

Lityum İyon Pillerin Tarihten Bugüne Gelişimi ve Son Teknolojide Geline Nokta

Development of Lithium Ion Batteries From the History of Batteries to the Present and the Latest Technology Statement

Hüseyin PEHLİVAN

Atatürk University, Department of Physics,
Faculty of Sciences, Erzurum, Turkey



Erdoğan ÖZ

Atatürk University, Department of Physics,
Faculty of Sciences, Erzurum, Turkey



Muhammet YILDIRIM

Atatürk University, Institute of Natural and
Applied Sciences, Department of Physics,
Erzurum, Turkey



Öz

Bu derleme makalesi, lityum iyon pillerin antik çağlardan günümüze kadar olan tarihsel gelişimini, çalışma prensiplerini, avantajlarını, dezavantajlarını ve gelecekteki potansiyelini incelemektedir. Lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve düşük kendi kendine deşarj oranı gibi avantajları sayesinde taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara ve yenilenebilir enerji depolama sistemlerine kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bu teknolojinin geleceği, malzeme bilimi, pil tasarımı ve üretim süreçlerindeki yeniliklerle şekillenecektir. Katı hal piller, lityum-sülfür piller ve sodyum-iyon piller gibi alternatif teknolojiler de gelecekte enerji depolama alanında önemli bir rol oynayabilir.

Anahtar Kelimeler: Lityum iyon piller, enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji, batarya teknolojileri.

Abstract

This review article examines the historical development of lithium-ion batteries from antiquity to the present day and their working principles, advantages, disadvantages, and future potential. Lithium-ion batteries are used in various areas, from portable electronic devices to electric vehicles and renewable energy storage systems, thanks to their advantages such as high energy density, long cycle life, and low self-discharge rate. Innovations in materials science, battery design, and manufacturing processes will shape the future of this technology. Alternative technologies such as solid-state batteries, lithium-sulfur batteries, and sodium-ion batteries may also play an important role in the field of energy storage in the future.

Keywords: Lithium-ion batteries, energy storage systems, renewable energy, battery technologies.

Sorumlu Yazar/Corresponding Author:

H. Pehlivan

E-mail: yildirim_pehlivan@hotmail.com

Geliş Tarihi/Received 31.10.2024

Kabul Tarihi/Accepted 22.11.2024

Yayın Tarihi/ 12.12.2024

Publication Date

Cite this article

Pehlivan, H., Öz, E., & Yıldırım, M., (2024)

Development of Lithium Ion Batteries

From the History of Batteries to the

Present and the Latest Technology

Statement. Journal of Anatolian

Physics and Astronomy, 3(2), 83-94.



Content of this journal is licensed under a Creative
Commons Attribution-Noncommercial 4.0
International License.

Giriş

Modern dünyanın hızla artan enerji talebi, yeni ve verimli enerji depolama çözümlerinin geliştirilmesini kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu arayışta, lityum iyon piller yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve hafiflikleri gibi özellikleriyle öne çıkan bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır (Armand & Tarascon, 2008). Taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara ve yenilenebilir enerji depolama sistemlerine kadar geniş bir yelpazede kullanılan lityum iyon piller, enerji depolama teknolojilerinde devrim yaratmıştır ve yaşam tarzımızı derinden etkilemiştir (Goodenough & Park, 2013).

Lityum iyon pillerinin bu denli yaygınlaşmasının ardında yatan temel etkenlerden biri, sunduğu benzersiz avantajlardır. Li, herhangi bir element arasında en düşük indirgeme potansiyeline sahiptir ve Li bazlı pillerin mümkün olan en yüksek hücre potansiyeline sahip olmasını sağlar (M. Li vd., 2018). Ayrıca, Li üçüncü en hafif elementtir ve herhangi bir tek yüklü iyonun en küçük iyonik yarıçaplarından birine sahiptir (Winter vd., 2018). Bu faktörler, Li bazlı pillerin yüksek gravimetrik ve hacimsel kapasiteye ve güç yoğunluğuna sahip olmasını sağlar (Nitta vd., 2015). Buna ek olarak, düşük kendi kendine deşarj oranları, cihazların şarj edilmeden daha uzun süre bekletilebilmesini sağlar. Bu özellikler, lityum iyon pillerini özellikle taşınabilir elektronik cihazlar ve elektrikli araçlar gibi uygulamalar için ideal bir seçenek haline getirir.

Tüm piller katot ve anottan oluşan iki elektrot ve bu elektrotları iyonik olarak birleştiren elektrolitten oluşur. Her iki elektrot kimyasal yapılarından kaynaklanan kimyasal potansiyel farkına sahiptirler ve bu sayede elektrotlar bir dış devre ile bağlandığında elektronların akışı sağlanır ve bu sayede pil şarj ve deşarj edilebilir. Pillerin içerisindeki bu bileşenlerin özellikleri pillerin çalışma voltajları, kapasiteleri veya çalışma ömürleri gibi birçok önemli özelliği belirler. Örneğin katot olarak LiNiO_2 bileşiği kullanılan bir Li-iyon pilde kapasite 200 mAh/g (Dong vd., 2024) iken LiFePO_4 olan bir pilde yaklaşık 150 mAh/g (Abdelaal & Alkhedher, 2024) olarak ölçülür. Bu nedenle pillerde kullanılan bileşenler seçilirken bunların fiziksel ve kimyasal özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Lityum iyon pillerinin yaygın kullanımı, beraberinde bazı zorlukları da getirmektedir. Örneğin pil üretiminde kullanılan hammaddeler giderek tükenmekte ve bunun sonucunda maliyet artışı yaşanmaktadır (Orangi vd., 2024). Buna ek olarak bileşenlerin oksidasyona eğilimli olması sonucu kimyasal reaksiyonlar sonucunda yanma veya patlama riski taşınması ortadaki diğer problemlerden biridir (Chombo & Laonual, 2020). Elektrolit bileşenlerinin geliştirilmesi, elektrotta kullanılan malzemelerin düşük maliyetlilerle değiştirilmesi sentez yöntemlerinin geliştirilmesi gibi çalışmalar bu problemlerin çözümü için bulunan yollardan bazılarıdır. Örneğin Ahmed ve araştırma grubu katot malzemesi sentezi için yeni bir teknik olan eş-çökertme yöntemini kullanarak $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ katot materyalinin üretim maliyetini yaklaşık olarak %19 oranında azalttığını rapor etmiştir (Ahmed vd., 2017).

Bu derleme makalesi, lityum iyon pillerinin çok yönlü bir incelemesini sunmayı amaçlamaktadır. Tarihsel gelişiminden başlayarak, çalışma prensipleri, avantajları, dezavantajları ve gelecekteki potansiyelleri detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Ayrıca, lityum iyon pillerin geri dönüşümü ve sürdürülebilirlik konuları da incelenecek ve bu teknolojinin gelecekteki yönüne ışık tutulacaktır.

1. Pillerin Tarihsel Gelişimi

Elektrokimyasal enerji depolama kavramı, antik çağlara kadar uzanmaktadır. Mezopotamya'da MÖ 250 - MS 640 yılları arasında yapıldığı tahmin edilen Bağdat Pili, bu alandaki en eski örneklerden biridir (Lu & Anariba, 2014). Bir kil kap, bir bakır tüp ve bir demir çubuktan oluşan bu gizemli alet, elektro kaplama veya tıbbi amaçlar için kullanılmış olabileceği düşünülmektedir. Her ne kadar işlevi tam olarak anlaşılmasa da Bağdat Pili, insanlığın elektriği anlama ve kullanma yolculuğunda önemli bir kilometre taşıdır ve günümüz pil teknolojilerinin temelini oluşturan elektrokimyasal prensiplerin antik çağlarda dahi bilindiğini göstermektedir.

Modern pil teknolojisinin doğuşu, 1800 yılında Alessandro Volta'nın volta pilini icat etmesiyle gerçekleşmiştir. Volta, çinko ve bakır diskleri tuzlu suya batırılmış bezlerle ayırarak bir dizi elektrokimyasal hücre oluşturmuş ve bu sayede sürekli elektrik akımı üretebilen bir düzenek geliştirmiştir (Cecchini & Pelosi, 1992). Volta pili, elektrik alanında bir devrim yaratarak, elektrikli telgraf, elektroliz ve elektrikli aydınlatma gibi yeni teknolojilerin gelişmesine zemin hazırlamıştır. Ayrıca, Volta'nın çalışmaları, elektrokimya alanındaki araştırmaları hızlandırmış ve daha gelişmiş pil teknolojilerinin geliştirilmesine yol açmıştır.

19. yüzyıl, pil teknolojilerinde önemli ilerlemelerin kaydedildiği bir dönem olmuştur. 1836 yılında John Frederic Daniell tarafından icat edilen Daniell pili, volta piline göre daha kararlı bir voltaj sağlamıştır (Yuan vd., 2024). 1859 yılında ise Gaston Planté tarafından geliştirilen kurşun-asit pil, şarj edilebilir olması özelliğiyle öne çıkmış ve günümüzde hala otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu dönemde geliştirilen diğer önemli pil teknolojileri arasında Georges Leclanché

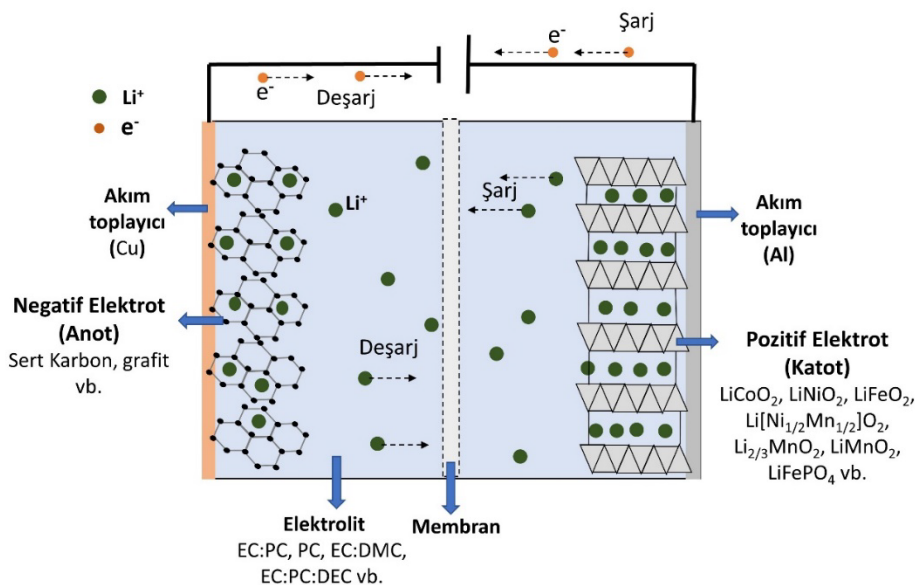
tarafından 1866 yılında icat edilen Leclanché pili ve Carl Gassner tarafından 1886 yılında geliştirilen çinko-karbon pil bulunmaktadır (Kordesch & Taucher-Mautner, 2009). Bu piller, taşınabilir elektrikli cihazların gelişimine katkıda bulunmuş ve günlük yaşamda elektriğin kullanımını yaygınlaştırmıştır.

20. yüzyıl, taşınabilir elektronik cihazların ve elektrikli araçların gelişmesiyle birlikte daha gelişmiş pil sistemlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Bu dönemde nikel-kadmiyum (NiCd) (Tsai & Chan, 2013), nikel-metal hidrit (NiMH; Arya & Verma, 2020) ve lityum iyon piller gibi yeni pil teknolojileri ortaya çıkmıştır. Lityum iyon piller, ilk olarak 1970'lerde Stanley Whittingham'ın çalışmalarıyla araştırılmaya başlanmış (Crabtree vd., 2015; Whittingham, 1974) ve 1991 yılında Sony tarafından ticari olarak piyasaya sürülerek taşınabilir elektronik cihazlar ve daha sonra elektrikli araçlar için vazgeçilmez bir enerji kaynağı haline gelmiştir (Mizushima vd., 1980). Bu dönemde pil teknolojilerindeki gelişmeler, elektronik cihazların minyatürleştirilmesi ve performanslarının artırılmasında önemli rol oynamıştır.

Günümüzde ise lityum iyon pil teknolojisi, baş döndürücü bir hızla ilerlemeye devam etmekte ve enerji depolama alanında sınırları zorlamaktadır. Günümüzde, lityum iyon piller, akıllı telefonlar ve dizüstü bilgisayarlar gibi günlük hayatta kullandığımız elektronik cihazlardan, elektrikli araçlara ve yenilenebilir enerji depolama sistemlerine kadar geniş bir yelpazede karşımıza çıkmaktadır. Bu hızlı gelişim, farklı ihtiyaçlara cevap verebilen çeşitli lityum iyon pil kimyalarının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Örneğin, taşınabilir elektronik cihazlarda ağırlıklı olarak lityum kobalt oksit (LiCoO_2) katotlu piller kullanılırken (Lyu vd., 2021), elektrikli araçlarda daha yüksek enerji yoğunluğu ve güvenlik sağlayan lityum demir fosfat (LiFePO_4) (Zhu & Chen, 2020) ve lityum nikel mangan kobalt oksit (NMC) katotlu piller tercih edilmektedir (Iturrodonbeitia vd., 2017). Bunun yanı sıra, lityum iyon piller, rüzgar, güneş jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının ürettiği enerjiyi depolama, elektrikli araçlar, portatif elektronik cihazlar gibi çok geniş alanlarda kullanılmaktadır (Kim vd., 2020). Lityum iyon pillerin bu denli yaygınlaşması, teknolojinin sunduğu yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve tasarım esnekliği gibi avantajların bir sonucudur. Ancak, bu teknolojinin maliyet, güvenlik ve sürdürülebilirlik gibi zorlukları aşarak gelecekte de enerji depolama alanındaki lider konumunu koruyabilmesi için araştırma ve geliştirme çalışmalarına devam edilmesi gerekmektedir.

2. Li-iyon Pillerin Çalışma Prensibi

Lityum iyon piller, lityum iyonlarının anot ve katot arasında tersinir bir şekilde hareket etmesi prensibiyle çalışır (Şekil 1). Şarj işlemi sırasında, harici bir güç kaynağı tarafından sağlanan elektrik enerjisi, lityum iyonlarının anottan ayrılıp elektrolit aracılığıyla katoda göç etmesine neden olur. Katotta, lityum iyonları katot malzemesinin kristal yapısına yerleşir. Deşarj işlemi sırasında ise, katotta depolanan lityum iyonları tekrar elektrolit aracılığıyla anota geri döner ve anot malzemesine yerleşir (Chawla vd., 2019). Bu iyon hareketi, pilin dış devresinde elektron akışına sebep olur ve böylece elektrik enerjisi üretilir. Lityum iyonlarının anot ve katot arasında bu şekilde ileri geri hareketi, pilin tekrar tekrar şarj edilip deşarj edilmesini sağlar. Pilin voltajı ise, kullanılan anot ve katot malzemelerinin elektrokimyasal potansiyelleri arasındaki farka bağlıdır.



Şekil 1. Lityum iyon pillerin bileşenleri ve çalışma mekanizması.

Lityum iyon pillerin temel bileşenleri; anot, katot, elektrolit ve ayırıcıdır.

Anot, pilin negatif elektrotudur ve genellikle grafit gibi karbon bazlı malzemelerden yapılır. Anotun görevi, lityum iyonlarını deşarj sırasında depolamak ve şarj sırasında serbest bırakmaktır. Bazı yaygın kullanılan anot materyalleri ve fiziksel özellikleri Tablo 1’de görülmektedir.

Tablo 1. Farklı anot malzemelerinin enerji yoğunluğu ve karşılık gelen ortalama voltajı.

Malzeme	Özgül Kapasite (mAhg ⁻¹)	Raporlanan Döngü Ömrü	Ortalama Gerilim (V)	Kaynak
Grafit (G)	372	>1000	0,1	(Cen vd., 2018)
Silisyum Bazlı (Si)	4200	100-200	0,4	(Marino vd., 2012)
Fosfor Bazlı (P)	2595	-	0,8	(Aslam vd., 2021)
Lityum Metal (Li)	3860	300	0,0	(Choi vd., 2020)
Titanyum Dioksit Bazlı	335	-	1,7	(Luo vd., 2012)

Katot, pilin pozitif elektrotudur ve genellikle lityum kobalt oksit (LiCoO₂), lityum mangan oksit (LiMn₂O₄) veya lityum demir fosfat (LiFePO₄) gibi lityum içeren metal oksitlerden yapılır. Katot, şarj sırasında lityum iyonlarını depolar ve deşarj sırasında serbest bırakır. Yaygın kullanılan bazı katot materyalleri ve fiziksel özellikleri Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2. Li iyon bataryalarda en sık kullanılan katot malzemeleri ve bazı fiziksel özellikleri (Costa vd., 2019).

Katot Aktif Malzemesi	Kristal Sistemi/Uzay Grubu (Nokta Grubu)	Özgül Kapasite (mAh-g ⁻¹)	Tipik Voltaj Aralığı (V)
LiCoO ₂	Ortorombik/R3m [C _{3v}]	274	2,5-4,45
LiFePO ₄	Ortorombik/Pnma [D ₂ ^h]	170	2,5-4,2
LiMn ₂ O ₄	Kübik/Fd3m [O ^h]	148	3,0-4,3
LiNiO ₂	Trigonal/R3m [C _{3v}]	275	3,0-4,3
LiNi _{1-x} Co _x O ₂ (0.2 ≤ x ≤ 0.5)	Rhombohedral/R3m [C _{3v}]	~275	3,5-4,3
LiNi _{1/3} Mn _{1/3} Co _{1/3} O ₂	Rhombohedral/R3m [C _{3v}]	278	2,3-4,3
LiNi _{0.5} Mn _{1.5} O ₂	Trigonal/R3m [C _{3v}]	147	3,5-4,9

Elektrolit, Lityum-iyon pil performansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Son dönemde, özellikle düşük sıcaklıklarda çalışan piller için özel olarak tasarlanmış elektrolitler üzerine yoğunlaşmış araştırmalar bulunmaktadır (Das vd., 2023). Sıvı elektrolitler, LIB’lerde en yaygın kullanılan elektrolit türüdür. Ancak düşük sıcaklıklarda, viskozite artışı, iyon iletkenliğinin düşmesi ve katı elektrolit ara yüzey (SEI) oluşumu gibi sorunlarla karşılaşılır. Bu durum, pilin iç direncini yükselterek performansını düşürür. Bu nedenle, düşük sıcaklıklarda çalışan LIB’ler için uygun elektrolit mühendisliği çalışmaları oldukça önemlidir.

Sıvı elektrolitler genellikle üç ana bileşenden oluşur: lityum tuzu, çözücü ve katkı maddeleri. Çözücü, elektrolitin temel bileşenidir ve genellikle dietil karbonat (DEC), dimetil karbonat (DMC), etilen karbonat (EC), propilen karbonat (PC) ve vinil karbonat (VC) gibi organik karbonatlardan oluşur. Düşük sıcaklıklarda daha iyi performans elde etmek için, metil asetat (MA), metil propiyonat (MP), etil asetat (EA) ve propil asetat (PA) gibi daha düşük donma noktalı esterler gibi alternatif çözücüler araştırılmaktadır (Haregewoin vd., 2016).

Elektrolitlerde kullanılan farklı tuzlar ve çözücü karışımlarının pil performanslarını etkilediği yapılan çalışmalar sonucunda rapor edilmiştir. Örneğin 1M LiPF₆ tuzunun içerisinde çözüldüğü Fluoroethylene karbonat (FEC), DMC, EC ve EMC çözücülerinin farklı kombinasyonları LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O₂ (NCM523) katot materyali ve Si/Gr anot materyali olarak kullanılan bir pilde elektrolit olarak denenmiş ve FEC:DMC karışımının diğer karışımlara göre daha yüksek kapasite sağladığı rapor edilmiştir (Zhao vd., 2021).

Ayırıcı, anot ve katot arasında fiziksel bir bariyer oluşturarak kısa devreyi önlerken, lityum iyonlarının geçişine izin verir. Ayırıcının gözenekli yapısı, iyonların serbestçe hareket etmesini sağlarken, elektronik iletkenliği engelleyerek pilin güvenliğini sağlar (S. S. Zhang, 2007). Bu dört bileşen, birlikte çalışarak lityum iyon pilinin enerji depolama ve boşaltma fonksiyonlarını yerine getirmesini sağlar.

3. Li-iyon Bataryaların Avantaj ve Dezavantajları

Lityum iyon piller, günümüzde enerji depolama alanında en yaygın kullanılan teknolojilerden biri haline gelmiştir. Bu popülerliğin ardında yatan sebep, diğer pil türlerine göre sunduğu çok sayıda avantajdır. Bu avantajlar, lityum iyon pillerini taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara ve yenilenebilir enerji depolama sistemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesi için ideal bir seçenek haline getirir. Lityum iyon pillerin avantaj ve dezavantajları Tablo 3’de görülmektedir.

Lityum iyon pillerinin en önemli avantajlarından biri, yüksek enerji yoğunluğudur. Bu, belirli bir ağırlık veya hacim için diğer pil türlerine göre daha fazla enerji depolayabildikleri anlamına gelir. Yüksek enerji yoğunluğu, daha küçük ve hafif pillerin üretilmesini sağlar, bu da özellikle taşınabilir elektronik cihazlar ve elektrikli araçlar için önemlidir. Örneğin, bir lityum iyon pil, aynı ağırlıktaki bir kurşun-asit pile göre yaklaşık üç kat daha fazla enerji depolayabilir. Bu sayede, akıllı telefonlar ve dizüstü bilgisayarlar gibi cihazlar daha uzun süre şarj edilmeden kullanılabilir ve elektrikli araçlar daha uzun mesafeler kat edebilir (Niu vd., 2024).

Lityum iyon pillerin bir diğer önemli avantajı, uzun çevrim ömrüdür. Bir pilin çevrim ömrü, pilin kaç kez şarj edilip deşarj edilebileceğinin bir ölçüsüdür. Lityum iyon piller, diğer pil türlerine göre daha uzun çevrim ömrüne sahiptir, bu da pillerin daha uzun süre dayanmasını sağlar (J. Zhang vd., 2024). Örneğin, bir lityum iyon pil, tipik olarak bir kurşun-asit pile göre çok daha uzun döngülerde çalışabilir (Dufo-López vd., 2021). Bu, lityum iyon pillerin daha az sıklıkla değiştirilmesi gerektiği anlamına gelir, bu da hem maliyet tasarrufu sağlar hem de çevresel etkiyi azaltır.

Bunların yanı sıra, lityum iyon pillerin düşük kendi kendine deşarj oranı da önemli bir avantajdır. Kendi kendine deşarj, pillerin kullanılmadıkları zamanlarda bile enerji kaybetme eğilimidir (Babu, 2024). Lityum iyon piller, diğer pil türlerine göre çok daha düşük bir kendi kendine deşarj oranına sahiptir, bu da pillerin daha uzun süre şarjlı kalmasını sağlar (Dunn vd., 2011; Larcher & Tarascon, 2014). Bu özellik, lityum iyon pillerini, uzun süre kullanılmayan cihazlar veya acil durum güç kaynakları için ideal bir seçenek haline getirir.

Son olarak, lityum iyon piller hafıza etkisinden etkilenmezler. Hafıza etkisi, pillerin tam olarak deşarj edilmeden şarj edilmeleri durumunda kapasitelerinin azalmasıdır (Ventosa vd., 2016). Lityum iyon pillerde bu sorun yaşanmaz, bu da pillerin herhangi bir zamanda şarj edilebilmesini ve performanslarının etkilenmemesini sağlar (Sasaki vd., 2013).

Tüm bu avantajlar, lityum iyon pillerini günümüzde enerji depolama alanında lider konuma getirmiştir. Teknolojinin sürekli gelişmesiyle birlikte, lityum iyon pillerin gelecekte daha da yaygınlaşması ve daha da gelişmiş özelliklere sahip olması beklenmektedir.

Lityum iyon piller, enerji depolama alanında devrim yaratmış ve birçok avantaj sunmalarına rağmen, bazı dezavantajlara da sahiptirler. Bu dezavantajlar, özellikle maliyet, güvenlik ve çevresel etki gibi konularda yoğunlaşmaktadır.

Lityum iyon pillerin en önemli dezavantajlarından biri, yüksek maliyetleridir. Diğer pil türlerine kıyasla, lityum iyon pillerin üretimi daha pahalıdır. Bu durum, lityum iyon pillerin kullanıldığı ürünlerin fiyatlarını da etkilemektedir. Örneğin, elektrikli araçların yüksek maliyetinin önemli bir kısmı, lityum iyon pillere atfedilebilir. Ayrıca, lityum iyon pillerin ömrü sınırlıdır ve belirli bir süre sonra değiştirilmeleri gerekir. Bu da ek bir maliyet unsuru oluşturur. Maliyetlerin düşürülmesi, lityum iyon pillerin daha yaygın olarak kullanılabilmesi için önemli bir hedeftir ve bu alanda araştırmalar devam etmektedir.

Bir diğer önemli dezavantaj ise güvenlik konusudur. Lityum iyon piller, aşırı şarj, aşırı deşarj, aşırı ısınma veya fiziksel hasar gibi durumlarda güvenlik sorunları oluşturabilir (Chombo & Laonual, 2020). Bu durumlar, pilin aşırı ısınmasına, alev almasına ve hatta patlamasına neden olabilir. Bu nedenle, lityum iyon pillerin kullanımı sırasında dikkatli olunması ve güvenlik önlemlerinin alınması önemlidir (Gandoman vd., 2019; Liang vd., 2020). Pil yönetim sistemleri, bu tür riskleri azaltmak için tasarlanmıştır ve pilin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar (Ramkumar vd., 2022).

Lityum iyon pillerin çevresel etkisi de göz ardı edilmemesi gereken bir konudur. Lityum iyon pillerin üretimi, lityum,

kobalt ve nikel gibi hammaddelerin çıkarılmasını ve işlenmesini gerektirir. Bu süreçler, çevresel sorunlara yol açabilir. Ayrıca, lityum iyon pillerin geri dönüşümü de zorlu bir süreçtir ve çevreye zarar verebilecek atıklar oluşturabilir. Örneğin pirometalurji adı verilen bir yöntemle yüksek sıcaklıklarda işlenmiş metallerin geri kazanımı hedeflenmektedir. Ancak yüksek sıcaklıklarda elektrolit ve bağlayıcı malzemelerin yanması sırasında toksik gazların salınması çevre için tehlike arz edebilmektedir (Piątek vd., 2021). Li-iyon bataryaların bileşenleri için bu yöntem sırasında daha az zararlı olan hidrometalurji yöntemi genel olarak yaygınlaşmaya başlamıştır (Harper vd., 2019). Lityum iyon pillerin çevresel etkisini azaltmak için, geri dönüşüm süreçlerinin geliştirilmesi ve daha çevre dostu malzemelerin kullanılması önemlidir (Piątek vd., 2021).

Son olarak, lityum iyon pillerin performansı sıcaklığa bağlı olarak değişebilir. Düşük sıcaklıklarda, pilin kapasitesi ve performansı azalabilir. Yüksek sıcaklıklarda ise, pilin ömrü kısalsabilir ve güvenlik sorunları ortaya çıkabilir. Bu nedenle, lityum iyon pillerin optimum sıcaklık aralığında kullanılması önemlidir. Örneğin yükseltilmiş sıcaklıkta döngü sırasında LiB'nin maksimum şarj depolama kapasitesinin artan bozulma oranının, esas olarak elektrotlardaki bozulmalarla ilişkili olduğu ve yükseltilmiş sıcaklıkta LiCoO₂ katodunun bozulmasının grafit anodundan daha büyük olduğu bulunmuştur (Leng vd., 2015).

Lityum iyon pillerin avantajları ve dezavantajları göz önünde bulundurularak, belirli bir uygulama için en uygun pil teknolojisini seçilmesi önemlidir. Teknolojinin sürekli gelişmesiyle birlikte, lityum iyon pillerin dezavantajlarının azaltılması ve performanslarının artırılması beklenmektedir.

Tablo 3. Li-iyon pillerin avantaj ve dezavantajları (El Kharbachi vd., 2020; Nitta vd., 2015).

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> Fiyatı (Talebin artmasıyla fiyat azalmaktadır) Yüksek sıcaklıklarda bozulması Koruyucu devre ihtiyacının oluşu Aşırı şarj sonucunda kapasite kaybı veya termal bozulma

4. Li-iyon Pillerin Uygulama Alanları

Lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve düşük kendi kendine deşarj oranı gibi avantajları sayesinde günümüzde çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara ve yenilenebilir enerji depolama sistemlerine kadar, lityum iyon piller modern yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir.

Taşınabilir Elektronik Cihazlar: Lityum iyon piller, akıllı telefonlar, tabletler, dizüstü bilgisayarlar, dijital kameralar, giyilebilir teknolojiler ve diğer birçok taşınabilir elektronik cihazda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu cihazlarda lityum iyon pillerin tercih edilmesinin temel nedeni, küçük boyutları, hafiflikleri ve yüksek enerji kapasiteleridir. Bu sayede, cihazlar daha uzun süre şarj edilmeden kullanılabilir ve daha kompakt tasarımlar elde edilebilir.

Elektrikli Araçlar: Lityum iyon piller, elektrikli araçların (EA) gelişiminde kritik bir rol oynamaktadır. Elektrikli arabalar, hibrit arabalar, elektrikli bisikletler, elektrikli scooterlar ve elektrikli otobüsler gibi birçok EA türünde lityum iyon piller kullanılmaktadır. Lityum iyon pillerin yüksek enerji yoğunluğu, EA'ların daha uzun menziller kat etmesini sağlar. Ayrıca, hızlı şarj edilebilirlik özelliği ve uzun çevrim ömrü, EA'ların günlük kullanım için daha pratik hale gelmesine katkıda bulunur.

Yenilenebilir Enerji Depolama: Lityum iyon piller, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanmasında da önemli bir rol oynamaktadır. Güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri tarafından üretilen enerji, lityum iyon pillerde depolanarak daha sonra kullanılabilir. Bu, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliğini ve güvenilirliğini artırır ve enerji şebekesinin dengesini sağlar. Ayrıca, evlerde ve işyerlerinde kullanılan güneş enerjisi sistemlerinde de lityum iyon piller tercih edilmektedir.

Diğer Uygulama Alanları: Lityum iyon piller, yukarıda belirtilen alanların yanı sıra birçok farklı sektörde de kullanılmaktadır. Bunlar arasında:

- **Endüstriyel ekipmanlar:** Forkliftler, elektrikli el aletleri ve diğer endüstriyel ekipmanlar
- **Tıbbi cihazlar:** Kalp pilleri, defibrilatörler ve insülin pompaları
- **Havacılık ve uzay:** Uydular, uçaklar ve insansız hava araçları
- **Askeri uygulamalar:** Haberleşme cihazları, gece görüş sistemleri ve insansız hava araçları

Lityum iyon pillerin uygulama alanları sürekli olarak genişlemekte ve yeni teknolojilerin geliştirilmesiyle birlikte daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

5. Li-iyon Pillerin Geleceği

Lityum iyon piller, günümüzde enerji depolama alanında baskın teknoloji olsa da sürekli gelişen ihtiyaçlar ve teknolojik ilerlemeler, bu alanda yeni arayışlara yol açmaktadır. Gelecekte lityum iyon pillerin daha da gelişerek enerji depolama çözümlerindeki yerini koruması ve yeni uygulama alanlarında kullanılması beklenmektedir. Bu gelişim, malzeme bilimi, pil tasarımı ve üretim süreçlerindeki yeniliklerle mümkün olacaktır.

Malzeme bilimi alanındaki araştırmalar, lityum iyon pillerin enerji yoğunluğunu, güvenliğini ve ömrünü artırmaya odaklanmaktadır. Katot malzemelerinde lityum-nikel-mangan-kobalt oksit (NMC) ve lityum demir fosfat (LFP) gibi yeni nesil malzemelerin kullanımı yaygınlaşırken çok geniş yüzey alanlarına sahip olan metal-organik yapılar (MOF'lar; 700 – 2500 m²/g) gibi materyaller yeni katot malzemeleri olarak karşımıza çıkmaktadır (Kaushik vd., 2024). Bu malzemeler geleneksel katotlara kıyasla çeşitli avantajlar sunmaktadır. MOF'lar çok geniş bir spesifik yüzey alanına sahip oldukça gözenekli bir yapıya sahiptir, bu da lityum iyonlarının şarj ve deşarj sırasında elektrotun içine ve dışına hareket etmesi için gelişmiş verimlilik anlamına gelir. Bu da hem lityum iyonlarını depolamak için daha yüksek kapasite hem de daha hızlı şarj oranları sağlar (Q. Wang vd., 2015).

Anot malzemeleri arasında silikon (4200 mAh/g teorik kapasite; McDowell vd., 2013; Ozanam & Rosso, 2016) ve grafen (744 mAh/g teorik kapasite) gibi yüksek kapasiteli malzemeler üzerinde çalışmalar devam etmektedir (Yu vd., 2022; Zubi vd., 2018). Grafitin eksfoliyasyon ürünü olan grafen, sp² hibridizasyonuna sahip, üstün mekanik, termal ve elektriksel özellikler ortaya koyan bir tür iki boyutlu tek katmanlı karbon malzemedir (Guo vd., 2021). Dahası, kristal grafende lityumlaşmanın grafen tabakalarının iki tarafında gerçekleştiği kanıtlanmıştır, bu da teorik lityum depolama kapasitesinin grafitin iki katı olduğu anlamına gelmektedir (Rajkamal & Thapa, 2019).

Lityum iyon pillerde enerji yoğunluğunu artırmak amacıyla yüksek voltajlı katot malzemeleri kullanımı, sıvı elektrolitin yüksek voltaj koşullarında bozunması ve güvenlik endişeleri nedeniyle sınırlı kalmaktadır (Moradi vd., 2023). Bu doğrultuda, katı hal elektrolitleri, yüksek termal kararlılık, geniş elektrokimyasal kararlılık penceresi ve sızdırmazlık gibi üstün özellikleriyle güvenli ve yüksek performanslı piller için umut verici bir alternatif sunar (Yue vd., 2016). Yüksek iyonik iletkenlik ve düşük elektronik iletkenlik sayesinde hızlı şarj yeteneği de bu teknolojinin önemli avantajları arasındadır (Lanjan vd., 2020).

Pil tasarımındaki yenilikler de lityum iyon pillerin geleceğini şekillendirecek önemli bir faktördür. Üç boyutlu pil yapıları, daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha hızlı şarj sağlayarak özellikle elektrikli araçlar ve taşınabilir elektronik cihazlar için önemli avantajlar sunabilir. Ayrıca, mikro ölçekli piller, giyilebilir teknolojiler, tıbbi implantlar ve sensörler gibi küçük ölçekli cihazlarda kullanım için yeni olanaklar yaratabilir. Üretim süreçlerindeki gelişmeler, lityum iyon pillerin maliyetini düşürerek daha erişilebilir hale gelmesini sağlayabilir. Otomasyon ve yapay zekâ gibi teknolojilerin üretim süreçlerine entegrasyonu, verimliliği artırarak maliyetleri düşürebilir ve üretim hızını artırabilir. Ayrıca, geri dönüşüm teknolojilerindeki gelişmeler, lityum iyon pillerin çevresel etkisini azaltarak sürdürülebilirliğini artırabilir.

Lityum iyon pillerin geleceği, bu teknolojinin sınırlarını zorlayan ve yeni ufuklar açan sürekli araştırmalar ve geliştirmelerle şekillenecektir. Enerji depolama alanındaki artan talebin karşılanması ve yeni teknolojilerin geliştirilmesi, lityum iyon pillerin gelecekte de önemli bir rol oynayacağını göstermektedir.

6. Lityum İyon Pillerin Ötesinde

Lityum iyon piller, günümüzde enerji depolama alanında önemli bir yer tutsa da araştırmacılar sürekli olarak daha iyi performans, güvenlik ve sürdürülebilirlik sunabilecek yeni pil teknolojileri geliştirmek için çalışmaktadır. Bu çalışmalar, lityum iyon pillerin sınırlamalarını aşmayı ve gelecekteki enerji ihtiyaçlarını karşılamayı hedeflemektedir. İşte lityum iyon pillerin

ötesinde umut vadeden bazı pil teknolojileri:

a. Katı Hal Piller:

Katı hal piller, geleneksel lityum iyon pillerdeki sıvı elektrolitin yerine katı bir elektrolit kullanır (Schmaltz vd., 2023). Bu, pilin güvenliğini önemli ölçüde artırır, çünkü yanıcı sıvı elektrolitlerin neden olabileceği yangın riskini ortadan kaldırır. Ayrıca, katı hal elektrolitleri daha yüksek enerji yoğunluğuna olanak tanır ve pilin ömrünü uzatabilir. Katı hal piller, elektrikli araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar ve enerji depolama sistemleri gibi çeşitli uygulamalar için gelecek vadeden bir teknoloji olarak kabul edilmektedir (Bates vd., 2022).

b. Lityum-Sülfür Piller:

Lityum-sülfür piller, lityum iyon pillere göre daha yüksek teorik enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu, aynı ağırlıkta veya hacimde daha fazla enerji depolayabilecekleri anlamına gelir. Lityum-sülfür piller, özellikle elektrikli havacılık ve uzay araştırmaları gibi ağırlığın önemli bir faktör olduğu uygulamalar için cazip bir seçenektir. Ancak, lityum-sülfür pillerin çevrim ömrü ve performansının iyileştirilmesi için hala bazı zorlukların üstesinden gelinmesi gerekmektedir (Bi vd., 2023; Castillo vd., 2023; Fan vd., 2018).

c. Sodyum-İyon Piller:

Sodyum-iyon piller, lityum iyon pillerle benzer bir çalışma prensibine sahiptir, ancak lityum yerine sodyum kullanır. Sodyum, lityuma göre daha bol ve daha ucuz bir elementtir, bu da sodyum-iyon pillerin daha düşük maliyetli olmasını sağlar. Sodyum-iyon piller, özellikle büyük ölçekli enerji depolama sistemleri ve elektrikli araçlar için potansiyel bir alternatif olarak görülmektedir (Y. Wang vd., 2019).

d. Metal-Hava Piller:

Metal-hava piller, metal anot ve hava katodu kullanır. Bu, çok yüksek teorik enerji yoğunluğuna sahip pillerin üretilmesini sağlar. Lityum-hava ve çinko-hava pilleri gibi metal-hava pilleri, özellikle elektrikli araçlar için uzun menzil sağlayabilir. Ancak, metal-hava pillerinin pratik uygulamalarda kullanılabilmesi için çevrim ömrü, verimlilik ve maliyet gibi konularda iyileştirmeler yapılması gerekmektedir (T. Li vd., 2023; Olabi vd., 2021; Rahman vd., 2013).

e. Redoks Akış Pilleri:

Redoks akış pilleri, enerjiyi kimyasal olarak depolanan sıvı elektrolitlerde depolar. Bu piller, büyük ölçekli enerji depolama uygulamaları için uygundur ve uzun ömürlüdür. Ayrıca, redoks akış pilleri güvenlidir ve çevre dostudur (Pan & Wang, 2015; Weber vd., 2011).

Bu teknolojilerin yanı sıra, sürekli olarak yeni pil kimyaları ve tasarımları araştırılmaktadır. Gelecekte, bu yeni pil teknolojilerinin lityum iyon pillerin yerini alması veya lityum iyon pillerle birlikte kullanılması beklenmektedir. Hangi teknolojinin ön plana çıkacağı, performans, maliyet, güvenlik ve sürdürülebilirlik gibi faktörlere bağlı olacaktır.

Sonuç

Lityum iyon piller, taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara ve yenilenebilir enerji depolama sistemlerine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde devrim yaratarak modern yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bu makalede, lityum iyon pillerin tarihsel gelişiminden başlayarak, çalışma prensipleri, avantajları, dezavantajları ve gelecekteki potansiyeli detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Bağdat Pili gibi antik dönem örneklerinden Alessandro Volta'nın volta piline ve günümüzdeki gelişmiş lityum iyon pillere kadar uzanan tarihsel yolculuk, pil teknolojilerinin insanlık için önemini ve sürekli gelişimini gözler önüne sermektedir. Lityum iyon pillerin yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve düşük kendi kendine deşarj oranı gibi avantajları, onları diğer pil teknolojilerine göre öne çıkarmaktadır. Ancak, maliyet, güvenlik ve çevresel etki gibi dezavantajların da göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

Lityum iyon pil teknolojisi sürekli olarak gelişmekte ve gelecekte daha da iyi performans, güvenlik ve sürdürülebilirlik sağlaması beklenmektedir. Yeni malzemelerin keşfi, pil tasarımının optimize edilmesi ve akıllı pil yönetim sistemlerinin geliştirilmesi, bu alanda yapılan çalışmalara örnek olarak verilebilir. Katı hal piller, lityum-sülfür piller ve sodyum-iyon piller gibi alternatif teknolojiler de gelecekte enerji depolama alanında önemli bir rol oynayabilir.

Sonuç olarak, lityum iyon piller, enerji depolama alanında önemli bir yere sahip olmaya devam edecek ve teknolojik gelişmelerle birlikte daha da yaygınlaşacaktır. Lityum iyon pillerinin dezavantajlarının giderilmesi için yapılacak bilimsel çalışmalar bu pillerin daha yaygın hale gelmesine ve öne çıkmasına yol açacaktır. Bu teknolojinin gelecekteki potansiyeli, araştırma ve geliştirme çalışmalarına devam edilmesiyle daha da ortaya çıkacaktır.

Hakem Değerlendirmesi: Dış bağımsız.

Yazar Katkıları: Fikir-MY, EÖ, HP; Tasarım-MY, HP; Denetleme-MY, EÖ; Kaynaklar- HP, EÖ; Veri Toplanması ve/veya İşlemesi- HP; Analiz ve/veya Yorum- HP, MY, EÖ; Literatür Taraması- HP, EÖ; Yazıyı Yazan- HP; Eleştirel İnceleme- MY, EÖ; Diğer- MY, EÖ, HP.

Çıkar Çatışması: Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan etmiştir.

Finansal Destek: Bu çalışma için herhangi bir kurumdan finansal destek alınmamıştır.

Peer-review: Externally peer-reviewed.

Author Contributions: Concept - MY, EÖ, HP; Design- MY, HP; Supervision- MY, EÖ; Resources- HP, EÖ; Data Collection and/or Processing- HP; Analysis and/or Interpretation- HP, MY, EÖ; Literature Search- HP, EÖ; Writing Manuscript- HP; Critical Review- MY, EÖ; Other- MY, EÖ, HP.

Conflict of Interest: The authors have no conflicts of interest to declare.

Financial Disclosure: No financial support was received from any institution for this study.

Kaynaklar

- Abdelaal, M. M., & Alkhedher, M. (2024). Dual optimization of LiFePO₄ cathode performance using manganese substitution and a hybrid lithiated Nafion-modified PEDOT:PSS coating layer for lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 506, 145050. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2024.145050>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2016.12.069>
- Armand, M., & Tarascon, J. M. (2008). Building better batteries. *Nature* 2008 451:7179, 451(7179), 652-657. <https://doi.org/10.1038/451652a>
- Arya, S., & Verma, S. (2020). Nickel-Metal Hydride (Ni-MH) Batteries. İçinde *Rechargeable Batteries*. <https://doi.org/10.1002/9781119714774.ch8>
- Aslam, M. K., Niu, Y., Hussain, T., Tabassum, H., Tang, W., Xu, M., & Ahuja, R. (2021). How to avoid dendrite formation in metal batteries: Innovative strategies for dendrite suppression. *Nano Energy*, 86, 106142. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2021.106142>
- Babu, B. (2024). Self-discharge in rechargeable electrochemical energy storage devices. *Energy Storage Materials*, 67, 103261. <https://doi.org/10.1016/J.ENSME.2024.103261>
- Bates, A. M., Preger, Y., Torres-Castro, L., Harrison, K. L., Harris, S. J., & Hewson, J. (2022). Are solid-state batteries safer than lithium-ion batteries? İçinde *Joule* (C. 6, Sayı 4). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.007>
- Bi, C. X., Hou, L. P., Li, Z., Zhao, M., Zhang, X. Q., Li, B. Q., Zhang, Q., & Huang, J. Q. (2023). Protecting lithium metal anodes in lithium-sulfur batteries: A review. *Energy Material Advances*, 4. <https://doi.org/10.34133/energymatadv.0010>
- Castillo, J., Coca-Clemente, J. A., Rikarte, J., Sáenz De Buruaga, A., Santiago, A., & Li, C. (2023). Recent progress on lithium anode protection for lithium-sulfur batteries: Review and perspective. İçinde *APL Materials* (C. 11, Sayı 1). <https://doi.org/10.1063/5.0107648>
- Cecchini, R., & Pelosi, G. (1992). From the Historian--Alessandro Volta and his battery. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 34(2). <https://doi.org/10.1109/74.134307>
- Cen, Y., Sisson, R. D., Qin, Q., & Liang, J. (2018). Current Progress of Si/Graphene Nanocomposites for Lithium-Ion Batteries. *C 2018, Vol. 4, Page 18, 4(1)*, 18. <https://doi.org/10.3390/C4010018>
- Chawla, N., Bharti, N., & Singh, S. (2019). Recent Advances in Non-Flammable Electrolytes for Safer Lithium-Ion Batteries. *Batteries 2019, Vol. 5, Page 19, 5(1)*, 19. <https://doi.org/10.3390/BATTERIES5010019>
- Choi, S. Il, Jung, E. J., Park, M., Shin, H. S., Huh, S., & Won, Y. S. (2020). Phase-dependent performance of lotus-root shaped TiO₂ anode for lithium-ion batteries (LIBs). *Applied Surface Science*, 508, 145237. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2019.145237>
- Chombo, P. V., & Laonual, Y. (2020). A review of safety strategies of a Li-ion battery. *Journal of Power Sources*, 478, 228649. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2020.228649>
- Costa, C. M., Gonçalves, R., & Lanceros-Méndez, S. (2019). Advances in Cathode Nanomaterials for Lithium-Ion Batteries.

- İçinde *Nanostructured Materials for Next-Generation Energy Storage and Conversion* (ss. 105-145). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-58675-4_3
- Crabtree, G., Kócs, E., & Trahey, L. (2015). The energy-storage frontier: Lithium-ion batteries and beyond. *MRS Bulletin*, 40(12). <https://doi.org/10.1557/mrs.2015.259>
- Das, D., Manna, S., & Puravankara, S. (2023). Electrolytes, Additives and Binders for NMC Cathodes in Li-Ion Batteries—A Review. İçinde *Batteries* (C. 9, Sayı 4). <https://doi.org/10.3390/batteries9040193>
- Dong, B., Poletayev, A. D., Cottom, J. P., Castells-Gil, J., Spencer, B. F., Li, C., Zhu, P., Chen, Y., Price, J. M., Driscoll, L. L., Allan, P. K., Kendrick, E., Islam, M. S., & Slater, P. R. (2024). Effects of sulfate modification of stoichiometric and lithium-rich LiNiO₂ cathode materials. *Journal of Materials Chemistry A*, 12(19), 11390-11402. <https://doi.org/10.1039/D4TA00284A>
- Dufo-López, R., Cortés-Arcos, T., Artal-Sevil, J. S., & Bernal-Agustín, J. L. (2021). Comparison of Lead-Acid and Li-Ion Batteries Lifetime Prediction Models in Stand-Alone Photovoltaic Systems. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 1099, 11(3), 1099. <https://doi.org/10.3390/APP11031099>
- Dunn, B., Kamath, H., & Tarascon, J. M. (2011). Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. *Science*, 334(6058), 928-935. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1212741/SUPPL_FILE/DUNN-SOM.PDF
- El Kharbachi, A., Zavorotynska, O., Lacroche, M., Cuevas, F., Yartys, V., & Fichtner, M. (2020). Exploits, advances and challenges benefiting beyond Li-ion battery technologies. *Journal of Alloys and Compounds*, 817, 153261. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2019.153261>
- Fan, X., Sun, W., Meng, F., Xing, A., & Liu, J. (2018). Advanced chemical strategies for lithium–sulfur batteries: A review. İçinde *Green Energy and Environment* (C. 3, Sayı 1). <https://doi.org/10.1016/j.gee.2017.08.002>
- Gandoman, F. H., Jaguemont, J., Goutam, S., Gopalakrishnan, R., Firouz, Y., Kalogiannis, T., Omar, N., & Van Mierlo, J. (2019). Concept of reliability and safety assessment of lithium-ion batteries in electric vehicles: Basics, progress, and challenges. *Applied Energy*, 251, 113343. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.113343>
- Goodenough, J. B., & Park, K. S. (2013). The Li-ion rechargeable battery: A perspective. *Journal of the American Chemical Society*, 135(4), 1167-1176. https://doi.org/10.1021/JA3091438/ASSET/IMAGES/JA-2012-091438_M014.GIF
- Guo, B., Ji, X., Wang, W., Chen, X., Wang, P., Wang, L., & Bai, J. (2021). Highly flexible, thermally stable, and static dissipative nanocomposite with reduced functionalized graphene oxide processed through 3D printing. *Composites Part B: Engineering*, 208, 108598. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2020.108598>
- Haregewoin, A. M., Wotango, A. S., & Hwang, B. J. (2016). Electrolyte additives for lithium ion battery electrodes: progress and perspectives. *Energy & Environmental Science*, 9(6), 1955-1988. <https://doi.org/10.1039/C6EE00123H>
- 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. *Nature* 2019 575:7781, 575(7781), 75-86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>
- Iturrondobeitia, A., Aguesse, F., Genies, S., Waldmann, T., Kasper, M., Ghanbari, N., Wohlfahrt-Mehrens, M., & Bekaert, E. (2017). Post-Mortem Analysis of Calendar-Aged 16 Ah NMC/Graphite Pouch Cells for EV Application. *Journal of Physical Chemistry C*, 121(40). <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b05416>
- Kaushik, S., Chand, P., & Sharma, S. (2024). High-performance pristine ZIF-67 asymmetric supercapacitor device with excellent energy and power density for energy storage application. *Electrochimica Acta*, 497, 144565. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2024.144565>
- Kim, H. J., Krishna, T. N. V., Zeb, K., Rajangam, V., Muralee Gopi, C. V. V., Sambasivam, S., Raghavendra, K. V. G., & Obaidat, I. M. (2020). A comprehensive review of li-ion battery materials and their recycling techniques. İçinde *Electronics (Switzerland)* (C. 9, Sayı 7). <https://doi.org/10.3390/electronics9071161>
- Kordesch, K., & Taucher-Mautner, W. (2009). Primary Batteries - Aqueous Systems | Leclanché and Zinc-Carbon. İçinde *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00097-6>
- Lanjan, A., Ghalami Choobar, B., & Amjad-Iranagh, S. (2020). Promoting lithium-ion battery performance by application of crystalline cathodes Li_xMn_{1-z}Fe_zPO₄. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 24(1), 157-171. <https://doi.org/10.1007/S10008-019-04480-6/TABLES/5>
- Larcher, D., & Tarascon, J. M. (2014). Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nature Chemistry* 2014 7:1, 7(1), 19-29. <https://doi.org/10.1038/nchem.2085>
- Leng, F., Tan, C. M., & Pecht, M. (2015). Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature. *Scientific Reports* 2015 5:1, 5(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/srep12967>
- Li, M., Lu, J., Chen, Z., & Amine, K. (2018). 30 Years of Lithium-Ion Batteries. *Advanced Materials*, 30(33), 1800561.

- <https://doi.org/10.1002/ADMA.201800561>
- Li, T., Huang, M., Bai, X., & Wang, Y. X. (2023). Metal–air batteries: A review on current status and future applications. İçinde *Progress in Natural Science: Materials International* (C. 33, Sayı 2). <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2023.05.007>
- Liang, H., Zuo, X., Zhang, L., Huang, W., Chen, Q., Zhu, T., Liu, J., & Nan, J. (2020). Nonflammable LiTFSI-Ethylene Carbonate/1,2-Dimethoxyethane Electrolyte for High-Safety Li-ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(9), 090520. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/AB8803>
- Lu, X., & Anariba, F. (2014). Fostering innovation through an active learning activity inspired by the baghdad battery. *Journal of Chemical Education*, 91(11), 1929-1933. https://doi.org/10.1021/ED400869C/SUPPL_FILE/ED400869C_SI_002.DOCX
- Luo, J., Zhao, X., Wu, J., Jang, H. D., Kung, H. H., & Huang, J. (2012). Crumpled graphene-encapsulated Si nanoparticles for lithium ion battery anodes. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 3(13), 1824-1829. https://doi.org/10.1021/JZ3006892/SUPPL_FILE/JZ3006892_SI_001.PDF
- Lyu, Y., Wu, X., Wang, K., Feng, Z., Cheng, T., Liu, Y., Wang, M., Chen, R., Xu, L., Zhou, J., Lu, Y., & Guo, B. (2021). An Overview on the Advances of LiCoO₂ Cathodes for Lithium-Ion Batteries. İçinde *Advanced Energy Materials* (C. 11, Sayı 2). <https://doi.org/10.1002/aenm.202000982>
- Marino, C., Boulet, L., Gaveau, P., Fraisse, B., & Monconduit, L. (2012). Nanoconfined phosphorus in mesoporous carbon as an electrode for Li-ion batteries: performance and mechanism. *Journal of Materials Chemistry*, 22(42), 22713-22720. <https://doi.org/10.1039/C2JM34562E>
- McDowell, M. T., Lee, S. W., Nix, W. D., & Cui, Y. (2013). 25th Anniversary Article: Understanding the Lithiation of Silicon and Other Alloying Anodes for Lithium-Ion Batteries. *Advanced Materials*, 25(36), 4966-4985. <https://doi.org/10.1002/ADMA.201301795>
- Mizushima, K., Jones, P. C., Wiseman, P. J., & Goodenough, J. B. (1980). Li_xCoO₂ (0 < x < 1): A new cathode material for batteries of high energy density. *Materials Research Bulletin*, 15(6), 783-789. [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(80\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0025-5408(80)90012-4)
- Moradi, Z., Lanjan, A., Tyagi, R., & Srinivasan, S. (2023). Review on current state, challenges, and potential solutions in solid-state batteries research. *Journal of Energy Storage*, 73, 109048. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.109048>
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18(5), 252-264. <https://doi.org/10.1016/J.MATTOD.2014.10.040>
- Niu, H., Zhang, N., Lu, Y., Zhang, Z., Li, M., Liu, J., Song, W., Zhao, Y., & Miao, Z. (2024). Strategies toward the development of high-energy-density lithium batteries. *Journal of Energy Storage*, 88, 111666. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2024.111666>
- Olabi, A. G., Sayed, E. T., Wilberforce, T., Jamal, A., Alami, A. H., Elsaid, K., Rahman, S. M. A., Shah, S. K., & Abdelkareem, M. A. (2021). Metal-air batteries—a review. İçinde *Energies* (C. 14, Sayı 21). <https://doi.org/10.3390/en14217373>
- Orangi, S., Manjong, N., Clos, D. P., Usai, L., Burheim, O. S., & Strømman, A. H. (2024). Historical and prospective lithium-ion battery cost trajectories from a bottom-up production modeling perspective. *Journal of Energy Storage*, 76, 109800. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.109800>
- Ozanam, F., & Rosso, M. (2016). Silicon as anode material for Li-ion batteries. *Materials Science and Engineering: B*, 213, 2-11. <https://doi.org/10.1016/J.MSEB.2016.04.016>
- Pan, F., & Wang, Q. (2015). Redox species of redox flow batteries: A review. İçinde *Molecules* (C. 20, Sayı 11). <https://doi.org/10.3390/molecules201119711>
- Piątek, J., Afyon, S., Budnyak, T. M., Budnyk, S., Sipponen, M. H., & Slabon, A. (2021). Sustainable Li-Ion Batteries: Chemistry and Recycling. *Advanced Energy Materials*, 11(43), 2003456. <https://doi.org/10.1002/AENM.202003456>
- Rahman, Md. A., Wang, X., & Wen, C. (2013). High Energy Density Metal-Air Batteries: A Review. *Journal of The Electrochemical Society*, 160(10). <https://doi.org/10.1149/2.062310jes>
- Rajkamal, A., & Thapa, R. (2019). Carbon Allotropes as Anode Material for Lithium-Ion Batteries. *Advanced Materials Technologies*, 4(10), 1900307. <https://doi.org/10.1002/ADMT.201900307>
- Ramkumar, M. S., Reddy, C. S. R., Ramakrishnan, A., Raja, K., Pushpa, S., Jose, S., & Jayakumar, M. (2022). Review on Li-Ion Battery with Battery Management System in Electrical Vehicle. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 3379574. <https://doi.org/10.1155/2022/3379574>
- Sasaki, T., Ukyo, Y., & Novák, P. (2013). Memory effect in a lithium-ion battery. *Nature Materials* 2013 12:6, 12(6), 569-575. <https://doi.org/10.1038/nmat3623>
- Schmaltz, T., Hartmann, F., Wicke, T., Weymann, L., Neef, C., & Janek, J. (2023). A Roadmap for Solid-State Batteries. *Advanced Energy Materials*, 13(43). <https://doi.org/10.1002/aenm.202301886>

- Tsai, P. J., & Chan, S. L. I. (2013). Nickel-based batteries: materials and chemistry. İçinde *Electricity Transmission, Distribution and Storage Systems*. <https://doi.org/10.1533/9780857097378.3.309>
- Ventosa, E., Löffler, T., La Mantia, F., & Schuhmann, W. (2016). Understanding memory effects in Li-ion batteries: evidence of a kinetic origin in TiO₂ upon hydrogen annealing. *Chemical Communications*, 52(77), 11524-11526. <https://doi.org/10.1039/C6CC06070F>
- Wang, Q., Zou, R., Xia, W., Ma, J., Qiu, B., Mahmood, A., Zhao, R., Yang, Y., Xia, D., & Xu, Q. (2015). Facile Synthesis of Ultrasmall CoS₂ Nanoparticles within Thin N-Doped Porous Carbon Shell for High Performance Lithium-Ion Batteries. *Small*, 11(21), 2511-2517. <https://doi.org/10.1002/SMLL.201403579>
- Wang, Y., Song, S., Xu, C., Hu, N., Molenda, J., & Lu, L. (2019). Development of solid-state electrolytes for sodium-ion battery—A short review. *Nano Materials Science*, 1(2). <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2019.02.007>
- Weber, A. Z., Mench, M. M., Meyers, J. P., Ross, P. N., Gostick, J. T., & Liu, Q. (2011). Redox flow batteries: A review. İçinde *Journal of Applied Electrochemistry* (C. 41, Sayı 10). <https://doi.org/10.1007/s10800-011-0348-2>
- Whittingham, M. S. (1974). Electrointercalation in transition-metal disulphides. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 9, 328-329. <https://doi.org/10.1039/C39740000328>
- Winter, M., Barnett, B., & Xu, K. (2018). Before Li Ion Batteries. *Chemical Reviews*, 118(23), 11433-11456. https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.8B00422/ASSET/IMAGES/LARGE/CR-2018-00422Q_0014.JPEG
- Yu, S., Guo, B., Zeng, T., Qu, H., Yang, J., & Bai, J. (2022). Graphene-based lithium-ion battery anode materials manufactured by mechanochemical ball milling process: A review and perspective. *Composites Part B: Engineering*, 246, 110232. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2022.110232>
- Yuan, H., Luan, J., Liu, J., & Zhong, C. (2024). Hail to Daniell Cell: From Electrometallurgy to Electrochemical Energy Storage. İçinde *Advanced Functional Materials* (C. 34, Sayı 33). <https://doi.org/10.1002/adfm.202400289>
- Yue, L., Ma, J., Zhang, J., Zhao, J., Dong, S., Liu, Z., Cui, G., & Chen, L. (2016). All solid-state polymer electrolytes for high-performance lithium ion batteries. *Energy Storage Materials*, 5, 139-164. <https://doi.org/10.1016/J.ENSM.2016.07.003>
- Zhang, J., Huang, H., Zhang, G., Dai, Z., Wen, Y., & Jiang, L. (2024). Cycle life studies of lithium-ion power batteries for electric vehicles: A review. *Journal of Energy Storage*, 93, 112231. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2024.112231>
- Zhang, S. S. (2007). A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries. İçinde *Journal of Power Sources* (C. 164, Sayı 1). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.10.065>
- Zhao, E., Gu, Y., Fang, S., Yang, L., & Hirano, S. I. (2021). Systematic Investigation of Electrochemical Performances for Lithium-Ion Batteries with Si/Graphite Anodes: Effect of Electrolytes Based on Fluoroethylene Carbonate and Linear Carbonates. *ACS Applied Energy Materials*, 4(3), 2419-2429. https://doi.org/10.1021/ACSAEM.0C02946/ASSET/IMAGES/LARGE/AE0C02946_0009.JPEG
- Zhu, L., & Chen, M. (2020). Research on spent LiFePO₄ electric vehicle battery disposal and its life cycle inventory collection in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23). <https://doi.org/10.3390/ijerph17238828>
- Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M., & Pasaoglu, G. (2018). The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 292-308. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.03.002>