin enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, güvenlik, maliyet ve çevresel etkiler gibi farklı performans parametreleri üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Anot ve Katot Malzemelerinin Performansı

Lityum-iyon pillerde anot ve katot malzemeleri, enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, güvenlik ve maliyet gibi temel performans kriterlerini belirler. Bu nedenle, bu malzemelerin kimyasal yapıları, fiziksel özellikleri ve yenilikçi tasarımları pil performansını optimize etmek açısından kritik öneme sahiptir.

Katot malzemeleri

Katot malzemeleri, lityum-iyon pillerin enerji yoğunluğunu ve hücre voltajını belirleyen ana bileşenlerdir. Yaygın olarak kullanılan katot malzemeleri arasında lityum-kobalt oksit (LiCoO_2), nikel-manganez-kobalt oksit (NMC), lityum-demir fosfat (LFP) ve yüksek voltajlı spinel malzemeler yer alır.

Lityum-Kobalt Oksit (LiCoO_2), ticari olarak ilk kullanılan katot malzemesidir ve hala tüketici elektroniği cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu (200 Wh/kg) sağlar, ancak kobaltın yüksek maliyeti ve toksik özellikleri, daha sürdürülebilir alternatiflere yönelimi artırmıştır (Di Lecce *et al.* 2017). Nikel-Manganez-Kobalt (NMC) katot malzemeleri, özellikle elektrikli araç pazarında tercih edilmektedir. NMC-811 kimyası, nikel içeriğini artırarak enerji yoğunluğunu artırırken, kobalt kullanımını azaltarak maliyeti düşürmektedir. Bu malzeme aynı zamanda çevrim ömrü açısından da avantaj sağlar (Zhao and Lehto, 2020). Lityum-Demir Fosfat (LFP), daha düşük enerji yoğunluğuna (120-150 Wh/kg) sahip olmasına rağmen, mükemmel termal stabilitesi ve uzun çevrim ömrü ile dikkat çeker. Özellikle enerji depolama sistemleri ve ticari elektrikli araçlar için idealdir (Duffner *et al.* 2021). Yüksek voltajlı spinel malzemelerden olan lityum-manganez oksit (LMO) gibi spinel yapılar, hızlı şarj ve düşük maliyet avantajları sunar. Bununla birlikte, düşük enerji yoğunluğu, geniş kullanım alanlarını sınırlamaktadır.

Anot malzemeleri

Anot malzemeleri, lityum iyonlarının depolanmasından sorumlu olup, enerji yoğunluğu ve çevrim ömrü üzerinde doğrudan etkili bir bileşendir. Geleneksel anotlar arasında grafit ve silikon bazlı malzemeler bulunur.

Grafit, ticari lityum-iyon pillerde yaygın olarak kullanılan bir anot malzemesidir. Uygun maliyeti, kimyasal kararlılığı ve 3000'e kadar şarj-deşarj döngüsü sağlaması nedeniyle tercih edilir. Bununla birlikte, teorik kapasitesi (372 mAh/g) sınırlıdır ve bu da enerji yoğunluğunu artırmak isteyen yeni malzeme arayışlarını tetiklemiştir (Mossali *et al.* 2020). Silikon, lityum-iyon piller için en umut verici anot malzemelerinden biridir. Grafitte kıyasla yaklaşık 10 kat daha yüksek bir teorik kapasiteye (4200 mAh/g) sahiptir. Ancak, lityum iyonlarının ara katmanlara yerleşip ayrılması sırasında silikonun hacim genişlemesi %300'e ulaşabilir. Bu durum mekanik gerilmelere ve anot malzemesinin bozulmasına neden olur (Zhao and Lehto, 2020). Silikonun genişleme sorunlarını azaltmak için nanoteknolojik çözümler geliştirilmiştir. Örneğin, karbon kaplama, nano ölçekte silikon partiküllerinin stabilize edilmesiyle hacim değişikliklerini dengelemektedir.

Katot ve anot malzemelerinin geleceği

Gelecekte, anot ve katot malzemelerindeki inovasyonlar, hem performansı hem de çevresel sürdürülebilirliği artırabilir. Kobalt içermeyen katotlar gibi çevresel etkileri azaltmak için alternatif katot malzemeleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir (Arnold *et al.* 2024). Anot malzemelerindeki karbon nanotüpler, lityum depolama kapasitesini artırırken, mekanik dayanıklılığı artırabilir. Katı hâl elektrotlarının enerji yoğunluğunu artırırken termal stabiliteyi iyileştirmesi beklenmektedir (Duffner *et al.* 2021).

Elektrolitlerin Yenilikçi Kullanımı

Lityum-iyon pillerde elektrolitler, anot ve katot arasında iyon taşınımını sağlayarak pil performansını doğrudan etkileyen bir bileşendir. Elektrolitlerin bileşimi ve özellikleri, enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, şarj-deşarj hızları ve güvenlik gibi faktörler üzerinde belirleyici bir rol oynar. Bu nedenle, elektrolit teknolojilerindeki yenilikler, lityum-iyon pillerin geliştirilmesi için büyük bir potansiyele sahiptir.

Geleneksel sıvı elektrolitler

Ticari lityum-iyon pillerin çoğunda, sıvı organik elektrolitler kullanılmaktadır. Bu elektrolitler, lityum iyonlarının anot ve katot arasında taşınmasını sağlamak için genellikle lityum heksaflorofosfat (LiPF_6) gibi bir tuz ile karıştırılmış organik çözücülerden oluşur. Sıvı

elektrolitler, yüksek iyon iletkenliği sunar ve düşük maliyetlidir. Bu özellikler, ticari lityum-iyon pillerde tercih edilmelerinin temel nedenidir. Bununla birlikte, sıvı elektrolitlerin düşük termal kararlılığı, yüksek yanıcılık ve elektrokimyasal bozunma riski, güvenlik sorunlarına neden olabilir (Liu *et al.* 2018).

Katı hâl elektrolitler

Katı hâl elektrolitler, sıvı organik elektrolitlere bir alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu elektrolitler, lityum iyonlarını taşımak için katı bir ortam kullanır ve geleneksel sıvı elektrolitlere göre daha güvenlidir. Katı hâl elektrolitler, termal kaçak riskini büyük ölçüde azaltır ve patlama riskini ortadan kaldırır. Katı elektrolitlerin stabilitesi, daha ince elektrotlar ve daha yüksek enerji yoğunluğu sağlar. Bununla birlikte, katı hâl elektrolitlerin iyon iletkenliği, sıvı elektrolitlere kıyasla daha düşüktür. Ancak son yıllarda yapılan nanoteknolojik çalışmalar bu sorunu aşmayı hedeflemektedir (Alias and Mohamad, 2015). Katı hâl elektrolitlerin üretiminde yüksek maliyetler, bu teknolojinin ticari uygulanabilirliğini sınırlamaktadır.

Su Bazlı (Aqueous) elektrolitler

Su bazlı elektrolitler, düşük maliyet, toksisite ve çevresel etkiler açısından önemli avantajlar sunar. Bu elektrolitlerde, lityum iyonları bir su bazlı çözeltide taşınır. Düşük maliyet ve toksisite, yüksek çevresel sürdürülebilirlik su bazlı elektrolitlerin sunduğu avantajlardandır. Su bazlı elektrolitler, özellikle büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir (Alias and Mohamad, 2015).

Polimer elektrolitler

Polimer bazlı elektrolitler, iyon taşıma yetenekleri ve esneklikleri nedeniyle gelecekteki enerji depolama teknolojileri için umut vaat etmektedir. Polimer bazlı elektrolitlerin avantajları ise hafif ve esnek yapıları olması ve geniş sıcaklık aralığında çalışabilmesidir. Ancak bazı zorlukları da vardır. Polimer elektrolitlerin iyon iletkenliği, sıvı ve katı hâl elektrolitlere kıyasla hala düşüktür. Ancak bu durum kompozit malzemelerle geliştirilerek aşılmaktadır.

İyonik sıvılar

İyonik sıvılar, düşük buhar basınçlarına ve yüksek termal kararlılığa sahip elektrolitlerdir, yanıcılık riskini azaltır ve daha geniş bir çalışma sıcaklığı aralığı sağlarlar. İyonik sıvıların yanıcılık riskini azaltma ve daha geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilme gibi avantajları vardır. Elektrikli araçlarda ve yüksek performans gerektiren diğer uygulamalarda tercih edilmektedirler (Mossali *et al.* 2020).

Elektrolit teknolojileri, lityum-iyon pillerin performansını ve güvenliğini artırmaya yönelik en büyük yenilik alanlarından biridir. Gelecekteki araştırmalar, aşağıdaki yönle odaklanmaktadır:

- i) Yeni Katı Elektrolit Malzemeleri: Daha yüksek iyon iletkenliği sunan ve düşük maliyetli üretim süreçlerine sahip katı elektrolitler geliştirilmesi.
- ii) Elektrolit Stabilitésinin İyileştirilmesi: Elektrolit ile elektrot arasındaki reaksiyonları en aza indirerek çevrim ömrünün artırılması.
- iii) Çevresel Dostluk: Toksik ve yanıcı malzemelerin yerine tamamen biyolojik olarak parçalanabilir elektrolitler kullanılması.

Performans Karşılaştırmaları ve Uygulamalar

Lityum-iyon piller, enerji depolama teknolojilerindeki liderliklerini, performans özellikleri ve geniş uygulama yelpazesi sayesinde korumaktadırlar. Bu başlık altında, lityum-iyon pillerin çeşitli malzeme türlerine göre performans farklılıkları ve bu pillerin farklı sektörlerdeki uygulama alanları ele alınmıştır.

Performans karşılaştırmaları

Lityum-iyon pillerin performansı, kullanılan katot, anot ve elektrolit malzemelerine bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Bu farklılıklar enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, şarj-deşarj hızı ve güvenlik gibi kritik parametrelerle ilişkilidir.

Katot Malzemeleri Performansı: Lityum-Kobalt Oksit (LiCoO_2) yüksek enerji yoğunluğu (200 Wh/kg) ve hücre voltajı (3.7V) sunar, ancak çevrim ömrü nispeten kısadır ve kobaltın yüksek maliyeti sürdürülebilirlik açısından dezavantajdır (Di Lecce *et al.* 2017). Nikel-Manganez-Kobalt (NMC)'lerden olan NMC-811 gibi yüksek nikel içeriğine sahip kimyalar, enerji yoğunluğunu artırırken maliyeti ve kobalt bağımlılığını azaltır. Çevrim ömrü 2000 döngüye kadar ulaşabilir (Zhao and Lehto, 2020). Lityum-Demir Fosfat (LFP) ise daha düşük enerji yoğunluğuna (120-150 Wh/kg) rağmen, mükemmel termal stabilite ve uzun çevrim ömrü (3000 döngü) sağlar. Bu nedenle, enerji depolama sistemleri ve ticari elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılır.

Anot Malzemeleri Performansı: Teorik kapasitesi 372 mAh/g olan grafit, ticari pillerde yaygın olarak kullanılır. Kimyasal kararlılığı ve uygun maliyeti nedeniyle tercih edilir. Silikon ise grafitte kıyasla 10 kat daha yüksek kapasite sunar ancak hacim genişlemesi sorunu çevrim ömrünü sınırlayabilir (Mossali *et al.* 2020).

Elektrolit Performansı: Sıvı elektrolitler yüksek iyon iletkenliği sağlar, ancak düşük termal kararlılık ve yanıcılık riski taşır. Katı hâl elektrolitler ise daha yüksek güvenlik ve enerji yoğunluğu sunar, ancak düşük iyon iletkenliği hala bir engel oluşturmaktadır (Liu *et al.* 2018).

Aşağıda, farklı malzemelerin performans karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 6. Farklı Malzemelerin Performans Karşılaştırması

Malzeme Türü	Örnek Malzeme	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Çevrim Ömrü (Döngü)	Kaynaklar
Katot	LiCoO ₂	200	1500	Di Lecce <i>et al.</i> 2017
Katot	NMC-811	250	2000	Zhao and Lehto, 2020
Anot	Grafit	150	3000	Mossali <i>et al.</i> 2020
Anot	Silikon Bazlı	350	1000	Zhao and Lehto, 2020

Uygulama alanları

Lityum-iyon pillerin esnek yapısı, onları çok çeşitli sektörlerde vazgeçilmez bir enerji depolama çözümü haline getirmiştir. Lityum-iyon piller, elektrikli araçların (EV) kalbinde yer almaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu, araçların daha uzun menzil sunmasını sağlar. Tesla Model S gibi araçlar, NMC ve LFP gibi malzemelere dayalı pil teknolojilerini kullanmaktadır. Yeni nesil elektrolitler ve anot malzemeleri, şarj süresini kısaltarak kullanıcı deneyimini artırmaktadır (Duffner *et al.* 2021).

Güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları, süreksizlik sorunu nedeniyle enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duyar. LFP piller, uzun ömürleri ve termal kararlılıkları sayesinde sabit enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Şebeke entegrasyonu ile lityum-iyon piller, şebekedeki enerji dalgalanmalarını dengeleyerek enerji güvenliğini artırır.

Cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar ve tabletler gibi taşınabilir elektronik cihazlar, lityum-iyon pillerin hafifliği ve enerji yoğunluğu sayesinde daha uzun kullanım süresi sunmaktadır. Apple, Samsung ve diğer büyük üreticiler bu pilleri standart enerji kaynağı olarak kullanmaktadır (Alias and Mohamad, 2015).

Lityum-iyon piller, düşük ağırlık ve yüksek enerji yoğunluğu avantajlarıyla insansız hava araçları (drone) ve uzay görevleri için ideal bir enerji kaynağıdır. NASA'nın uzay görevlerinde lityum-iyon pillerden faydalanılmaktadır.

Taşınabilir medikal cihazlar (ör. kalp pilleri, ventilatörler) lityum-iyon pillerle çalışır. Bu piller, taşınabilirlik, güvenilirlik ve uzun ömür sunar.

SONUÇ

Lityum-iyon piller, enerji depolama teknolojilerinde devrim yaratmış ve modern dünyada taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara, yenilenebilir enerji depolama sistemlerinden tıbbi cihazlara kadar geniş bir uygulama yelpazesinde vazgeçilmez bir rol oynamıştır. Bu çalışma, lityum-iyon pillerin tarihsel gelişimini, malzeme bileşenlerinin performanslarını, elektrolit yeniliklerini ve geri dönüşüm teknolojilerini ele alarak, bu alandaki mevcut durumu ve gelecekteki potansiyeli kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir.

Tezin bulguları, lityum-iyon pil teknolojisinin başarısında anot ve katot malzemelerinin kritik bir rol oynadığını açıkça göstermektedir. Katot malzemeleri arasında yer alan LiCoO_2 , yüksek enerji yoğunluğu ile dikkat çekerken, NMC ve LFP gibi alternatif malzemeler, maliyet ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Öte yandan, silikon bazlı anotlar, enerji yoğunluğunu artırma potansiyeline sahip olmakla birlikte, mekanik stabilite sorunlarının çözülmesiyle ticari anlamda daha yaygın bir şekilde kullanılabilir hale gelecektir.

Elektrolit teknolojilerindeki yenilikler, pil güvenliği ve performansını artırmada büyük bir rol oynamaktadır. Katı hâl elektrolitlerinin geliştirilmesi, termal kaçak riskini azaltarak daha güvenli ve enerji yoğunluğu yüksek pillerin üretilmesini mümkün kılmıştır. Su bazlı elektrolitler ve iyonik sıvılar gibi alternatif elektrolit türleri ise çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik önemli adımlar atmıştır. Bu gelişmeler, lityum-iyon pillerin hem ticari hem de araştırma amaçlı kullanımlarında önemli bir ilerleme sağlamaktadır.

Geri dönüşüm teknolojileri, lityum-iyon pillerin sürdürülebilirliğinde kritik bir faktördür. Hidrometalurji ve pirometalurji gibi geleneksel yöntemler, değerli metallerin geri kazanılmasında etkili olmuş, ancak enerji yoğunluğu ve çevresel etkiler açısından sınırlamalar taşımaktadır. Elektrokimyasal geri dönüşüm gibi yeni nesil yöntemler ise daha çevre dostu ve verimli bir alternatif sunarak, gelecekte geri dönüşüm süreçlerinin daha ekonomik ve sürdürülebilir olmasına katkıda bulunacaktır. Ancak, lityum-iyon pillerin geri dönüşüm oranlarını artırmak ve ekonomik uygulanabilirliği sağlamak için daha fazla inovasyona ihtiyaç vardır.

Bu bulgular, lityum-iyon pillerin enerji depolama teknolojilerindeki lider konumunu pekiştirirken, bu teknolojilerin gelecekteki potansiyelini ve sürdürülebilirliğini artırmak için daha fazla inovasyonun gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle, geri dönüşüm ve sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlar, bu teknolojinin çevresel etkilerini minimize etmek ve uzun

vadede enerji sektörüne olan katkısını artırmak açısından büyük önem taşımaktadır. Gelecekteki araştırmaların, yeni malzemeler ve yenilikçi süreçler üzerinde yoğunlaşarak, lityum-iyon pillerin performansını ve çevresel uyumunu daha da artırması beklenmektedir.



KAYNAKLAR

- Aktaş, S., (2007). Bitmiş Lityum İyon İkincil Pillerden Metalik Değerlerin Geri Kazanımı ve Fray-Farthing-Chen (FFC) Cambridge Prosesi ile Metalik Kobalt Üretimi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alias N, Mohamad AA. (2015). Advances of aqueous rechargeable lithium-ion battery: A review. *Journal of Power Sources*. 15;274:237-51.
- Andres, R. J., Fielding, D. J., Marland, G., Boden, T. A., Kumar, N., & Kearney, A. T. (1999). Carbon dioxide emissions from fossil-fuel use, 1751–1950. *Tellus B*, 51(4), 759-765.
- Anonymous <http://aadvikpatel.zohosites.com/blogs/post/Lithium-Ion-Battery-What-Are-The-Types> (10 Ocak 2020).
- Anonymous [http://en.wikipedia.org/wiki/Separator_\(electricity\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Separator_(electricity)) (20.01.2024)
- Anonymous <http://www.thinkingsidewayspodcast.com/tag/ancient-electricaldevice/> (04.12.2023)
- Anonymous https://en.wikipedia.org/wiki/Daniell_cell (04.12.2023)
- Anonymous <https://www.youtube.com/watch?v=vf98COBvLO0&t=294s> (04.12.2023)
- Anonymous. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Book%3A_Chem1_\(Lower\)/16%3A_Electrochemistry/16.07%3A_Timeline_of_Battery_Development](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Book%3A_Chem1_(Lower)/16%3A_Electrochemistry/16.07%3A_Timeline_of_Battery_Development) (04.12.2023)
- Baker, J. (2008). New technology and possible advances in energy storage. *Energy Policy*, 36(12), 4368–4373.
- Barghamadi M., Kapoor A., and Wen C., “A review on Li-S batteries as a high efficiency rechargeable lithium battery,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 160, no. 8, pp. A1256–A1263, 2013.
- Barsukov Y., Qian J., (2013), “Battery Power Management for Portable Devices”, 1st Edition, Artech Hause.
- Braun, V., Jung, C., James, P. H., William, P. K., Huigang, Z. (2012). High power rechargeable batteries, *Curr. Opin Solid St M*, 1-4.
- Bruce P. G., Freunberger S. A., Hardwick L. J., and Tarascon J.-M. (2012). “Li–O₂ and Li–S batteries with high energy storage,” *Nature Mater.*, vol. 11, no. 1, pp. 19–29.
- Burns, J. C., Kassam, A., Sinha, N. N., Downie, L. E., Solnickova, L., Way, B. M., and Dahn, J. R. (2013). Predicting and extending the lifetime of li-ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 160(9), A1451–A1456.
- Ceylan M., (2013), “Lityum-iyon Tabanlı Pillerin Elektriksel Eşdeğer Modelinin Çıkartılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Chemali, Ephrem, *et al.* "Electrochemical and electrostatic energy storage and management systems for electric drive vehicles: State-of-the-art review and future trends." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 4.3 (2016): 1117-1134.
- Dagger, T., Rad, B. R., Schappacher, F. M., and Winter, M. (2018). Comparative performance evaluation of flame retardant additives for lithium ion batteries—I. Safety, chemical and electrochemical stabilities. *Energy Technology*, 6(10), 2011–2022.

- Denholm, E. E. P., Kirby, B., Milligan, M. (January 2010) The role of energy storage with renewable electricity generation.
- Di Lecce D, Verrelli R, Hassoun J. (2017). Lithium-ion batteries for sustainable energy storage: recent advances towards new cell configurations. *Green Chemistry*.19(15):3442-67.
- Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., and Villafañila-Robles, R. (2012). A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2154–2171.
- Dikmen, İ. C., Kartaca, K., Karadağ, T., & Abbasov, T. (2018). Pil teknolojilerine genel bir bakış. In: A. Atmaca (Eds.), 3rd International Energy & Engineering Congress Proceeding Book
- Duffner F, Kronmeyer N, Tübke J, Leker J, Winter M, Schmuck R. (2021 Feb). Post-lithium-ion battery cell production and its compatibility with lithium-ion cell production infrastructure. *Nature Energy*. 6(2):123-34.
- Fisher, R. a.; Watt, M.R.; Jud Ready, W.; Cho, S. Il; Lee, S.B.; Snook, G. a.; Kao, P.; Best, A.S.; Lota, G.; Fic, K.; Frackowiak, E.; Béguin, F.; Stoller, M.D.; Ruoff, R.S.; (2013). Recent advances in polyaniline composites with metals, metalloids and nonmetals. *Energy & Environmental Science*, 3, (6), 4889–4899.
- Hu, Y.S., Adelhelm, P., Smarsl Y, B.M., Hore, S., Antonietti, M., Maier, J. (2007). Synthesis of hierarchically porous carbon monoliths with highly ordered microstructure and their application in rechargeable lithium batteries with high-rate capability. *Adv. Funct Mater*; 17, 1873–8.
- Keleş, D. Ö., Polat, B. D. and Sezgin, N. (2013). “İkincil Lityum İyon Piller İçin Elektron Demeti Yöntemi ile Cusn Ve Cusi Alaçımli Düzenli Nano Gözeneklere Sahip Anotların Üretimi Ve Karakterizasyonu”, Proje No: 110M148
- Kılıç, F., (2008). Bazı lityum Metal Vanadat İçerme Bileşiklerinin Sentezi, Karakterizasyonu ve Elektrokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, Kahramanmaraş, 3-15.
- Kiehne, H. A. (Ed.). (2003). *Battery technology handbook* (2nd ed). Marcel Dekker, 122.
- Kul, B. (2020). Geçmişten Günümüze Piller. *Takvim-i Vekayi*, 8(1), 104-115.
- Liu K, Liu Y, Lin D, Pei A, Cui Y. (2018 Jun). Materials for lithium-ion battery safety. *Science advances*. 22;4(6):eaas9820.
- Luo, X., Wang, J., Dooner, M., and Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511–536.
- Marsal, P. A., River, R., Kordesch, K., and Urry, L. F. (1960). Dry cell (U.S. Patent No. 2,960,558). U.S. Patent and Trademark Office.
- Miller, P., (2015). Automotive Lithium-Ion Batteries, *Johson Matthey Technology Review*, 59(1), 4-13.
- Mizushima, K., Jones, P. C., Wiseman, P. J., and Goodenough, J. B. (1980). Li_xCoO_2 ($0 < x < 1$): A new cathode material for batteries of high energy density. *Materials Research Bulletin*, 15(6), 783–789.
- Mossali E, Picone N, Gentilini L, Rodríguez O, Pérez JM, Colledani M. (2020 Jun). Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments. *Journal of environmental management*. 15;264:110500.

- Naichao, L., Martin, C. R., Scrosati, B., (2001). Nanomaterial-based Li-ion battery electrodes, 97–98, 244-246.
- Nazri, G.-A. (2009). Lithium batteries: Science and technology (1. softcover printing). Springer, 8-11.
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., Yushin G., (2015). Li-ion Battery Materials: Present And Future, *Materials Today*, 18, 252-264.
- Noh, M., Kwon, Y., Lee, H., Cho, J., Kim, Y., and Kim, M. G. (2005). Amorphous carbon-coated tin anode material for lithium secondary battery. *Chemistry of Materials*, 17(8), 1926–1929.
- Ogura, K., & Kolhe, M. L. (2017). Battery technologies for electric vehicles. In: T. Muneer, M. L. Kolhe, & A. Doyle (Eds.), *Electric Vehicles: Prospects and Challenges* (pp. 139-167). Elsevier Inc. doi:10.1016/B978- 0-12-803021-9.00004-5
- Ozawa, K. (2009). Lithium ion rechargeable batteries. Wiley-VCH, 5-8.
- Paravasthu R. (2012). Synthesis and Characterization of Lithium-Ion Cathode Materials In The System $(1-x-y) \text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2 \cdot x\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot y\text{LiCoO}_2$ ''Yüksek lisans tezi, Colorado State University, Colorado
- Paravasthu R. (2012). Synthesis and Characterization of Lithium-Ion Cathode Materials In The System $(1-x-y) \text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2 \cdot x\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot y\text{LiCoO}_2$ ''Yüksek lisans tezi, Colorado State University, Colorado.
- Piłatowicz, G.; Marongiu, A.; Drillkens, J.; Sinhuber, P.; ve Sauer, D.U. (2015). A critical overview of definitions and determination techniques of the internal resistance using lithium-ion, lead-acid, nickel metal-hydride batteries and electrochemical double-layer capacitors as examples. *Journal of Power Sources*, 296, 365–376.
- Poullikkas, A. (2013). A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 27, 778-788.
- Reddy, T., and Linden, D. (2010). *Linden's handbook of batteries* (4th edition). McGraw-Hill Professional Publishing, 540.
- Riberio, J.F., Silva, M.F., Carmo, J.P., Gonçalves, L.M., Silva, M.M., Coreia, J.H. (2013). 20. Solid-State Thin-Film Lithium Batteries for Integration in Microsystems. *Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology*, 20, 575-619.
- Tarascon, J.M. (2001). Batteries for transportation now and in the future, 33, 1-30.
- Tarascon, J.M. and Armand, M. (2001). Issues and Challenges Facing Rechargeable Lithium Batteries, *Nature*, 414, 359-367.
- Turner, J. A. (1999). A realizable renewable energy future. *Science*, 285(5428), 687-689.
- Van Schalkwijk, W. A., and Scrosati, B. (Eds.). (2002). *Advances in lithium-ion batteries*. Springer US, 30-42.
- Von Handorf, D. E. (2002). The baghdad battery – myth or reality. *Platin and Surface Finishing*, 89(5), 84-87.
- Wakihara, M. (2001). *Recent Developments in Lithium Ion Batteries*, Tokyo 152-8552, Japan, Feb.
- Whittingham, M. S. (2012). History, evolution, and future status of energy storage. *Proceedings of the IEEE*, 100(Special Centennial Issue), 1518-1534.
- Whittingham, M. S., and Fanwoodç, N.J. (1977). Preparation of Stoichiometric Titanium Disulfide (U.S. Patent No. 4,007,055). U.S. Patent and Trademark Office.

- Winter, M.; ve Brodd, R.J., (2004). What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chemical Reviews*, 104, (10), 4245–4269.
- Yoshio, M., Brodd, R. J., and Kozawa, A. (Eds.). (2009). *Lithium-ion batteries: Science and technologies*. Springer, 4.
- Young, K., Fierro, C., & Fetcenko, M. A. (2011). Status of Ni/MH battery research and industry. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 18-20, 24-28 July, Detroit, MI, USA. doi:10.1109/PES.2011.6039071
- Young, K., Wang, C., Wang, L. Y., & Strunz, K. (2013). Electric Vehicle Battery Technologies. In: R. GarciaValle, J. A. P. Lopes (Eds.), *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks* (pp. 15-56). doi:10.1007/978-1-4614-0134-6
- Zhao X, Lehto VP. (2020 Oct). Challenges and prospects of nanosized silicon anodes in lithium-ion batteries. *Nanotechnology*. 26;32(4):042002.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Hüseyin PEHLİVAN
E- mail	
Eğitim	
Lise	
Lisans	
Lisans	
Yüksek Lisans	
Yabancı Dil	
İngilizce	İyi
Tezden Üretilen Yayınlar	
Bildiri	