



Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması

A Review Study on the Characteristics and Advantages of Battery Chemicals Used in Electric Vehicles

Ömer Faruk ÖZCAN¹ , Teoman KARADAĞ^{2*} , Mehmet ALTUĞ³ , Ömerül Faruk ÖZGÜVEN² 

¹ Dicle Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

² İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

³ İnönü Üniversitesi, Malatya OSB MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Malatya, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Özet
Elektrikli Araçlar Batarya Kimyaları Bataryalar	Fosil yakıtların hızla tükenmesi ve temiz enerji kavramının yaygın olarak kullanılmaya başlanması ile birlikte elektrikli araçlar içten yanmalı motora sahip araçların yerini almaktadır. Devletler enerji politikalarını değiştirerek temiz enerji üzerine somut adımlar atmaya başladılar. Bu kapsamda içten yanmalı araçların kullanımını sınırlandırma, yakın gelecekte ise tamamen sonlandırma planları yapmaktadırlar. Elektrikli araçların istenilen seviyeye gelebilmesi için aşması gereken sorunlar vardır. Bu sorunlar az menzil ve yüksek batarya maliyeti olarak öne çıkmaktadır. Elektrikli araçların menzillerini ve tercih edilebilirliklerini etkileyen en önemli parametre batarya teknolojisidir. Bu sorunların çözümü batarya teknolojilerindeki gelişmelerle doğru orantılıdır. Elektrikli araçların menzilleri batarya kapasiteleri ile doğrudan ilişkili olup, bataryaların yüksek güç yoğunluğuna, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, hızlı şarj-deşarj edilebilmesi ve uzun ömre sahip olması istenir. Dolayısıyla günümüz elektrikli araç araştırma geliştirme çalışmaları bu konu üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmada geçmişten günümüze kadar olan batarya kimyaları hakkında detaylı bir çalışma yapılmıştır. Bataryalar için önemli olan kavramlar açıklanarak geçmişte kullanılan ve yeni geliştirilen bataryaların üstün ve zayıf olan yönleri belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda incelenmiş olan pil türlerinden elektrikli araçlarda en çok tercih edilen pil türleri lityum tabanlı piller olan NMC, NCA, LTO, LPF, LMO olarak karşımıza çıkmaktadır. Gelecek vadeden Li-S, Li-air, Zn-air pilleri ise henüz ticari olarak elektrikli araçlarda kullanılmamaktadır.

Keywords	Abstract
Electric Vehicles Battery Chemistry Batteries	With the rapid depletion of fossil fuels and the widespread use of the concept of clean energy, electric vehicles are replacing vehicles with internal combustion engines. States have started to take concrete steps on clean energy by changing their energy policies. In this context, they plan to limit the use of internal combustion vehicles and to terminate them completely in the near future. There are problems that electric vehicles have to overcome in order to reach the desired level. These problems stand out as low range and high battery cost. The most important parameter affecting the range and preferability of electric vehicles is battery technology. The solution of these problems is directly proportional to the developments in battery technologies. The range of electric vehicles is directly related to the battery capacities, and it is desired that the batteries have high power density, high energy density, fast charge-discharge and long life. Therefore, today's electric vehicle research and development studies have focused on this issue. In this study, a detailed study has been done on battery chemistry from past to present. By explaining the important concepts for batteries, the superior and non-superior aspects of the batteries used in the past and newly developed have been determined. As a result of this study, the most preferred battery types in electric vehicles, among the battery types examined, are lithium-based batteries such as NMC, NCA, LTO, LPF, LMO. Promising Li-s, Li-air, Zn-air and li-batteries are not yet commercially used in electric vehicles.

Alıntı / Cite

Özcan, Ö. F., Karadağ, T., Altuğ, M., & Özgüven, Ö. F. (2021). Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Kimyasallarının Özellikleri ve Üstün Yönlerinin Kıyaslanması Üzerine Bir Derleme Çalışması. *GU J Sci, Part A, 8(2)*, 276-298.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
Ö. F. Özcan, 0000-0003-1708-5699	Başvuru Tarihi / Submission Date 12.04.2021
T. Karadağ, 0000-0002-7682-7771	Revizyon Tarihi / Revision Date 14.06.2021
M. Altuğ, 0000-0002-4745-9164	Kabul Tarihi / Accepted Date 18.06.2021
Ö. F. Özgüven, 0000-0002-8376-641X	Yayın Tarihi / Published Date 24.06.2021

1. GİRİŞ

Enerji tasarrufu ve çevre korumanın endişe yarattığı bir dünyada, elektrikli araç teknolojisinin gelişimi 1800 yıllardan itibaren hız kazanmıştır (Chan, 1993). İlk akü ile çalışan elektrikli araç 1834 yılında içten yanmalı motorlu araçlardan yaklaşık 50 yıl önce icat edilmiştir (Chan, 2007; 2013). 1918 yılına kadar oldukça popüler olan elektrikli araçlar benzinli araçlardan daha fazla tercih edilerek çok sayıda satış yaptı (Young vd., 2013). Benzinli araçların gelişmeye devam etmesi, petrol üretiminin artması ve 1910 yılında Henry Ford'un benzinli araçlar için seri üretime geçmesi, elektrikli araçların ulaşım için kullanımını sona erdirdi. 1933'e kadar elektrikli araç sayısı neredeyse sıfıra düşürüldü.

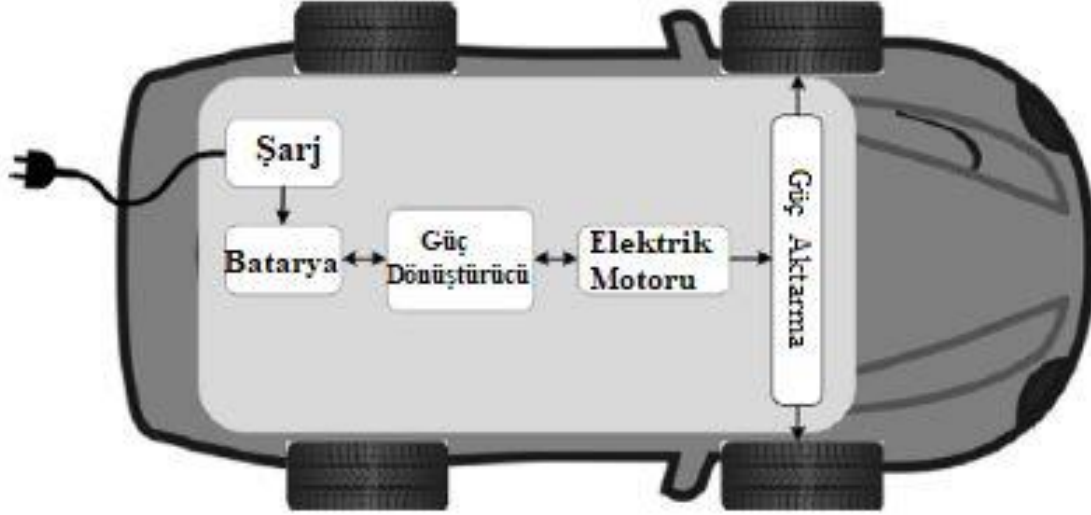
Elektrikli araçların benzinli muadillerinden geri planda kalmasının nedenleri arasında daha yavaş ve daha pahalı olması, menzilin az olması, o dönemde kullanılan pillerin düşük enerji yoğunluğuna, uzun şarj süresine ve az dayanıklılığa sahip olması gösterilmektedir (Chan, 1993; Nor, 1993; Xiao vd., 2015; Hirve & Vidyapeeth, 2018). Ayrıca kirlilik ile ilgili çevre sorunları hala öngörülemediğinden, kullanıcılar uygun maliyetli ulaşım ile daha fazla ilgilendiler. İçten yanmalı araçların yakıt dağıtım altyapısının elektrikli araç dağıtım altyapısından fazla olması elektrikli araçların geri planda kalmasını sağlayan bir başka neden olarak gösterilmektedir (Lynch & Salameh, 1997).

1970 yılların başında yaşanan petrol krizinin ortaya çıkmasıyla birlikte petrol fiyatlarında yaşanan artış, fosil yakıtların sınırlı bir kaynak olmasının farkına varılması elektrikli araçlara olan ilgiyi tekrar arttırmaya başlamıştır (Lukic vd., 2008; Chan, 2013; Muratoğlu & Akkaya, 2015; Xiao vd., 2015). Yaşanan enerji krizinin olumsuz etkileri, fosil yakıtların hızla tükenmeye başlaması, içten yanmalı motorların atmosfere yaydığı zararlı gazlar ve çevre kirliliğinin azaltılmasına yönelik yapılan çalışmalar ülkelerin enerji politikalarını değiştirmelerine neden oldu (Chan, 2007; Tinğ vd., 2015). Birçok ülke elektrikli araçların tekrardan gelişimi için yasal düzenlemeler ve özel vergi politikaları uygulamaya başladı (Sun vd., 2020). Bu doğrultuda Fransa ve İngiltere'de 2040 yılına kadar konvansiyonel araçların ülke içi satışlarının kısıtlanması hedeflenmiştir (Li vd., 2019). Ayrıca ABD, Çin, İngiltere ve Japonya'da elektrikli araç teşviki için vergi indirimleri ve kredi desteği uygulanmıştır (Palmer vd., 2018; Li vd., 2019; Sun vd., 2020). Ülkelerin elektrikli araç teşvikleri ve çevreye duyarlı yaklaşımları nedeniyle elektrikli araçlar satışlarının 2030 yılında 130 milyon seviyelerine ulaşması beklenmektedir (Burd vd., 2021).

Elektrikli araç teknolojisi tam elektrikli araçlar, hibrit elektrikli araçlar ve yakıt hücreli elektrikli araçlar olarak üç farklı şekilde gelişme göstermiştir (Kisacikoglu vd., 2012; Tinğ vd., 2015; Sun vd., 2020). Elektrikli araçlar içten yanmalı araçlardan farklı olarak çalışmaktadır. Bataryalı elektrik araçların çalışması tamamen batarya ile olup, Şekil 1'de gösterildiği gibi büyük şarj edilebilir bir batarya, bir elektrik motoru, sürücünün gaz pedalından motora elektrik gönderen bir kontrolör ve bir şarj sistemi ile çalışmaktadır (Lynch & Salameh, 1997; Muratoğlu & Akkaya, 2015; Mersky vd., 2016; Hirve & Vidyapeeth, 2018). Elektrikle çalışan araçların bu parçaları fosil yakıtlı bir aracın içinde bulunan içten yanmalı motor, yakıt deposu, yakıt hattı ve egzoz sisteminin yerini alır. İçten yanmalı motor, fosil yakıtlı bir aracın çalışmasının merkezinde yer alırken, şarj edilebilir elektrikli araçlarda merkezde bulunan ve aracın çalışmasını sağlayan sistem ise bataryalardır.

Hibrit elektrikli araçlarda iki adet güç kaynağı vardır. Bu araçlarda bir içten yanmalı motor ve elektrikli tahrik sistemi birlikte çalışmaktadır. Hibrit araçlar elektrikle çalışan araç pazarındaki en büyük oranı oluştursa da akaryakıttan tamamen bağımsız değildir (Matthews vd., 2017; Sun vd., 2020). Yakıt pilli elektrikli araçların çalışma mantığı diğer elektrikli araçlardan biraz daha farklı olup hidrojen ve oksijenin tepkimesinden yararlanır (Leitman & Brant, 2009). Yakıt hücreli araç, elektrik motorunu çalıştırmak için bir yakıt hücresi veya yakıt hücresinin yanında bir akü kullanan elektrikli araç türüdür (Das vd., 2017; Sun vd., 2020). Hibrit araçlarda bulunan elektrik motoru, içten yanmalı motora seri veya paralel bağlanabilir. Araçta bulunan hibrit güç düzenleyicisinin görevi araç şebeke beslemesini yüksek gerilimli akü ile elektrik motoru arasındaki bağlantıyı yaparak sağlamasıdır. Elektrik motoru enerjisini, yüksek voltajlı lityum iyon pillerden alır. Ayrıca

rejeneratif teknolojili frenleme sistemi sayesinde yavaşlama anında kaybedilen enerjinin bir kısmı geri kazanılarak lityum iyon pilde depolanır. Bu üç farklı araç teknolojisinin ortak noktası araç sisteminde kullanılan ve elektrik enerjisinin kimyasal olarak depolanmasını sağlayan bataryalardır (Ting vd., 2015).



Şekil 1. Tam Elektrikli Araçların İç Yapısı

Geçmişte olduğu gibi gelecekteki elektrikli araç konseptlerinin seçiminde en büyük teknolojik zorluk, güçlü ve aynı zamanda düşük maliyetli batarya sistemlerinin geliştirilmesinde yatmaktadır (Frieske vd., 2014). Düşük maliyetli pil hücresi üretimi, elektrikli araçların pazar başarısı için çok önemli olduğundan, öngörülen elektrikli araç büyüme oranlarına göre, pil hücresi üreticileri yeni pil hücresi tesislerine milyarlarca dolar yatırım yapmaktadır (Duffner vd., 2021).

Elektrikli araçlarda kullanılan pillerin yüksek güç yoğunluğuna, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasının yanı sıra hızlı şarj-deşarj edilebilmesi ve uzun ömre sahip olması istenir (Chu & Majumdar, 2012). Pil hücrelerinin bir araya getirilerek oluşturulan batarya sistemi elektrikli araçlarda önemli bir etken olup elektrikli araçların menzilleri pil kapasiteleri ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla daha yüksek enerji kapasiteli pillere olan ihtiyaç giderek artmaktadır (Budde-Meiwes vd., 2013; Ting vd., 2015; Halimah vd., 2019). Ancak günümüzde, hiçbir enerji depolama sistemi hibrit ve tam elektrikli araçların tüm gereksinimlerini karşılayabilecek seviyeye gelememiştir (Khaligh & Li, 2010). Bu nedenle, elektrikli araç endüstrisindeki en büyük zorluk, teknolojiyi en iyi şekilde tamamlayan son teknoloji pil sistemini geliştirmektir (Tie & Tan, 2013). Geçmişten günümüze birçok pil sistemleri mevcut olup, en uygun parametrelerde batarya geliştirmek için çalışmalar sürmektedir. Pek çok ülkede desteklenen Ar-Ge programları hem şarj edilebilir hem de yakıt hücresi tiplerinde gelişmiş yönetim sistemleri, yüksek verimli motorlar ve yüksek enerji yoğunluklu yenilikçi piller geliştirmeyi amaçlamaktadır (Guarnieri, 2011; Sun vd., 2020). Bu makalede geçmişten günümüze kadar olan pil kimyalarının bir literatür taraması yapılmıştır. Kullanılan pillerin üstün ve zayıf olan yönleri detaylı şekilde incelenmiştir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN PİL KİMYALARI

2.1. Pillerin Teknik Özellikleri ile İlgili Kavramlar

Elektrikli araçların pil kimyalarının detaylarından bahsetmeden önce bu çalışmada kullanılacak olan pillerin teknik özellikleri ile ilgili kavramlar kısaca anlatılacaktır. Bu tanımlar pil kimyalarının üstün olan ve zayıf olan yönlerini anlamamız için gerekli olan parametreleri kapsamaktadır (Young vd., 2013; Ogura & Kolhe, 2017; Dikmen vd., 2018).

2.1.1. Nominal Gerilim (V)

Pil paketi üzerinde yer alan referans voltaj değeridir. Pilin normal çalışma gerilimidir (Young vd., 2013).

2.1.2. Özgül Enerji (Wh kg⁻¹)

Ağırlıksal (gravimetrik) enerji yoğunluğu olarak da adlandırılan özgül enerji, bir pilin birim kütle başına ne kadar enerji depolayabileceğini tanımlamak için kullanılır. Kilogram başına Watt-Saat (Wh kg⁻¹) olarak ifade edilir. Ayrıca elektrikli bir aracın belirli bir menzil için gerekli olan batarya ağırlığını belirlemek için anahtar parametredir (Ogura & Kolhe, 2017).

2.1.3. Özgül Güç (W kg⁻¹)

Bir pilin ağırlıksal (gravimetrik) güç yoğunluğu olarak da adlandırılan özgül güç, birim kütle başına tepe gücüdür. W kg⁻¹ olarak ifade edilir (Young vd., 2013).

2.1.4. Hacimsel Enerji Yoğunluğu (Wh L⁻¹)

Birim hacim başına nominal akü enerjisidir (Wh L⁻¹). Ayrıca elektrikli bir aracın belirli bir menzil için gerekli olan batarya boyutunu belirlemek için anahtar parametredir (Dikmen vd., 2018).

2.1.5. Deşarj Derinliği (Depth of Discharge-DOD) (%)

Akünün tam dolu (%100) durumundan tam boş (%0) durumuna kadar olan deşarj edilme oranıdır. Örneğin %80 deşarj derinliği demek akünün amper-saat olarak belirtilen kapasitesinin %80'ine kadar deşarj edilmesi anlamına gelmektedir (Ogura & Kolhe, 2017; Dikmen vd., 2018).

2.1.6. Çevrim Ömrü (Cycle Life)

Akünün belli bir deşarj derinliği seviyesine kadar deşarj ve sonra tam şarj edilmesine bir "çevrim" denir. Akünün çevrim ömrü kullanım süresini yani ekonomik ömrünü belirleyen bir parametredir. Akünün ömrünü belirlemede esas önemli olan süresi değil doldur-boşalt sayısıdır (Ogura & Kolhe, 2017).

2.1.7. Kapasite

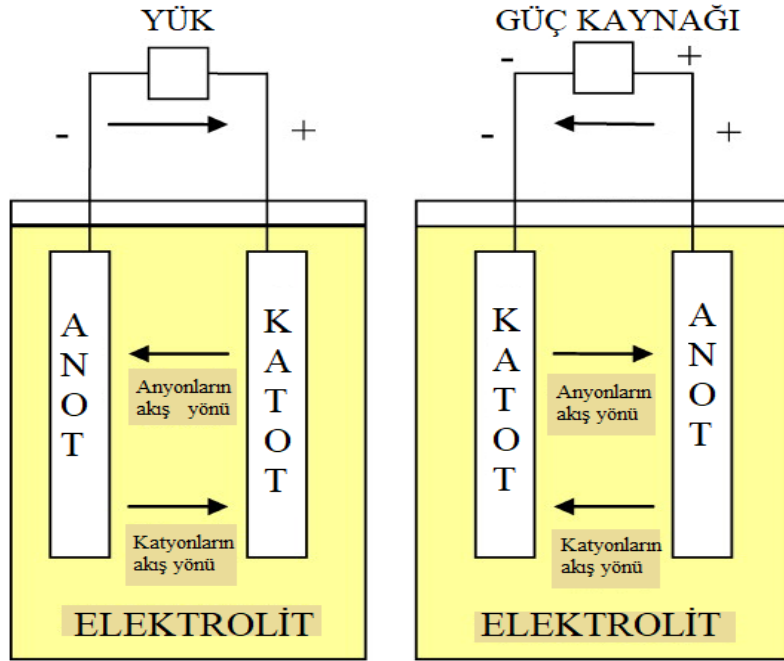
Belirli koşullar altında pilden çıkarılabilecek maksimum enerji miktarını temsil eder. Amper saat (Ah) veya watt saat (Wh) olarak ifade edilebilir ancak ikincisi elektrikli araçlar tarafından daha yaygın olarak kullanılır. Elektrikli araçların, akülerinin kapasitesinin kritik bir yönü olduğu düşünüldüğünde, araçların özerkliğinde doğrudan bir etkisi olduğu için, mümkün olan en kısa sürede daha fazla enerji miktarının depolanmasını sağlayan yeni teknolojilerin ortaya çıkması, bu tür araçların başarısında belirleyici bir faktör olacaktır.

2.2. Pil

Pil, depolanan kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir veya daha fazla elektrokimyasal hücreden oluşan bir depolama cihazıdır (Winter & Brodd, 2004; Tie & Tan, 2013). Akünün kimyasal maddelerinde depolanan potansiyel enerjiyi serbest bırakarak elektrik üretirler (Tarascon & Armand, 2001). Şekil 2'de gösterildiği gibi bir pil tipik olarak bir elektrolit, iki elektrot (pozitif ve negatif) ve bir ayırıcıdan (elektrik olarak yalıtık gözenekli malzeme) oluşur (Lukic vd., 2008; Ramoni & Zhang, 2013). İki elektrot, her ikisi de elektrolit ile bir miktar iyonik bağ halinde kimyasal olarak reaksiyona giren farklı malzemelerden yapılır (Armand & Tarascon, 2008; Rahman vd., 2014). Bu elektrotlar harici bir cihaz vasıtasıyla bağlandığında, elektronlar kendiliğinden daha negatif olandan daha pozitif potansiyele akar (Hadjipaschalis vd., 2009; Young vd., 2013). İyonlar, şarj dengesini koruyarak elektrolit yoluyla taşınır ve elektrik enerjisi harici devre tarafından kullanılabilir. İkincil veya şarj edilebilir pillerde meydana gelen şarj işlemi süresince, akım ters yöne akar (Enache vd., 2014; Lu vd., 2016; Can Güven & Gedik, 2019).

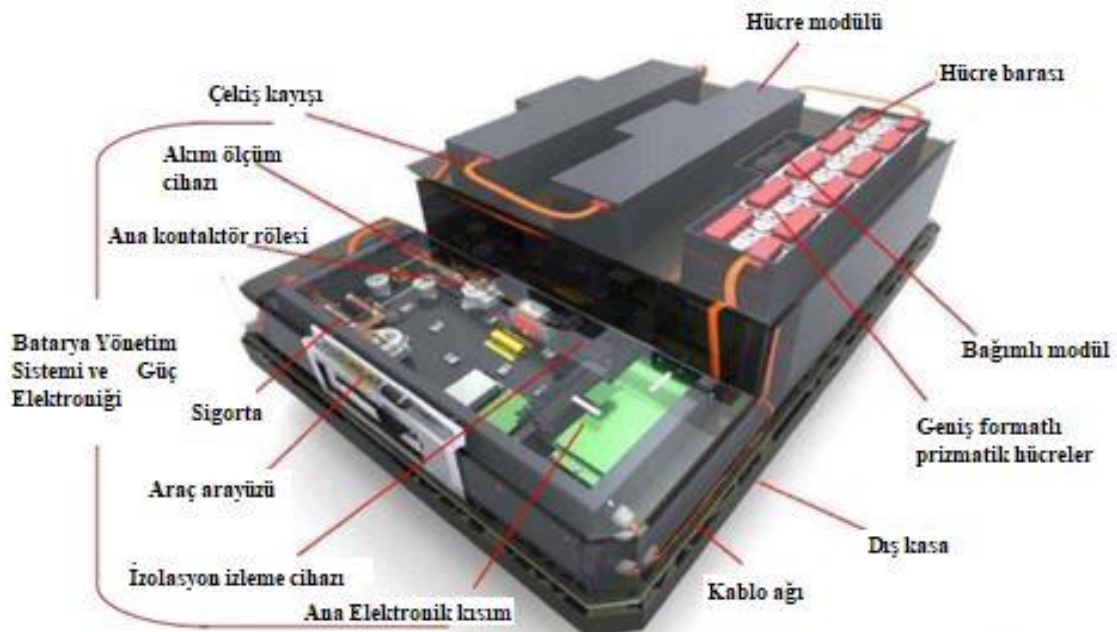
Pil teknolojisinin tasarımındaki temel hususlar tasarım konseptinden dolayı güç yoğunluğuna (W kg⁻¹) ve ağırlıksal enerji yoğunluğuna (Wh kg⁻¹) bağlıdır. Ancak, pil teknolojisi aynı zamanda enerji verimliliği, çevrim ömrü, maliyet, ağırlık ve şarj özellikleri açısından iyi performans gösterebilmelidir (Omar vd., 2011; Kisacikoglu vd., 2012; Hirve & Vidyapeeth, 2018). Elektrikli araçlarda kullanılan piller, dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonları gibi tüketici elektronik cihazlarında kullanılanlardan oldukça farklıdır (Young vd., 2013).

Elektrikli araçlar için gerekli olan yüksek güç (100 kw'a kadar) ve yüksek enerji kapasitesi uygun boyut, ağırlık ve fiyatta sağlanmalıdır (Young vd., 2013; Vidyanandan, 2019).



Şekil 2. Pil Yapısı

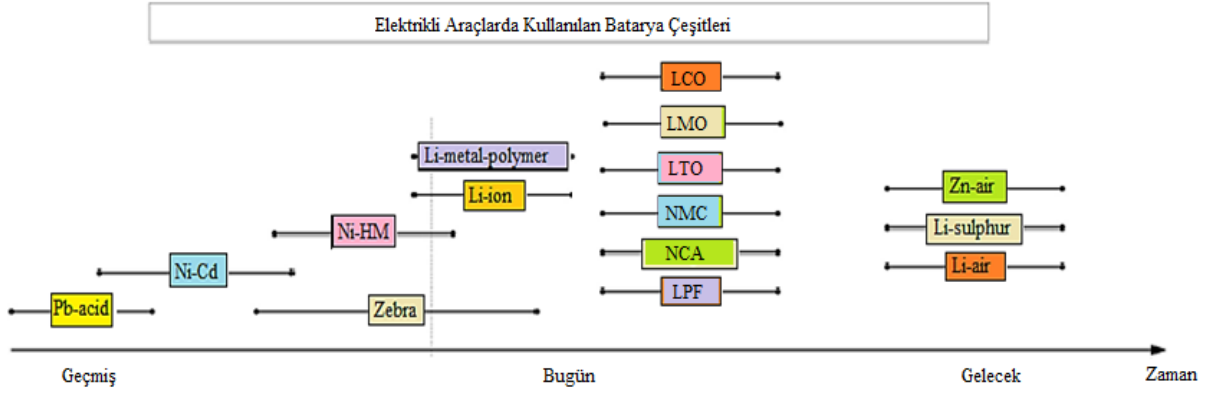
Şekil 3'te, otomotiv akü takımına bir örnek vermektedir. Otomotiv çekiş aküsü sistemleri, bir akü yönetim sistemi tarafından bağlanan ve kontrol edilen akü modülleri ve akü hücrelerinden oluşur. Hücreler, tüm sistemin performansını ve maliyetini önemli ölçüde etkiledikleri için çok önemli bir bileşendir (Duffner vd., 2021). Hücreler nispeten düşük bir voltaja (1,5-4 V arasında) ve sınırlı kapasiteye sahip olduklarından, bu hücreler seri olarak (toplam voltajı kullanılabilir bir seviyeye çıkarmak için) ve paralel olarak düzenlenir. Hücreler, taşıt aktarma organlarının gerektirdiği şekilde, seri ve paralel olarak düzenlenmiş nispeten bağımsız modüllere yerleştirilebilir (Cluzel & Douglas, 2012).



Şekil 3. Otomotiv Akü Takımı

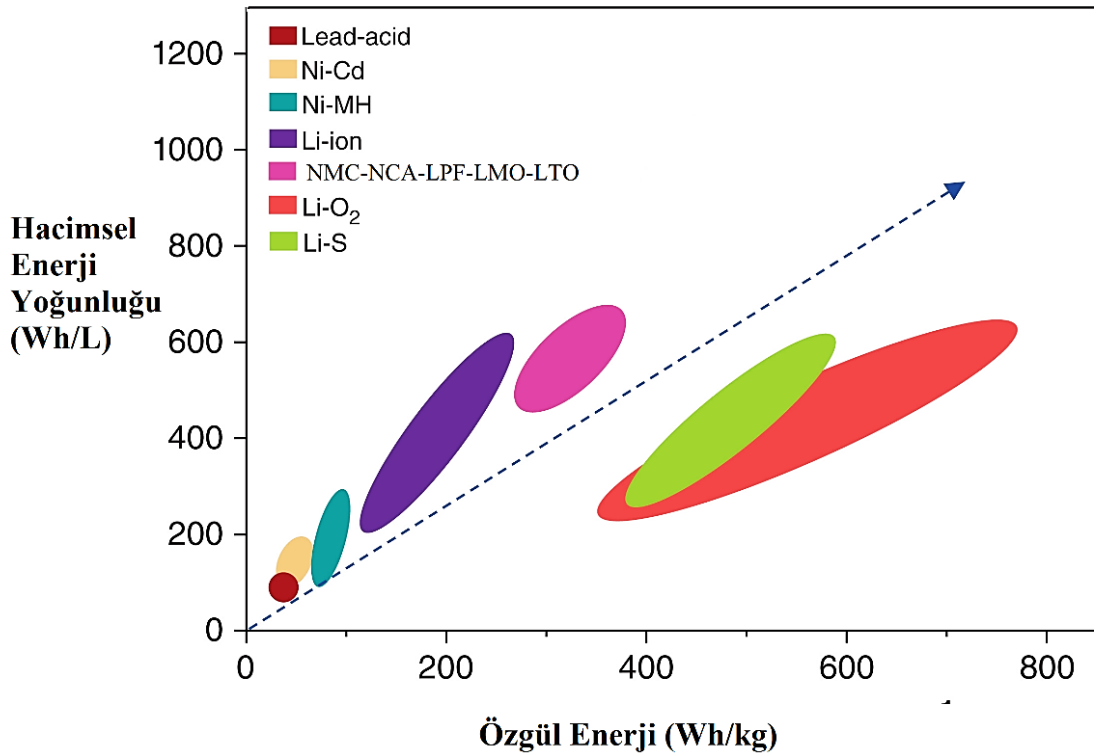
3. PİL ÇEŞİTLERİ

Endüstride kullanılan birçok pil çeşidi mevcut olup bu piller plakalarında veya elektrolitlerinde kullanılan malzemeye göre; Kurşun-asit, Nikel metal hibrit (Ni-MH), Nikel kadmiyum (Ni-Cd) ve Lityum iyon (Li-ion) pil olarak sınıflandırılırlar (Chang, 2013). Şekil 4'te elektrikli araçların pil gelişiminin zaman çizelgesini göstermektedir (Catenacci vd., 2013; Yong vd., 2015).



Şekil 4. Elektrikli Araçların Pil Geliştirme Zaman Çizelgesi

Mevcut elektrikli araç pili, elektrikli araçların maksimum menzili doğrudan etkileyen nispeten düşük enerji yoğunluğuna sahiptir (Tie & Tan, 2013). Ancak, elektrikli araçlarda pil teknolojileri son yıllarda büyük gelişmeler göstermiştir. Günümüzde farklı anma voltajı ve enerji yoğunluğuna sahip çeşitli pil teknolojileri bulunmakta olup en uygun parametrelerde pil üretebilmek için farklı kimyalar kullanılarak pil geliştirme çalışmaları devam etmektedir (Muratoğlu & Akkaya, 2015). Şekil 5'te en yaygın pil teknolojilerinin Ragone çizimi gösterilmektedir (Liang vd., 2019).



Şekil 5. Pil Teknolojilerinin Ragone Çizimi

Geçmişte taşımada kullanılan ilk akü teknolojisi kurşun-asit pillerdir. Kurşun asidin adı, elektrik üretmek için kullanılan kurşun elektrotları ve asit kombinasyonundan gelir. Kurşun-asit piller olgunlaşmış bir teknolojidir

ve elektrikli araçlar için maliyet açısından bir değerlendirme yapılırsa enerji depolama konusunda en uygun pil çeşididir (Enache vd., 2014; Miao vd., 2019; Asghar vd., 2021). Ancak enerji yoğunluğunun düşük, ağırlığının fazla olması dezavantaj oluşturmaktadır (Armand & Tarascon, 2008; Yong vd., 2015).

Kurşun-asit piller kısa süre sonra nikel-kadmiyum (Ni-Cd) ve nikel-metal hidrit (Ni-MH) gibi nikel bazlı piller ile değiştirildi. Nikel bazlı pil, nispeten olgunlaşmış teknoloji olarak kabul edilir ve kurşun asit pile kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir (Tubb, 1939; Armand & Tarascon, 2008).

Ni-Cd pil teknolojisinin zayıf şarj ve deşarj verimliliği, yüksek kendi kendine deşarj oranı, bellek etkisi ve soğuk havalarda düşük performans gibi önemli dezavantajları vardır (Cluzel & Douglas, 2012). Ni-Cd pilin hafıza etkisi, yüksek şarj ve deşarj oranı elektrikli araç uygulaması için uygun değildir. Aslında, Ni-Cd pili, bileşenlerinin toksisitesi nedeniyle yasaklanmıştır (Catenacci vd., 2013). Düşük şarj verimliliği, ayda %20'ye kadar çok yüksek kendi kendine deşarj oranı, uzun şarj olma süreleri ve pilin kullanılmadığı zamanlarda kendini boşaltması gibi olumsuz yönleri sebebiyle elektrikli araç uygulamalarında Ni-Cd pillerin kullanımı azalmıştır (Yong vd., 2015).

Elektrikli araç pil teknolojisine Ni-MH pil ile aynı zamanda ZEBRA pil veya sodyum-nikel klorür (Na-NiCl_2) eklenmiştir. Bu tip pil, elektrolit olarak sodyum tuzu kullanır (Cluzel & Douglas, 2012) ve 245 ila 350°C arasında oldukça yüksek bir çalışma sıcaklığına sahiptir. ZEBRA pil, elektrikli araç uygulaması için uygun olan yüksek enerji yoğunluğuna ve güç yoğunluğuna sahiptir. Bununla birlikte, aşırı çalışma sıcaklığı, termal yönetimi ve güvenlik endişeleri üzerinde büyük baskı oluşturmuştur (Yong vd., 2015).

Elektrikli araçlarda pil olarak Lityum tabanlı pilin kullanılması yeni bir dönemi başlatmıştır. Lityum bazlı pil, yüksek enerji yoğunluğu, yüksek güç yoğunluğu, hafif, ucuz, toksik olmayan ve hızlı şarjı kabul eden umut verici pil teknolojilerinden biridir (Armand & Tarascon, 2008; Wen vd., 2020). Lityum bazlı pil en yeni elektrikli araç grubuna hakimdir. En iyi elektrikli araç seçenekleri olan Nissan Leaf, Renault Twizy, Hyundai Ionic, Volkswagen E-Golf, Mitsubishi i-MiEV, Tesla Model S ve Chevrolet Volt'ta Lityum iyon pil takımları kullanılmaktadır (Cluzel & Douglas, 2012; Catenacci vd., 2013; Iclodean vd., 2017). Yerleşik birkaç pil, Lityum-iyon (Li-iyon), Lityum-İyon Polimer (Li-Po) ve Lityum-Demir Fosfat (LiFePO_4) gibi lityum bazlı pil kategorisine girer. Li-Po pil, daha iyi paketleme optimizasyonu için çeşitli boyutlarda şekillendirilebilen Li-ion pilden geliştirilmiştir. LiFePO_4 pil, yüksek güç yoğunluğu, daha fazla yaşam döngüsü ve daha iyi güvenlik sağlar, ancak Li-ion pil ile karşılaştırıldığında daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Mevcut lityum tabanlı pil teknolojisi tam olarak olgunlaşmamış, ancak gelecekteki elektrikli araç uygulamaları için mükemmel şarj edilebilir pil olma potansiyelini taşımaktadır (Yong vd., 2015).

Deneysel aşamada üstün performans sağlayan bazı pil teknolojileri vardır. Bu piller Lityum-Sülfür (Li-S), Çinko-Hava (Zn-air) ve Lityum-Havadır (Li-air). Li-S pil lityum bazlı pil kategorisinde nispeten yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve ucuz kükürt kullanımı nedeniyle düşük maliyet avantajı vardır. Bununla birlikte, Li-S pilin yüksek deşarj oranı ve kısa ömür döngüsü vardır (Kolosnitsyn & Karaseva, 2008). Gelecekteki elektrikli araçlar için diğer potansiyel aday ise Zn-air bataryadır. Bu tür bir pilin lityum bazlı pilden daha yüksek olan çok yüksek enerji yoğunluğu vardır. Mevcut Zn-air akünün ana dezavantajları düşük güç yoğunluğu ve kısa ömür döngüsüdür. Benzer şekilde, Li-air pil hala prototip aşamasındadır ve henüz ticarileştirilmemiştir (Christensen vd., 2011). Bununla birlikte, 1700 Wh kg^{-1} 'dan fazla teorik yüksek ağırlıksal enerji yoğunluğu, konvansiyonel içten yanmalı motorlu taşıt ile rekabet etmesini sağlamaktadır (Miao vd., 2019). Mevcut araştırma, Elektrikli araçlarda tüm elektrikli tahrik aralığını genişletmek için bu çekici pil teknolojisine geliştirilmesine odaklanmıştır (Yong vd., 2015). Yukarıda bahsedilen pil çeşitlerinin detaylı olarak incelenmesi aşağıda verilmiştir.

3.1. Kurşun Asit Piller

Kurşun asit en eski ve en iyi bilinen şarj edilebilir aküdür (Van den Bossche vd., 2006; Sun vd., 2020). Kurşun asitli ikincil pil 1859 yılında Gaston Plante tarafından Fransa'da icat edildi (Soloveichik, 2011; Canis, 2013). Araç endüstrileri, kurşun asit akülerle denemeye 1900 yüzyılın başlarında yoğun bir şekilde başladı (Lukic vd., 2008; Hirve & Vidyapeeth, 2018). Kurşun-asit pillerde negatif elektrot olarak kurşun (Pb), pozitif elektrot olarak kurşun dioksit (PbO_2) ve elektrolit olarak ise sülfürik asit (H_2SO_4) materyalleri kullanılmaktadır

(Hadjipaschalis vd., 2009; Muratoğlu & Akkaya, 2015). Güç üretimi için elektrotlar, seyreltilmiş bir sülfürik asit çözeltisinden oluşan bir elektrolite daldırılır. Deşarj sırasında, sülfürik asit sünger kurşun ve kurşun dioksit ile birleşerek kurşun sülfat ($PbSO_4$) ve su oluşturur (Oman & Gross, 1995). Deşarj işlemi gerçekleştikçe, elektrolit gittikçe seyreltilir. Buna karşılık, şarj sırasında elektrolitteki sülfürik asit konsantrasyonu artar (Khaligh & Li, 2010; Gerssen-Gondelach & Faaij, 2012). Su basmış kurşun-asit piller, dünya çapında çok sayıda otomotiv uygulamalarında aydınlatma ve ateşleme için kullanılır (May, 2006; Van den Bossche vd., 2006; Budde-Meiwes vd., 2013).

Bu pil teknolojisinin dünyada çok yaygın olarak tercih edilmesinin birkaç nedeni vardır. Kurşun-asit piller basit, üretimi ucuz, yaygın olarak kullanılan ve kolayca üretilebilen bir teknolojiye dayanır. Nispeten küçük boyutlu piller, motor bölmesine kolayca sığar, dayanıklı ve güvenilirdir ve neredeyse hiç bakım gerektirmez. En önemlisi, birçok döngüde şarj olurken motorları çalıştırmak için yeterli enerji patlamaları sağlar (Canis, 2013). Bir kurşun-asit hücresinin anma gerilimi 2V olup %85 ile %90 arasında yüksek enerji verimliliğine sahiptir (Hadjipaschalis vd., 2009). Bununla birlikte, bu piller için sınırlayıcı faktörler nispeten düşük çevrim ömrü ve pilin çalışma ömrüdür. Kurşun asitli akülerin tipik kullanım ömürleri 1200 ila 1800 şarj-deşarj döngüsü veya 5-15 yıl arasındadır (Cano vd., 2018). Çevrim ömrü, deşarj derinliği ve sıcaklığından olumsuz etkilenir. Bataryayı tamamen deşarj etme girişimleri elektrotlara özellikle zarar verebilir, böylece kullanım ömrünü kısaltır (Hadjipaschalis vd., 2009).

Piyasaya sürülen ilk elektrikli araç olan General Motors (GM) EV1 elektrikli bir tahrik motoruna güç sağlamak için kurşun-asit pil kullanmıştır (Kisacikoglu vd., 2012; Vidyanandan, 2019). Fakat kurşun asit piller düşük ağırlıksal enerji yoğunluğu $30-40 \text{ Wh kg}^{-1}$ (özgül enerji) ve düşük özgül güç 180 W kg^{-1} nedeniyle daha sonraki elektrikli araçlarda kullanılmamıştır (Perujo vd., 2012; Budde-Meiwes vd., 2013). Bu nedenle kurşun asit pil şu anda sınırlı menzil ve hızın endişe yaratmadığı golf arabası, tekerlekli sandalye, forkliftler ve elektrikli bisikletlerde kullanılmaktadır (Van den Bossche vd., 2006; Cluzel & Douglas, 2012; Gerssen-Gondelach & Faaij, 2012). Son birkaç yıldaki yapılan çalışmalar ile birlikte kurşun asidin deşarj döngü süresini azaltma çabaları için çeşitli karbon katkı maddeleri keşfedilmiştir (Jaiswal & Chalasani, 2015; Cano vd., 2018; Hu vd., 2019). Bu gelişme kurşun asit pillerin, hafif ve tam hibrit araçlarda kullanıma izin veren performans özellikleri göstermiştir (Budde-Meiwes vd., 2013). Günümüzde, kurşun-asit bataryalar mikro-hibrit araçlarda kullanılmaktadır. Citroen, 2005 yılında kentsel modda yaklaşık %10 yakıt ekonomisi elde etmeyi başaran 55 Ah batarya ile donatılmış C3 modelini piyasaya sürmüştür (Enache vd., 2014).

3.2. Alkalin Piller

Nikel piller, kurşun pillerden daha uzun ömürlü olup aynı zamanda daha iyi bir güç ve enerji yoğunluğu sunan ilk ciddi rakiptir (Tubb, 1939; Enache vd., 2014). Alkalin piller nikel tabanlıdır ve elektrolit olarak bir alkalin çözeltisi kullanır (Van den Bossche vd., 2006). Nikel bazlı piller temel olarak nikel-kadmiyum (Ni-Cd), nikel-metal hidrit (Ni-MH) ve nikel-çinko (Ni-Zn) pillerdir (Enache vd., 2014).

Her üç tip de sırasıyla pozitif elektrot ve nikel hidroksit olan elektrolit ve bir miktar lityum hidroksit içeren sulu bir potasyum hidroksit çözeltisi için aynı malzemeyi kullanır. Negatif elektroda gelince, Ni-Cd tipi kadmiyum hidroksit, Ni-MH metal alaşımı ve Ni-Zn çinko hidroksit kullanır. Alkalin piller için nominal voltaj $1,2 \text{ V}$ 'dir (Ni-Zn tipi için $1,65 \text{ V}$). Ağırlıksal enerji yoğunlukları sırasıyla Ni-Cd için 50 Wh kg^{-1} , Ni-MH için 80 Wh kg^{-1} ve Ni-Zn için 60 Wh kg^{-1} 'dir (Hadjipaschalis vd., 2009).

3.2.1. Ni-Zn (Nikel Çinko) Piller

Nikel-çinko pil, diğer alkalin pillere kıyasla daha yüksek nominal voltaj değerine sahiptir ($1,65 \text{ V}$). Ağırlıksal enerji yoğunluğu ise 60 Wh kg^{-1} 'dir. Düşük maliyetli malzemelere sahiptir ve çevre dostudur. Bu piller elektrikli araç uygulamalarında çok fazla kullanılmamıştır. Çünkü Ni-Zn pillerinin gelişimini önleyen dendritlerin hızlı büyümesi nedeniyle kısa çevrim ömrüne sahiptir (Van den Bossche vd., 2006; Khaligh & Li, 2010).

3.2.2. Ni-Cd (Nikel Kadmiyum) Piller

Nikel kadmiyum pilleri 1899'da Waldemar Jungner tarafından daha iyi depolama kapasitesine sahip bir pil olarak üretildi (Miao vd., 2019). Nikel kadmiyum pillerde negatif elektrot olarak kadmiyum-kadmiyum hidroksit (Cd-Cd(OH)_2), pozitif elektrot olarak nikel hidroksit-nikel oksihidroksit ($\text{Ni(OH)}_2\text{-NiOOH}$) ve elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) materyalleri kullanılmaktadır (Enache vd., 2014; Hirve & Vidyapeeth, 2018). Ana uygulama alanları, radyolar, biyomedikal ekipmanlar, profesyonel video kameralar, el aletleridir.

Nikel-kadmiyum pillerin ömrü uzundur ve hasar görmeden tamamen deşarj edilebilir. Yüksek deşarj akımına sahiptir. Kurşun-asit pillere göre daha yüksek ağırlıksal enerji yoğunluğuna $55\text{-}80\text{ Wh kg}^{-1}$, daha yüksek özgül güce 200 W kg^{-1} ve daha uzun çevrim ömrüne sahiptir (Khaligh & Li, 2010; Soloveichik, 2011; Budde-Meiwes vd., 2013). Bu pilin kullanımını etkileyen faktörlerden birisi yüksek maliyetidir (Tie & Tan, 2013). Bunun başlıca nedeni malzemenin geri dönüşüm maliyetinin yüksek olmasıdır. Son derece zehirli bir madde olan kadmiyum, uygun şekilde atılmadığı takdirde çevre kirliliğine neden olabilecek bir tür ağır metaldir (Hirve & Vidyapeeth, 2018). Nikel-kadmiyum pillerin kısmen boşaldıktan sonra tekrar tekrar şarj edildiklerinde maksimum enerji kapasitelerini kademeli olarak kaybederek daha az şarj tutmalarına neden olur (hafıza etkisi) ve bu yüzden Nikel-kadmiyum (Ni-Cd) pil, araç uygulaması gibi yüksek şarj / deşarj hızında kullanılmaya uygun olmayan bir hafıza etkisine sahiptir (Van Schalkwijk, 1993; Yong vd., 2015). Tüm bu aksaklıklara rağmen Peugeot 106, Citroen AX, Renault Clio ve Ford Think Car gibi araçlarda kullanılmaktadır (Hirve & Vidyapeeth, 2018). Nikel-kadmiyum pillerin enerji yoğunluğu ve maliyetleri göz önünde bulundurularak elektrikli araçlarda kullanımında önemli bir rol oynaması beklenmemektedir (Budde-Meiwes vd., 2013).

3.2.3. Ni-MH (Nikel Metal Hidrit) Piller

Kurşun-asit akülerin eksiklikleri göz önüne alındığında, araştırmacılar 1970'lerden beri daha iyi akü teknolojileri aradılar (Canis, 2013). Ni-Cd pil o zaman taşınabilir elektronik cihazlar için tek güç kaynağıdır. Fakat 80'lerde kadmiyumun (Cd) fiyatının artmasının neden olduğu krizin sonucunda yapılan Ar-Ge çalışmalarında anodu Nikel tabanlı olan ancak katotta kadmiyum içermeyen pil üretmek vardı (Enache vd., 2014). Kadmiyum ile ilgili çevre sorunlarının da etkisiyle kadmiyum elektrotu yerine metal hidrat kullanılmıştır (Muratoğlu & Akkaya, 2015). 1991 yılında ticarileştirilen Ni-MH pil en yaygın nikel bazlı pil olmuştur (Cano vd., 2018). Kurşun asit ve nikel kadmiyum pillerden daha fazla ağırlıksal enerji yoğunluğuna $60\text{-}95\text{ Wh kg}^{-1}$ ve özgül güce $200\text{-}300\text{ W kg}^{-1}$ sahiptir (Cano vd., 2018; Vidyanandan, 2019). Bununla birlikte, nikel ve hidrit depolama metallerinin daha yüksek maliyeti de onları Kurşun-asit pillerden daha pahalı hale getirmiştir. Zehirli malzeme içermezler. Taşınabilir ve daha sonra çekiş aküleri olarak 20 yıldan fazla bir süredir piyasada olmalarına rağmen, ikincil nikel-metal hidrit (Ni-MH) piller sadece yakın zamanda UPS ve telekom gibi sabit uygulamalar için düşünülmüştür. Ni-MH piller, telekom uygulamaları için önemli olan daha yüksek özgül enerjiye ve daha iyi ısı toleransına (70°C 'ye kadar) sahiptir (Soloveichik, 2011).

Nikel Metal hidrit (Ni-MH) 1997 yılında hibrit araçlarda kullanılmaya başlandı. 2000 yılların başında Ni-MH, özellikle lityum iyondan daha iyi dayanıklılık ve güvenlik özellikleri, ultrakapasitörlerden daha düşük maliyet ve daha yüksek enerji nedeniyle otomotiv akü pazarına hâkim oldu (Kromer & Heywood, 2007; Nemry vd., 2009; Vidyanandan, 2019). Ovonic Battery Company, Ni-MH pil teknolojisi için öncü ve uluslararası lisans vericidir. Tüm büyük Ni-MH pil üreticileri Ovonic lisansı altında çalışmaktadır (Young vd., 2011). Toyota Prius ve Honda Insight, Honda Civic, Honda Accord ve Ford Escape dahil olmak üzere birçok hibrit araçta kullanıldı (Budde-Meiwes vd., 2013; Canis, 2013; Nemry vd., 2009). Ancak Ni-MH pillerin maksimum potansiyellerine ulaştığı düşünülmektedir. Uzmanlar gelecek yıllar için Ni-MH pillerde bulunan ($7\text{-}8\text{ kg kWh}^{-1}$) yüksek nikel oranı ve nikel fiyatlarının yüksek olması nedeniyle bu pillerde maliyet düşüşleri beklenmemektedir (Nemry vd., 2009; van Vliet vd., 2010). Bu nedenle Ni-MH aküler, elektrikli araçlarda büyük ölçekli uygulamalar için ciddi bir aday olarak görülmemektedir (Gerssen-Gondelach & Faaij, 2012).

3.3. Zebra Piller (Zero Emission Battery Research Activity)

80'li yıllarda, yeni bir gelişme yönünün ardından, anot için aktif malzeme olarak sıvı sodyum kullanan piller üretilmeye başlandı (Enache vd., 2014). Sodyum nikel klorür (NaNiCl) pillere Zebra pilleri de denir. Zebra

ismi “Sıfır Emisyon Batarya Araştırma Faaliyeti” (Zero Emission Battery Research Activity) projesinden türetilmiştir (Budde-Meiwes vd., 2013). Zebra, katot için aktif malzeme olarak nikel klorürü (NiCl_2) ve anot için sıvı sodyum kullanır. Elektrolit iki bölümden oluşur: sıvı sodyumu çevreleyen bir seramik elektrolit, katot için sodyum klorür ve alüminyumdan oluşan ikincil bir elektrolit. Klorür (Cl^-) iyonları elektrolitten gelen hareketli iyonlardır (iyonik akımı sağlarlar). Deşarj sırasında elde edilen elektrik enerjisi, sodyumun ürün olarak ortaya çıkan nikel klorür, nikel ve sodyum klorür ile birleştirilmesinden kaynaklanır (Enache vd., 2014).

Kurşun asit ve nikel tabanlı pillere göre enerji yoğunluğu ve nominal voltaj değeri daha fazladır. Zebra pillerin nominal voltaj değeri 2,6V, ağırlıksal enerji yoğunluğu 90-120 Wh kg^{-1} ve özgül gücü 155 W kg^{-1} 'dir. Bu pilin dezavantajları düşük özgül güç, kendi kendine deşarj problemi ve sıcaklık yönetimidir (Sun vd., 2020). Zebra pilinin ana karakteristiği yüksek sıcaklıkta çalışması olup 300-350°C'lik yüksek bir sıcaklıkta sıvı halde muhafaza edebilen erimiş bir tuz elektrolitine sahiptir (Tie & Tan, 2013; Sun vd., 2020). Yüksek sıcaklık sisteminin termal yönetimi pil ile entegredir ve herhangi bir özel işletme veya güvenlik problemi göstermez (Van den Bossche vd., 2006). Ancak bu piller, yüksek sıcaklıkta muhafaza edilmezse, bekleme durumunda 24 saat içinde yaklaşık %10'luk çok yüksek kendi kendine deşarj oranına sahiptir (Hirve & Vidyapeeth, 2018). Bu sorun, bu pili filo uygulamalarında (uzun bekleme süreleri olmadan) yoğun olarak kullanılan araçlar için daha uygun hale getirir (Van den Bossche vd., 2006; Hirve & Vidyapeeth, 2018). Ayrıca Mendrisio-İsviçre'deki elektrikli araçların tanıtım programı kapsamında elektrikli araç Renault Twingo üzerine monte edilmiştir (Enache vd., 2014).

3.4. Lityum İyon (Li-İon) Piller

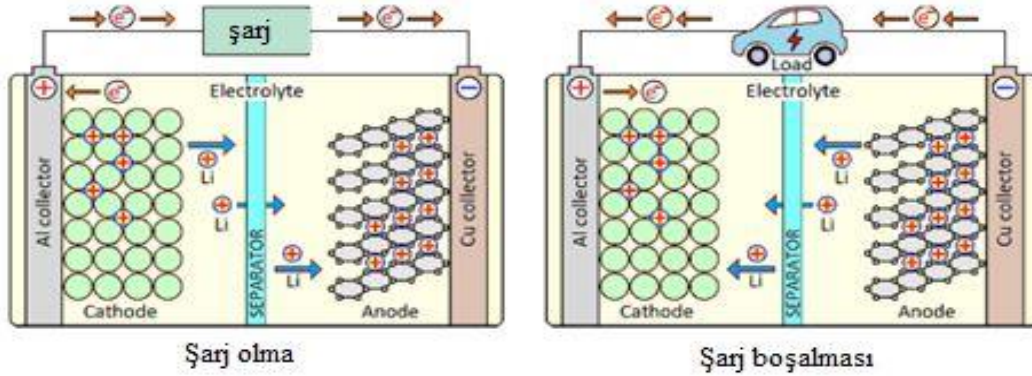
Li-ion pillerin icadı 1970'lerde M. Stanley Whittingham'ın çalışmalarına dayanmaktadır. Ardından Whittingham ile birlikte John B. Goodenough ve Akira Yoshino'nun beraber çalışması neticesinde bu teknolojinin temelleri atılmıştır (Yoshino, 2012; The Nobel Prize in Chemistry, 2019). Li-ion pilleri Sony Corporation tarafından 1991 yılında ticari olarak piyasaya sürülmüştür (Bruce vd., 2012; Lu vd., 2017). Li-ion piller Pb-asit ve Ni-MH gibi diğer pil teknolojileriyle kıyaslandığında yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun raf ömrü gibi özellikleri ile enerji depolama alanında en çok gelecek vaat eden teknolojiler arasında öne çıkmaktadır (Bai & Zhang, 2014; Choi & Aurbach, 2016; Park vd., 2016).

Birim hacim ve ağırlık başına depolanabilen enerji miktarı fazla olduğundan cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, müzik çalarlar ve dijital kameralar gibi taşınabilir aygıtlarda yaygın olarak kullanımı tercih edilmiştir (Bentley & Heacock, 1996; May, 2006; Lin vd., 2017). Lityum iyon piller şu anda ticari otomotiv aküleri için büyük pazara hakimdir. BMW i3, Tesla, Nissan Leaf, BYD ve diğer elektrikli araçların tümü sürüş gücü olarak lityum-iyon tabanlı piller kullanmaktadır (Vidyandan, 2019).

Lityum iyon piller için, kendi kendine deşarj oranı ayda maksimum %5 oranında çok düşüktür ve pil ömrü 1500'den fazla döngüye ulaşabilir. Bununla birlikte, bir lityum-iyon pilin ömrü sıcaklığa bağlıdır, yaşlanma yüksek sıcaklıklarda çok daha hızlıdır ve derin deşarjlar nedeniyle çevrim ömrü ciddi ölçüde azalmaktadır. Li-ion kimyası aküye zarar verebilecek, ömrünü kısaltabilecek ve hatta tehlikeli durumlara neden olabilecek aşırı şarj ve derin deşarja karşı çok hassastır (Sundaram vd., 2016). Ek olarak, lityum iyon piller kırılmalıdır ve güvenli çalışmayı sürdürmek için bir koruma devresi gerektirir. Her bir pil takımına yerleştirilen koruma devresi, şarj sırasında her hücrenin tepe voltajını sınırlar ve deşarj sırasında hücre voltajının çok düşmesini önler (Gerlitz vd., 2021). Ayrıca aşırı sıcaklıkları önlemek için hücre sıcaklığı izlenir. Çoğu paketdeki maksimum şarj ve deşarj akımı da sınırlıdır (Hadjipaschalis vd., 2009).

Bir Li-ion hücrenin ana bileşenleri: pozitif (katot) ve negatif (anot) elektrotlar, sulu bir elektrolit ve bir ayırıcıdır (May, 2006; Kromer & Heywood, 2007; Duffner vd., 2021). Katot, lityum metal oksitlerden veya fosfatlardan (LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4 vb.) yapılmıştır ve anot için grafit standart seçimdir (Khaligh & Li, 2010; Miller, 2015; Wen vd., 2020). Sıvı elektrolit, bir lityum tuzu (örneğin, LiPF_6) ve bir organik çözücü olan dietilen karbonat karışımından oluşur (Parsons & Mepsted, 2014; Stan vd., 2014; Gerlitz vd., 2021). Elektrolitin fonksiyonu, şarj ve deşarj döngüleri sırasında anot ve katot arasında pozitif iyonlar taşımaktır. Elektrotlar ayırıcı adı verilen bir yalıtım tabakası ile izole edilir. Ayırıcının işlevi dahili hatalar veya anormal koşullar nedeniyle sıvı elektrolitin kurumaması durumunda anot ve katodun kısa devre yapmasını önlemektir (Vidyandan, 2019; Gerlitz vd., 2021).

Bir Li-ion pilin çalışması mantığı Şekil 6'da gösterilmiştir. Şarj cihazı bataryaya bağlandığında, katot (+) tarafındaki lityum atomları lityum oksit (LiO_2) veya fosfattan (PO_4^3) ayrılır. Bir Li atomu oldukça kararsız olduğundan, anında bir Li iyonuna (Li^+) ve bir elektrona (e^-) ayrışır. Pozitif yüklü Li iyonları anoda doğru çekilerek elektrolitten akar ve grafit tabakalarında hapsolür. Elektronlar, negatif yükleri nedeniyle elektrolitten geçemezler ve bu nedenle şarj cihazından negatif elektroda akmaya zorlanırlar. Katottaki tüm Li iyonları anoda ulaştığında, pilin tamamen şarj olduğu kabul edilir. Böylece, yükleme sırasında Li iyonları katottan çıkarılır ve anodun içine nakledilir (Cheng vd., 2021; Gerlitz vd., 2021). Anottaki Li iyonları kararlı bir durumda değildir. Hücre bir yüke bağlandığında (yani boşaltma sırasında), Li iyonları ve elektronlar anottan katoda gider ve kararlı metal oksit olarak katoda biriktirilir. Anottaki tüm Li iyonları katoda geri taşındığında, pil tamamen boşalır ve yeniden şarj edilmesi gerekir (Stan vd., 2014; Vidyanandan, 2019).



Şekil 6. Li-ion Batarya Çalışma Mantığı

Lityum iyon piller, çeşitli anot ve katot malzemeleri kombinasyonlarını kullanan bir pil kimyası ailesinden oluşur. Her kombinasyonun güvenlik, performans, maliyet ve diğer parametreler açısından belirgin avantajları ve dezavantajları vardır (Dinger vd., 2010).

Lityum iyon pillerde pozitif elektrot olarak diğer materyallere göre düşük toksit, yüksek kapasite ve ucuz olması avantajı ile lityum metal oksitler kullanılmaktadır (Kwade vd., 2018). Yaygın olarak kullanılan lityum tabanlı oksitler: Lityum Kobalt Oksit (LCO), Lityum Mangan Oksit (LMO), Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum (NCA), Lityum-Nikel-Mangan-Kobalt (NMC), Lityum Titanat (LTO) ve Lityum-Demir-Fosfat (LFP) olarak sınıflandırılır (Burke & Miller, 2009; Dinger vd., 2010; Muratoğlu & Akkaya, 2015; Sun vd., 2020).

LCO (Lityum-Nikel-Kobalt) pillerin ağırlıksal enerji yoğunluğu (özellik güç) yüksek fakat güç yoğunluğu düşüktür. Kobalt esaslı (LCO) hücreler genellikle uzun çalışma süresi elde etmek için cep telefonları, kameralar, dizüstü bilgisayarlar vb. gibi taşınabilir aygıtlarda kullanılır (Van den Bossche vd., 2006). Bununla birlikte, LCO kimyası termal olarak çok kararsızdır ve kolayca potansiyel bir yangın tehlikesi haline gelebilir. LCO piller, yüksek maliyetlerinden dolayı elektrikli araçlarda kullanılmaz (Burke & Miller, 2009; Wang & Huang, 2011). Şu anda, mangan ve nikel bazlı Li-ion piller elektrikli araçların çekışı için standart seçimdir (Stan vd., 2014; Vidyanandan, 2019).

NCA (Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum) piller doğrudan LCO pillerin yerine kullanılabilir çünkü benzer voltajda çalışır, benzer çevrim ömrüne ve güç kapasitesine sahiptir (Parsons & Mepsted, 2014; Goutam vd., 2015). NCA piller LCO'ya göre daha iyi bir güvenlik özelliğine sahiptir. Ayrıca, NCA tabanlı piller güç yoğunluğu, enerji yoğunluğu ve kullanım ömrü açısından iyi performans gösterir (Fergus, 2010; Stan vd., 2014; Wen vd., 2020). NCA pil kimyasının ana dezavantajı düşük güvenlik ve yüksek maliyetlerdir (Fergus, 2010). NCA teknolojisi son zamanlarda Tesla araçlarda kullanılmıştır ve daha da baskın olması beklenmektedir (Dinger vd., 2010; Ding vd., 2019; Sun vd., 2020).

NMC (Lityum-Nikel-Mangan-Kobalt) tabanlı pil hücreleri yüksek enerji kapasitesine sahiptir ve yüksek voltajlarda çalışabilir (Fergus, 2010; Wen vd., 2020). Araç üreticileri tarafından başarılı bulunan NMC piller, otomotiv uygulamaları için ön plana çıkan bir pildir.

LMO (Lityum-Manganez-Oksit) pilleri, kararsız hale gelmeden önce 250°C'ye dayanabildikleri için daha iyi termal stabiliteye sahiptir (Wang & Huang, 2011; Stan vd., 2014). LMO hücreleri çok düşük iç dirence sahiptir ve yüksek akım sağlayabilir ve bu nedenle bu piller elektrikli aletler ve tıbbi cihazlar için kullanılır (Goutam vd., 2015; Vidyanandan, 2019). Elektrikli araçlarla kullanımı NMC piller ile karıştırılarak sağlanabilmektedir.

LFP (Lityum-Demir-Fosfat) piller yüksek deşarj akımına sahiptir (Scrosati & Garche, 2010; Parsons & Mepsted, 2014). Termal ve kimyasal stabilitesi iyi olup ayrıca düşük maliyetinden dolayı elektrikli araçlara yaygın olarak uygulanırlar (Tie & Tan, 2013; Hannan vd., 2018; Sun vd., 2020;). Ancak LCO'ya kıyasla genel enerji depolama alanı azdır (Frieske vd., 2014; Parsons & Mepsted, 2014; Muratoğlu & Akkaya, 2015).

LTO (Lityum-Titanat-Oksit) piller ise iyi bir döngü kararlılığına ve yüksek güç yoğunluğuna sahiptir (Bruce vd., 2008) ancak çok pahalıdır (Frieske vd., 2014; Morali & Erol, 2020). Lityum-Titanat akünün, şu anda Mitsubishi'nin i-MiEV elektrikli araçları tarafından kullanılan diğer lityum iyon akülerden daha hızlı şarj olma avantajı vardır (Tie & Tan, 2013).

Yukarda detaylıca anlatılan Lityum tabanlı pillerin nominal voltaj, tam şarj, özgül enerji, şarj ve deşarj oranı, döngü ömrü, kullanıldığı yerler, üstün ve zayıf olan yönleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. En Yaygın Lityum İyon Bazlı Pillerin Özeti

Kimya	Lityum Kobalt Oksit	Lityum Manganez Oksit	Lityum Nikel Manganez Oksit	Lityum Demir Fosfat	Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit	Lityum Titanat Oksit
Kısaltma	LiCoO ₂ (LCO)	LiMn ₂ O ₄ (LMO)	LiNiMnCoO ₂ (NMC)	LiFePO ₄ (LFP)	LiNiCoAlO ₂ (NCA)	Li ₂ TiO ₃ (ortak) (LTO)
Nominal Voltaj	3.60V	3.70V (3.80V)	3.60V (3.70V)	3.20, 3.30V	3.60V	2.40V
Tam Şarj	4.20V	4.20V	4.20V (veya üstü)	3.65V	4.20V	2,85V
Özgül Enerji	150-200Wh/kg	100-150Wh/kg	150-220Wh/kg	90-120Wh/kg	200-260Wh/kg	70-80Wh/kg
Şarj Oranı	0,7-1C (3 saat)	0,7-1C (3 saat)	0,7-1C (3 saat)	1C (3h)	1C	1C (5C maks)
Deşarj Oranı	1C (1 saat)	1C, 10C	1-2C	1C	1C	10C
Döngü Ömrü (İdeal)	500-1000	300-700	1000-2000	1000-2000	500	3.000-7.000
Uygulamalar	Cep Telefonları, Tabletler, Dizüstü Bilgisayarlar, Kameralar	Elektrikli Aletler, Tıbbi Cihazlar, Güç Aktarma Organları	E-Bisikletler, Tıbbi Cihazlar, Elektrikli Araçlar	Elektrikli Araçlar	Tıbbi, Endüstriyel, Elektrikli Araç (Tesla)	UPS, Elektrikli Araçlar, Güneş Sokak Aydınlatması
Üstün ve Zayıf Yönleri	Yüksek Enerji, Sınırlı Güç, Pazar Payı Durağan.	Yüksek Güç, Daha Az Kapasite, Li-Kobalttan Daha Güvenli, Performansı Artırmak için Genellikle NMC ile Karıştırılır.	Yüksek Kapasite ve Yüksek Güç, Pazar Payı Artıyor.	Düz Deşarj Voltajı, Yüksek Güç, Düşük Kapasite, Çok Güvenli, Yüksek Kendi Kendine Deşarj.	Orta Güçte En Yüksek Kapasite, Li-Kobalt'a Benzer.	Uzun Ömür, Hızlı Şarj, Geniş Sıcaklık Aralığı, Güvenli, Düşük Kapasiteli, Pahalı.

Bir başka Lityum tabanlı pil olan Lityum İyon Polimer pil lityum pillerle neredeyse aynı özelliklere sahip olup lityum pillerle arasındaki tek fark elektrolit olarak polimer materyalinin kullanılmasıdır. Diğer elektrolitlere göre polimer elektrolit materyalin elektriksel iletkenliği daha yüksektir. Polimer kullanılması avantajı ise lityum polimer pillerinin daha hızlı ve farklı şekillerde üretilmelerine olanak sağlamaktadır (Muratoğlu & Akkaya, 2015; Yong vd., 2015). Li-ion bataryaya göre daha uzun ömürlü ve daha güvenlidir (Tredeau & Salameh, 2009) ancak aşırı yüklenme hali ve şarjı kritik seviyenin altına düştüğü durumlarda fonksiyonel açıdan daha kararsız yapıdadır (Can Güven & Gedik, 2019).

Lityum-iyon pillerin günlük yaşamımız üzerinde önemli bir etkisi vardır, ancak doğal sınırlamalar Li-ion kimyalarının taşınabilir elektronik cihazlar, elektrikli araçlar ve şebeke ölçeğinde enerji depolama için artan

talepleri karşılama zorlaştırmaktadır (Lin vd., 2017; Hirve & Vidyapeeth, 2018; Liu vd., 2019). Bununla birlikte, Lityum iyon piller şarj oranları, kullanım ömrü ve güvenilirlik gibi sorunlardan dolayı daha da geliştirilmesi gerekmektedir (Khaligh & Li, 2010; Tie & Tan, 2013; Sun vd., 2020). Li-ion piller tehlike olarak 3 kategoriye ayrılabilir. Bu tehlikeler elektriksel, kimyasal ve patlama veya yangın olarak karşımıza çıkmaktadır (Gerlitz vd., 2021). Bu tehlikelerden dolayı, Li-ion pillerin ötesindeki pil kimyaları için çalışmalar sürmekte olup, ticari uygulamalar için uygulanabilir hale getirilmesi gerekmektedir (Grey & Tarascon, 2016; Lin vd., 2017; Ding vd., 2019). Metalik Li kullanımını, özellikle Li-S ve Li-air sistemleri için en çok tercih edilen seçeneklerden biridir (Manthiram vd., 2017).

3.5. Lityum-Hava Piller (Li-Air)

Lityum-hava (Li_2O_2) pil, geliştirme aşamasında olan yeni bir teknolojidir (Stan vd., 2014). Lityum-hava pilleri, yüksek teorik özgül enerjilerine dayanarak, uzun menzilli elektrikli araçları daha ekonomik hale getirebilecek potansiyele sahip olup elektrik enerjisi depolama için son derece çekici bir teknolojidir (Christensen vd., 2011; Stan vd., 2014).

Havadan türetilen oksijeni kullanan Li-hava pili negatif bir lityum metal elektrottan oluşur (Stan vd., 2014; Aurbach vd., 2016). Lityumun doğrudan havadan oksijenle reaksiyona sokulmasıyla çok yüksek bir kapasite (1200 mAh g^{-1}) elde edilebilir (Li vd., 2016). Bu teknoloji (fossil yakıtların enerji yoğunluğuna yakın) bir değer olan 3.500 Wh kg^{-1} gibi yüksek bir teorik ağırlıksal enerji yoğunluğu sunmaktadır (Stan vd., 2014; Lu vd., 2016). Bu değer bugün piyasadaki çoğu aküden yaklaşık 10 kat daha fazladır (Larcher & Tarascon, 2015). Birçok faktör bilinmediği için pratik enerji depolama tahminleri belirsizdir (Lu vd., 2016). Ancak, olası yüksek enerji yoğunluğunun yanı sıra, devir sayısı, güvenlik ve çevrim ömrü gibi metal-hava sistemlerinde hala büyük zorluklar bulunmaktadır (Budde-Meiwes vd., 2013; Rahman vd., 2014; Aurbach vd., 2016).

Birçok yıldırıcı zorluklar nedeniyle potansiyelinin altında kalmıştır (Christensen vd., 2011). Bu zorlukların birkaçının üstesinden gelinmesi durumunda 1000 Wh kg^{-1} veya daha fazlasının elde edilmesi mümkün olabilecektir (Christensen vd., 2011; Aurbach vd., 2016). Bu özel enerji, pil ömrünün başında tek bir şarjla 380 milin üzerinde bir elektrikli sürüş menzili sağlayabilir, bu da benzinle çalışan bir aracın menziline yaklaşıyor. Ayrıca, bugünün sürüş aralığına ulaşan bir sistemin maliyeti, çok daha yüksek bir spesifik enerji piliyle önemli ölçüde azaltılabilir. Yeterli menzile sahip olması, araç maliyetinin azaltılması gibi koşulların oluşması halinde elektrikli araçlar istenen kitle pazarına ulaşabilir (Christensen vd., 2011).

3.6. Lityum-Kükürt Piller (Li-S)

Geliştirilmekte olan çeşitli pil teknolojileri arasında lityum tabanlı olan lityum-kükürt (Li-S) pili, katot malzemesi olarak sülfür kullanılan bir pildir (Muratoğlu & Akkaya, 2015). Yüksek enerji yoğunluğuna ve şarj verimine sahiptir. Ayrıca düşük hücre gerilimi ve ortalama çevrim ömrü vardır (Tredeau & Salameh, 2009; Tarascon, 2010; Pang vd., 2016). Maliyeti düşük olup geniş sıcaklıkta çalışma aralığı sunar (Kolosnitsyn & Karaseva, 2008).

Teorik olarak ağırlıksal enerji yoğunluğu 2654 Wh kg^{-1} olup (Deng vd., 2021; Kong vd., 2021) gerçekte ise $500-600 \text{ Wh kg}^{-1}$ ağırlıksal enerji yoğunluklarına ulaşılabilir (Omar vd., 2010; Kisacikoglu vd., 2012; Budde-Meiwes vd., 2013). Bu avantajları sayesinde elektrikli araçlar için umut verici bir teknoloji olarak kabul edilmektedir (Kromer & Heywood, 2007; Kolosnitsyn & Karaseva, 2008; Li vd., 2016; Deng vd., 2021). Ancak çevrim ömürleri, döngü sırasında kapasitede hızlı azalma (döngü başına %0,1-0,4), yüksek kendi kendine deşarj oranları (ayda %8-15) gibi sorunları mevcut olup (Deng vd., 2021) bu sorunlar aşılmadıkça, Li-S pilleri uzun menzilli elektrikli araçlar için kötü bir seçim gibi görünmektedir (Cano vd., 2018).

3.7. Çinko Hava (Zn-Air) Piller

Çinko hava pili gibi diğer pil türleri de gelecek vaat eden bir pildir. Bu pil lityum pilden daha yüksek ağırlıksal enerji yoğunluğuna sahiptir. Bununla birlikte, temel dezavantajı düşük özgül gücü, sınırlı çevrim ömrü ve hantal olmasıdır. (Tie & Tan, 2013). Li-air pillere göre daha düşük özgül enerjiye sahip olmalarına rağmen, daha gelişmiş teknoloji durumları ve pratik olarak daha yüksek ulaşılabilir enerji yoğunlukları nedeniyle

gelecekteki elektrikli araçlarda kullanılması daha olası görünmektedir (Larcher & Tarascon, 2015; Li & Lu, 2017). Şarj edilebilir Zn-air piller, Li-ion pillerin ortaya çıkmasından on yıllar önce taşıt elektrifikasyonu için umut verici bir aday olarak tanımlanmıştır (Blurton & Sammells, 1979; Merry, 1991; Cano vd., 2018).

Li-hava pillere benzer şekilde, zayıf özgül güçleri ve enerji verimlilikleri muhtemelen bu pillerin elektrikli araçlar için birincil enerji kaynağı olarak kullanılmasını engelleyecektir. Ancak, çift pil yapılandırmasında kullanıldığında ümit verici olabilirler. Uzun bir araç ömrü sağlamak için muhtemelen daha yüksek bir çevrim ömrüne ihtiyaç duysalar da düşük maliyetli bir elektrikli araç üretmek için yüksek güçlü karbon pillerle birleştirilebilirler. Alternatif olarak, uzun menzil sağlamak için öncelikle Li-ion pillerle çalışan bir elektrikli araçlar için menzil genişleticiler olarak uygulanabilirler. Sürücünün sadece uzun mesafeler kat etmesi gerektiğini varsayarsak bu durum kısa çevrim ömürlerini ve düşük verimliliklerini nispeten önemsiz hale getirir. Çift pil konseptleri maliyeti ve karmaşıklığı önemli ölçüde artırabilse de Zn-air pillerinin doğal güvenliği ayrıca çift pil konfigürasyonu için de uygundur, bunun nedeni araç içinde Ni-MH piller gibi yer kaplama ile ilgili daha az kısıtlama vardır. Elektrolit buharlaşmasına ek olarak havadaki karbon dioksitten hava elektrot gözeneklerindeki karbonat oluşumu, uzun ömürlü Zn-air aküleri için bir sorun oluşturmaktadır. Ancak menzil genişletici uygulamalar için bu sorun hava filtreleri ve hava menfezleri ile azaltılabilir (Cano vd., 2018).

Yukarda geçmişten günümüze kadar olan pil çeşitlerinin detaylı olarak anlatımından yola çıkarak bir tablolar olarak oluşturulmuştur. Tablo 2’de bataryaların nominal voltaj, ağırlıksal enerji yoğunluğu (özgül enerji), hacimsel enerji yoğunluğu, özgül güç, kullanım ömrü, aylık kendi kendine deşarj yüzdesi, bellek etkisi, çalışma sıcaklığı gibi parametreler belirtilmiş ve Tablo 3’te ise bu parametrelere bağlı olarak batarya türlerinin üstün ve zayıf olan yönleri belirlenmiştir.

Tablo 2. Pil Çeşitlerinin Parametreleri

Pil Türü	Nominal Gerilim (V)	Özgül Enerji (Wh kg ⁻¹)	Hacimsel Enerji Yoğunluğu (Wh L ⁻¹)	Özgül Güç (W kg ⁻¹)	Yaşam Döngüsü	Kendi Kendine Deşarj (aylık %)	Hafıza Etkisi	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Kurşun Asit (Pb-Asit)	2,0	35	100	180	1000	< 5	Hayır	-15 ila +50
Nikel-Kadmium (Ni-Cd)	1,2	50-80	300	200	2000	10	Evet	-20 ila +50
Nikel Metal Hidrit (Ni-MH)	1,2	70-95	180-220	200-300	< 3000	20	Seyrek	-20 ila +60
ZEBRA	2,6	90-120	160	155	> 1200	< 5	Hayır	+245 ila +350
Lityum-İyon (Li-İyon)	3,6	118-250	200-400	200-430	2000	< 5	Hayır	-20 ila +60
Lityum-Demir Fosfat (LiFePO ₄) (LFP)	3,2	90-140	220	2000-4500	> 3000	< 5	Hayır	-20 ila +70
Lityum-Kobalt-Oksit (LiCoO ₂) (LCO)	3,6	150-200	-	-	500-1000	-	-	-25 ila +55
Lityum-Manganez-Oksit (LiMn ₂ O ₄) (LMO)	3,7	100-150	-	-	300-700	-	-	0 ila +50
Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum (NCA)	3,6	200-260	-	-	500	-	-	-
Lityum-Nikel-Manganez-Kobalt (NMC)	3,6	150-220	370	2300	1000-2000	-	-	-
Lityum-Titanat-Oksit (LTO)	2,4	50-80	90	4000	3000-7000	-	-	-
Çinko-Hava (Zn-Air)	1,65	460	1400	80-140	200	< 5	Hayır	-10 ila +55
Lityum-Kükürt (Li-S)	2,5	350-650	350	-	300	8-15	Hayır	-60 ila +60
Lityum-Hava (Li-Air)	2,9	1300-2000	1520-2000	70-100	100	< 5	-	-10 ila +70

Tablo 3. Pil Çeşitlerinin Karşılaştırılması

Pil Türü	Üstün Yönleri	Zayıf Yönleri
Kurşun Asit (Pb-Asit)	-Düşük fiyat -Yüksek özgül güç	-Düşük özgül enerji -Kısa yaşam ömrü -Yüksek bakım maliyeti
Nikel-Kadmium (Ni-Cd)	-Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu	-Geri dönüşüm maliyeti yüksek -Pahalı kadmium -Kadmiumun zehirli madde olması -Çevreye zararlı -Hafıza etkisi
Nikel Metal Hidrit (Ni-MH)	-Yüksek enerji yoğunluğu -Güvenli -Uzun yaşam ömrü	-Yüksek fiyat -Kendi kendine deşarj yüksek -Hafıza etkisi
ZEBRA	-Yüksek sıcaklık aralığında çalışma -Yüksek özgül enerji	-Düşük özgül güç
Lityum-İyon (Li-İyon)	-Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu -Yüksek özgül enerji ve özgül güç -Yüksek nominal voltaj	-Kullanım ömrü az -Güvenilirlik -Yüksek maliyet
Lityum-Demir Fosfat (LiFePO ₄) (LFP)	-Yüksek çevrim ömrü -Yüksek özgül güç -Düşük maliyet -Uzun ömürlü	-Düşük özgül enerji
Lityum-Kobalt-Oksit (LiCoO ₂) (LCO)	-Yüksek özgül enerji -Yüksek nominal voltaj	-Düşük güvenlik -Yüksek maliyet -Düşük yaşam ömrü
Lityum-Manganez-Oksit (LiMn ₂ O ₄) (LMO)	-Yüksek nominal voltaj -Maliyet düşük	-Düşük çevrim ömrü
Lityum-Nikel-Kobalt-Alüminyum (NCA)	-Yüksek özgül enerji -Yüksek özgül güç	-Düşük çevrim ömrü -Düşük güvenlik -Yüksek maliyet
Lityum-Nikel-Manganez-Kobalt (NMC)	-Yüksek özgül enerji -Yüksek özgül güç Yüksek verimlilik	-Düşük kararlılık
Lityum-Titanat-Oksit (LTO)	-Yüksek özgül güç -Yüksek çevrim ömrü -Yüksek güvenlik	-Düşük özgül enerji -Düşük hacimsel enerji yoğunluğu -Yüksek maliyet
Çinko-Hava (Zn-Air)	-Yüksek özgül enerji -Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu	-Düşük nominal voltaj -Düşük çevrim ömrü
Lityum-Kükürt (Li-S)	-Yüksek özgül enerji -Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu -Geniş sıcaklık aralığında çalışma	-Düşük nominal voltaj -Yüksek kendi kendine deşarj oranı
Lityum-Hava (Li-Air)	-Yüksek teorik özgül enerji	-Düşük çevrim ömrü -Düşük güvenlik

4. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN PİLLER

Geçmişten günümüze kadar piyasada bulunan hibrid ve tam elektrikli araçların kullanmış olduğu piller ve kapasiteleri Tablo 4'te verilmiştir (Iclodean vd., 2017; Ding vd., 2019; Sanguesa vd., 2021).

Tablo 2'ye göre nikel tabanlı piller ve kurşun asit pilleri Peugeot 106-(1995), General Motors EV1-(1996-1999), Toyota Prius-(2000)-Hibrit gibi 90'lı yılların sonunda üretilmiş olan araçlarda kullanımı mevcut olup bu pillerin son yıllarda kullanımı mevcut değildir.

Nissan Leaf, BMW i3, Mitsubishi İ-MİEV tam elektrikli araçlar ve Chevy Volt hibrit aracı prizmatik bir hücrede paketlenmiş, NMC ile lityum-manganez (LMO) karışımı pili kullanır. Tesla S, 18650 hücrelerinde hücre başına 248 Wh/kg gibi etkileyici bir özgül enerji sağlayan NCA pili kullanmaktadır. Tesla 3 modeli ise NCA pile silisyum ve kobalt karışımı bir pil kullanmaya başlamıştır.

VW E-golf (2015), Chevy Bolt (2016-Hibrit), Renault Zoe (2017) araçlarında ise NMC pillerin kullanıldığı görülmektedir. BYD E6 (2010) elektrikli aracı ise LFP pilini kullanmaktadır.

Tablo 2'deki bilgiler değerlendirildiğinde hibrit ve tam elektrikli araçlarda özellikle son yıllarda ağırlıklı olarak lityum tabanlı pillerin kullanıldığı görülmektedir.

Tablo 4. Elektrikli Araçların Kullandığı Pil Türleri

Model-Yıl	Pil	Kapasite (kWh)
Peugeot 106 - (1995)	Ni-Cd	-
General Motors EV1 - (1996-1999)	Versiyon 1 - lead acid Versiyon 2 - Ni-MH	18.7 kWh 26.4 kWh
Toyota Prius - (2000) Hibrit	Ni-MH	-
Mitsubishi İMİEV - (2008)	NMC-LMO/C	16 kWh
BYD E6 (2010)	LFP	61 kWh
Toyota Prius - (2011) Hibrit	Li-ion	4.4 kWh
Chevy Volt - (2011) Hibrit	LMO/NMC	16 kWh,
Chevrolet Spark (2012)	LFP/C	21 kWh
Tesla S - (2012)	18650 NCA	70 kWh - 90 kWh
Honda Fit EV - (2013)	NMC/LTO	20 kWh
Smart Fortwo - (2013)	18650 Li-ion-NMC/C	16.5 kWh
VW Egolf - (2015)	NMC/C	24 kWh
Nissan Leaf - (2015)	(LMO)	30 kWh
Chevy Bolt - (2016) Hibrit	NMC/C	60 kWh
Renault Zoe (2017)	NMC/C	41 kWh
Tesla 3 - (2018)	NCA/Si-C	75 kWh
BMW i3 - (2019)	LMO/NMC	42 kWh

5. SONUÇLAR

Bu makalede geçmişten günümüze kadar olan elektrikli araçlarda kullanılan ve hala araştırma aşamasında olan pil kimyaları üzerine detaylı bir çalışma yapılmıştır. Elektrikli cihazlarda ve elektrikli araçlarda kullanılan pil türleri tek tek açıklanmış üstün ve zayıf olan yönleri belirlenmiştir.

Tam elektrikli araçların performansı ve rekabet gücü, mevcut pil sistemlerinin güç, verimlilik ve pil maliyetleri açısından yakından bağlantılıdır. Enerji depolama cihazı geliştirmede, enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu açısından iyi bir umut vaat eden bazı ilerlemeler vardır, ancak hiçbiri hızlı şarj / deşarj (yüksek güç yoğunluğu), büyük depolama kapasitesi (yüksek enerji yoğunluğu), düşük maliyet ve uzun ömür gibi parametrelerin istenen kombinasyonuna sahip değildir. Bu parametrelerin hepsini sağlayan bir pil sistemi tam olarak geliştirilememiştir.

Tablo 3'te pillerin üstün ve zayıf olan yönleri, Tablo 4'te ise elektrikli araçlarda en yaygın kullanılan piller değerlendirildiğinde elektrikli araçlar için en uygun ve uygun olmayan pil türleri açıklanmıştır.

Kurşun asit piller 1900 yıllarda araç endüstrisinde denemeleri yapılan ilk akü teknolojisi olup General motors EV 1 elektrikli aracında kullanılmıştır. Aslında enerji depolamada iyi bir pil olmasına rağmen düşük enerji yoğunluğu ve ağırlığının fazla olması nedeniyle günümüzde fazla güç gerektiren araçlarda kullanılmamaktadır.

Nikel-kadmiyum (Ni-Cd) piller kurşun asitli pile kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Peugeot 206 aracında kullanılmıştır. Ancak kadmiyumun zehirli bir madde olması, yüksek maliyet, pilin kullanılmadığı zamanlarda kendi kendini boşaltması, boşaldıktan sonra şarj işleminde daha az şarj tutması gibi zayıf yönlerinin fazla olması elektrikli araçlarda kullanımını sınırlamıştır.

Ni-MH piller ise kurşun asit ve ni-cd pillere kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Taşınabilir aletler ve UPS ve Telekom gibi sabit uygulamalar için uzun bir süre kullanılmıştır. 2000 yılların başında hibrit araçlarda kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde Toyota Prius ve Honda Insight, Honda Civic, Honda Accord ve Ford Escape dahil olmak üzere birçok hibrid modellerinde kullanımı mevcuttur. Ancak tam elektrikli araçlarda büyük ölçekli uygulamalar için ciddi bir aday olarak görülmemektedir.

ZEBRA pil, elektrikli araç uygulaması için uygun olan yüksek enerji yoğunluğuna ve güç yoğunluğuna sahiptir. Bununla birlikte, yüksek çalışma sıcaklığı, termal yönetimi ve güvenlik endişelerinden dolayı günümüzde elektrikli araçlarda kullanımı yoktur.

Li-ion piller şarj oranları, kullanım ömrü ve güvenilirlik gibi sorunları olmasına rağmen Pb-asit ve Ni-MH gibi diğer pil teknolojileriyle kıyaslandığında yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun raf ömrü gibi özellikleri ile enerji depolama alanında, taşınabilir cihazlarda ve elektrikli araçlarda en çok kullanılan pildir.

Çeşitli anot ve katot malzemeleri kombinasyonlarını kullanan LCO, LMO, LTO, NCA, NMC ve LPF gibi lityum tabanlı piller ise LCO pil dışında şu an için elektrikli araçlarda en yaygın kullanılan pillerdir.

Özellikle NCA ve NMC piller elektrikli araçlarda pazar payları çok yüksektir. NCA ve NMC pillerin güç yoğunluğu, enerji yoğunluğu fazla olup ve kullanım ömrü açısından iyi performans gösterir. Maliyeti yüksek olmasına rağmen NCA piller Tesla araçlarda kullanılmaktadır. NMC piller ise Tablo 2’de yer alan elektrikli araçlarda diğer lityum tabanlı pillerin karışımları ile kullanımını oldukça fazladır.

Gelecek için umut vaat eden pillerden olan li-s, li-air, Zn-air pilleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Bu pilleri şu an için elektrikli araçlarda ticari bir kullanımı mevcut değildir. Bu pillerin gelecek vaat eden üstün yönlerini ve elektrikli araçlarda kullanımı için uygun olmayan zayıf yönlerini sıralayacak olursak:

Lityum-hava pilleri, yüksek teorik özgül enerjilerine dayanarak, uzun menzilli elektrikli araçları daha ekonomik hale getirebilecek potansiyele sahip olup elektrik enerjisi depolama için son derece çekici bir teknolojidir. Elektrik motorları yüksek verimlilik sağlar (içten yanmalı bir motor için %35’e kıyasla %95). Li-hava hücreleri, bataryayı korumak için gerekli tesis dengesinin ihmal edilebilir bir hacim veya kütleye sahip olduğu varsayılarak, standart yakıt tanklarının üçte biri boyutunda bir batarya paketi ile bugünün araçlarına eşdeğer bir menzil sunabilir. Ancak devir sayısı, güvenlik ve çevrim ömrü gibi zayıf yönlerinin bulunmaktadır.

Li-s piller ise yüksek enerji yoğunluğu, yüksek şarj verimi, düşük hücre gerilimi, düşük maliyet, geniş sıcaklıkta çalışma aralığı ve ortalama çevrim ömrü gibi birçok üstün yönle sahip olması elektrikli araçlar için umut verici bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Ancak çevrim ömürleri, döngü sırasında kapasitede hızlı azalma, yüksek kendi kendine deşarj oranları gibi sorunları mevcut olup bu sorunlar aşılmadıkça, Li-S pilleri uzun menzilli elektrikli araçlar için kötü bir seçim gibi görünmektedir.

Zn-air piller ise Zayıf özgül güçleri ve enerji verimlilikleri muhtemelen bu pillerin elektrikli araçlar için birincil enerji kaynağı olarak kullanılmasını engelleyecektir. Li-air pillere göre daha düşük özgül enerjiye sahip olmalarına rağmen, daha gelişmiş teknoloji durumları ve pratik olarak daha yüksek ulaşılabilir enerji yoğunlukları nedeniyle gelecekteki elektrikli araçlarda kullanılması daha olası görünmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemektedir.

KAYNAKLAR

- Armand, M., & Tarascon, J. M. (2008). Building better batteries. *Nature*, 451(7179), 652-657. doi:[10.1038/451652a](https://doi.org/10.1038/451652a)
- Asghar, R., Rehman, F., Ullah, Z., Qamar, A., Ullah, K., Iqbal, K., Aman, A., & Nawaz, A. A. (2021). Electric vehicles and key adaptation challenges and prospects in Pakistan: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 278. doi:[10.1016/j.jclepro.2020.123375](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123375)
- Aurbach, D., McCloskey, B. D., Nazar, L. F., & Bruce, P. G. (2016). Advances in understanding mechanisms underpinning lithium-air batteries. *Nature Energy*, 1(9), 1-11. doi:[10.1038/nenergy.2016.128](https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.128)
- Bai, Y. -s., & Zhang, C. -n. (2014). Experiments study on fast charge technology for Lithium-ion electric vehicle batteries. In: Proceedings of the IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 1-6. doi:[10.1109/ITEC-AP.2014.6940761](https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6940761)
- Bentley, W. F., & Heacock, D. K. (1996). Battery management considerations for multichemistry systems. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 11(5), 23-26. doi:[10.1109/62.494184](https://doi.org/10.1109/62.494184)
- Blurton, K. F., & Sammells, A. F. (1979). Metal/air batteries: Their status and potential - a review. *Journal of Power Sources*, 4(4), 263-279. doi:[10.1016/0378-7753\(79\)80001-4](https://doi.org/10.1016/0378-7753(79)80001-4)
- Bruce, P., Scrosati, B., & Tarascon, J. (2008). Nanomaterials for rechargeable lithium batteries. *Angewandte Chemie - International Edition*, 47(16), 2930-2946. doi:[10.1002/anie.200702505](https://doi.org/10.1002/anie.200702505)
- Bruce, P., Freunberger, S., Hardwick, L., & Tarascon, J. (2012). Li-O₂ and Li-S batteries with high energy storage. *Nature Materials*, 11(1), 19-29. doi:[10.1038/nmat3191](https://doi.org/10.1038/nmat3191)
- Budde-Meiwes, H., Drillkens, J., Lunz, B., Muennix, J., Rothgang, S., Kowal, J., & Sauer, D. U. (2013). A review of current automotive battery technology and future prospects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 227(5), 761-776. doi:[10.1177/0954407013485567](https://doi.org/10.1177/0954407013485567)
- Burd, J., Moore, E. A., Ezzat, H., Kirchain, R., & Roth, R. (2021). Improvements in electric vehicle battery technology influence vehicle lightweighting and material substitution decisions. *Applied Energy*, 283. doi:[10.1016/j.apenergy.2020.116269](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116269)
- Burke, A., & Miller, M. (2009). Performance characteristics of lithium-ion batteries of various chemistries for plug-in hybrid vehicles. In: Proceedings of the 24th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 816-828.
- Can Güven, E., & Gedik, K. (2019). Ömrünü Tamamlamış Elektrikli Araç Bataryalarının Çevresel Yönetimi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(2), 726-737. doi:[10.21597/jist.446170](https://doi.org/10.21597/jist.446170)
- Canis, B. (2013). Battery manufacturing for hybrid and electric vehicles: Policy Issues. Congressional Research Service Report for Congress: R41709.
- Cano, Z. P., Banham, D., Ye, S., Hintennach, A., Lu, J., Fowler, M., & Chen, Z. (2018). Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nature Energy*, 3(4), 279-289. doi:[10.1038/s41560-018-0108-1](https://doi.org/10.1038/s41560-018-0108-1)
- Catenacci, M., Verdolini, E., Bosetti, V., & Fiorese, G. (2013). Going electric: Expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles. *Energy Policy*, 61, 403-413. doi:[10.1016/j.enpol.2013.06.078](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.078)
- Chan, C. C. (1993). An overview of electric vehicle technology. *Proceedings of the IEEE*, 81(9), 1202-1213. doi:[10.1109/5.237530](https://doi.org/10.1109/5.237530)
- Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles with their superior fuel economy and performance, hybrid vehicles will likely increase in popularity in coming years; further development of control theory for hybrids is essential for their progress. *Fellow IEEE*, 95(4), 704-718. doi:[10.1109/JPROC.2007.892489](https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.892489)
- Chan, C. C. (2013). The rise & fall of electric vehicles in 1828-1930: Lessons learned. *Proceedings of the IEEE*, 101(1), 206-212. doi:[10.1109/JPROC.2012.2228370](https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2228370)

- Chang, W. Y. (2013). The state of charge estimating methods for battery: a review. *ISRN Applied Mathematics*, 2013(1), 1-7. doi:[10.1155/2013/953792](https://doi.org/10.1155/2013/953792)
- Cheng, H., Shapter, J. G., Li, Y., & Gao, G. (2021). Recent progress of advanced anode materials of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Chemistry*, 57, 451-468. doi:[10.1016/j.jechem.2020.08.056](https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.08.056)
- Choi, J. W., & Aurbach, D. (2016). Promise and reality of post-lithium-ion batteries with high energy densities. *Nature Reviews Materials*, 1. doi:[10.1038/natrevmats.2016.13](https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.13)
- Christensen, J., Albertus, P., Sanchez-Carrera, R., Lohmann, T., Kozinsky, B., Liedtke, R., Ahmed, J., & Kojic, A. (2011). A critical review of li/air batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 159(2), R1-R30. doi:[10.1149/2.086202jes](https://doi.org/10.1149/2.086202jes)
- Chu, S. & Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 488(7411), 294-303. doi:[10.1038/nature11475](https://doi.org/10.1038/nature11475)
- Cluzel, C., & Douglas, C. (2012). Cost and performance of EV batteries. Final Report for The Committee on Climate Change. www.element-energy.co.uk/wordpress/wp-content/uploads/2012/06/CCC-battery-cost_-Element-Energy-report_March2012_Finalbis.pdf
- Das, H. S., Tan, C. W., & Yatim, A. H. M. (2017). Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 268-291. doi:[10.1016/j.rser.2017.03.056](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.056)
- Deng, W., Phung, J., Li, G., & Wang, X. (2021). Realizing high-performance lithium-sulfur batteries via rational design and engineering strategies. *Nano Energy*, 82. doi:[10.1016/j.nanoen.2021.105761](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105761)
- Dikmen, İ. C., Kartaca, K., Karadağ, T., & Abbasov, T. (2018). Batarya teknolojilerine genel bir bakış. In: A. Atmaca (Eds.), *3rd International Energy & Engineering Congress Proceeding Book*, (pp. 974-987).
- Ding, Y., Cano, Z. P., Yu, A., Lu, J., & Chen, Z. (2019). Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. *Electrochemical Energy Reviews*, 2(1), 1-28. doi:[10.1007/s41918-018-0022-z](https://doi.org/10.1007/s41918-018-0022-z)
- Dinger, A., Martin, R., Mosquet, X., Rabl, M., Rizoulis, D., Russo, M., & Sticher, G. (2010). Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020. The Boston Consulting Group.
- Duffner, F., Mauler, L., Wentker, M., Leker, J., & Winter, M. (2021). Large-scale automotive battery cell manufacturing: Analyzing strategic and operational effects on manufacturing costs. *International Journal of Production Economics*, 232. doi:[10.1016/j.ijpe.2020.107982](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107982)
- Enache, B., Lefter, E., & Cepisca, C. (2014). Batteries for Electrical Vehicles: A Review. In: N. Bizon, L. Dascalescu, & N. M. Tabatabaei (Eds.), *Autonomous Vehicles* (pp. 409-429). Intelligent Transport Systems and Smart Technologies, Nova Science Publishers, New York.
- Fergus, J. W. (2010). Recent developments in cathode materials for lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, 195(4), 939-954. doi:[10.1016/j.jpowsour.2009.08.089](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.08.089)
- Frieske, B., Kloetzke, M., & Mauser, F. (2014). Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles. In: Proceedings of the World Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 1-12. doi:[10.1109/EVS.2013.6914783](https://doi.org/10.1109/EVS.2013.6914783)
- Gerlitz, E., Greifenstein, M., Hofmann, J., & Fleischer, J. (2021). Analysis of the Variety of Lithium-Ion Battery Modules and the Challenges for an Agile Automated Disassembly System. Proceedings of the 8th CIRP Global Web Conference, *Procedia CIRP*, 96, 175-180. doi:[10.1016/j.procir.2021.01.071](https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.071)
- Gerssen-Gondelach, S. J., & Faaij, A. P. C. (2012). Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term. *Journal of Power Sources*, 212, 111-129. doi:[10.1016/j.jpowsour.2012.03.085](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.03.085)
- Goutam, S., Timmermans, J. M., Omar, N., Van den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2015). Comparative study of surface temperature behavior of commercial li-ion pouch cells of different chemistries and capacities by infrared thermography. *Energies*, 8(8), 1-18. doi:[10.3390/en8088175](https://doi.org/10.3390/en8088175)
- Grey, C. P., & Tarascon, J. M. (2016). Sustainability and in situ monitoring in battery development. *Nature Materials*, 16(1), 45-56. doi:[10.1038/nmat4777](https://doi.org/10.1038/nmat4777)

- Guarnieri, M. (2011). When cars went electric, Part 1. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 5(1), 61-62. doi:[10.1109/mie.2011.940248](https://doi.org/10.1109/mie.2011.940248)
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., & Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1513-1522. doi:[10.1016/j.rser.2008.09.028](https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.028)
- Halimah, P. N., Rahardian, S., & Budiman, B. A. (2019). Battery Cells for Electric Vehicles. *International Journal of Sustainable Transportation Technology*, 2(2), 54-57.
- Hannan, M. A., Hoque, M. M., Mohamed, A., & Ayob, A. (2018). Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 771-789. doi:[10.1016/j.rser.2016.11.171](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.171)
- Hirve, S. S., & Vidyapeeth, B. (2018). A Study of Different Energy Storage Devices Used in Electric Vehicles. *International Journal of Research and Analytical Reviews*, 5(3), 582-595.
- Hu, H-Y., Xie, N., Wang, C., Wu, F., Pan, M., Li, H-F., Wu, P., Wang, X-D, Zeng, Z., Deng, S., Wu, M. H., Vinodgopal, K., & Dai, G-P. (2019). Enhancing the performance of motive power lead-acid batteries by high surface area carbon black additives. *Applied Sciences*, 9(1). doi:[10.3390/app9010186](https://doi.org/10.3390/app9010186)
- Iclodean, C., Varga, B., Burnete, N., Cimerdean, D., & Jurchiș, B. (2017). Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles. In: Proceedings of the International Congress of Automotive and Transport Engineering - Mobility Engineering and Environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 252, 012058. doi:[10.1088/1757-899X/252/1/012058](https://doi.org/10.1088/1757-899X/252/1/012058)
- Jaiswal, A., & Chalasani, S. C. (2015). The role of carbon in the negative plate of the lead-acid battery. *Journal of Energy Storage*, 1(1), 15-21. doi:[10.1016/j.est.2015.05.002](https://doi.org/10.1016/j.est.2015.05.002)
- Khaligh, A., & Li, Z. (2010). Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(6), 2806-2814. doi:[10.1109/TVT.2010.2047877](https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2047877)
- Kisacikoglu, M. C., Bedir, A., Ozpineci, B., & Tolbert, L. M. (2012). PHEV-EV charger technology assessment with an emphasis on V2G operation. (Technical Report: ORNL/TM-2010/221) Oak Ridge National Laboratory. doi:[10.2172/1050257](https://doi.org/10.2172/1050257)
- Kolosnitsyn, V. S., & Karaseva, E. V. (2008). Lithium-sulfur batteries: Problems and solutions. *Russian Journal of Electrochemistry*, 44(5), 506-509. doi:[10.1134/S1023193508050029](https://doi.org/10.1134/S1023193508050029)
- Kong, L., Yin, L., Xu, F., Bian, J., Yuan, H., Lu, Z., & Zhao, Y. (2021). Electrolyte solvation chemistry for lithium-sulfur batteries with electrolyte-lean conditions. *Journal of Energy Chemistry*, 55, 80-91. doi:[10.1016/j.jechem.2020.06.054](https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.06.054)
- Kromer, M. A., & Heywood, J. B. (2007). Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet. web.mit.edu/sloan-auto-lab/research/beforeh2/files/kromer_electric_powertrains.pdf
- Kwade, A., Haselrieder, W., Leithoff, R., Modlinger, A., Dietrich, F., & Droeder, K. (2018). Current status and challenges for automotive battery production technologies. *Nature Energy*, 3(4), 290-300. doi:[10.1038/s41560-018-0130-3](https://doi.org/10.1038/s41560-018-0130-3)
- Larcher, D., & Tarascon, J. M. (2015). Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nature Chemistry*, 7(1), 19-29. doi:[10.1038/nchem.2085](https://doi.org/10.1038/nchem.2085)
- Leitman, S., & Brant, B. (2009). *Build Your Own Electric Vehicle* (2nd ed.). The McGraw-Hill Companies.
- Li, C., Negnevitsky, M., Wang, X., Yue, W. L., & Zou, X. (2019). Multi-criteria analysis of policies for implementing clean energy vehicles in China. *Energy Policy*, 129, 826-840. doi:[10.1016/j.enpol.2019.03.002](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.002)
- Li, W., Liu, J., & Zhao, D. (2016). Mesoporous materials for energy conversion and storage devices. *Nature Reviews Materials*, 1(6). doi:[10.1038/natrevmats.2016.23](https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.23)
- Li, Y., & Lu, J. (2017). Metal-Air Batteries: Will They Be the Future Electrochemical Energy Storage Device of Choice?. *ACS Energy Letters*, 2(6), 1370-1377. doi:[10.1021/acseenergylett.7b00119](https://doi.org/10.1021/acseenergylett.7b00119)

- Lin, D., Liu, Y., & Cui, Y. (2017). Reviving the lithium metal anode for high-energy batteries. *Nature Nanotechnology*, 12(3), 194-206. doi:[10.1038/nnano.2017.16](https://doi.org/10.1038/nnano.2017.16)
- Liang, Y., Zhao, C-Z., Yuan, H., Chen, Y., Zhang, W., Huang, J-Q., Yu, D., Liu, Y., Titirici, M-M., Chueh, Y-L., Yu, H. & Zhang, Q. (2019). A review of rechargeable batteries for portable electronic devices. *InfoMat*, 1(1), 6-32. [10.1002/inf2.12000](https://doi.org/10.1002/inf2.12000)
- Liu, J., Bao, Z., Cui, Y., Dufek, E. J., Goodenough, J. B., Khalifah, P., Li, Q., Liaw, B. Y., Liu, P., Manthiram, A., Meng, Y. S., Subramanian, V. R., Toney, M. F., Viswanathan, V. V., Whittingham, M. S., Xiao, J., Xu, W., Yang, J., Yang, X. Q., & Zhang, J. G. (2019). Pathways for practical high-energy long-cycling lithium metal batteries. *Nature Energy*, 4(3), 180-186. doi:[10.1038/s41560-019-0338-x](https://doi.org/10.1038/s41560-019-0338-x)
- Lu, J., Chen, Z., Ma, Z., Pan, F., Curtiss, L. A., & Amine, K. (2016). The role of nanotechnology in the development of battery materials for electric vehicles. *Nature Nanotechnology*, 11(12), 1031-1038. doi:[10.1038/nnano.2016.207](https://doi.org/10.1038/nnano.2016.207)
- Lu, J., Wu, T., & Amine, K. (2017). State-of-the-art characterization techniques for advanced lithium-ion batteries. *Nature Energy*, 2(3). doi:[10.1038/nenergy.2017.11](https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.11)
- Lukic, S. M., Cao, J., Bansal, R. C., Rodriguez, F., & Emadi, A. (2008). Energy storage systems for automotive applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2258-2267. doi:[10.1109/TIE.2008.918390](https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918390)
- Lynch, W. A., & Salameh, Z. M. (1997). Realistic electric vehicle battery evaluation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 12(4), 407-412. doi:[10.1109/60.638961](https://doi.org/10.1109/60.638961)
- Manthiram, A., Yu, X., & Wang, S. (2017). Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes. *Nature Reviews Materials*, 2(4), 1-16. doi:[10.1038/natrevmats.2016.103](https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.103)
- Matthews, L., Lynes, J., Riemer, M., Del Matto, T., & Cloet, N. (2017). Do we have a car for you? Encouraging the uptake of electric vehicles at point of sale. *Energy Policy*, 100, 79-88. doi:[10.1016/j.enpol.2016.10.001](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.10.001)
- May, G. (2006). Battery options for hybrid electric vehicles. *IET Hybrid Vehicle Conference 2006 Publications*, 67-78. doi:[10.1049/cp:20060614](https://doi.org/10.1049/cp:20060614)
- Merry, G. W. (1991). Zinc-air batteries for electric vehicles. SAE Technical Papers. doi:[10.4271/911912](https://doi.org/10.4271/911912)
- Mersky, A. C., Sprei, F., Samaras, C., & Qian, Z. S. (2016). Effectiveness of incentives on electric vehicle adoption in Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, 56-68. doi:[10.1016/j.trd.2016.03.011](https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.011)
- Miao, Y., Hynan, P., Von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, 12(6), 1-20. doi:[10.3390/en12061074](https://doi.org/10.3390/en12061074)
- Miller, P. (2015). Automotive lithium-ion batteries. *Johnson Matthey Technology Review*, 59(1), 4-13. doi:[10.1595/205651315X685445](https://doi.org/10.1595/205651315X685445)
- Moralı, U., & Erol, S. (2020). 18650 lityum-iyon ve 6HR61 nikel-metal hidrit tekrar şarj edilebilir pillerinin elektrokimyasal empedans analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 297-309. doi:[10.17341/gazimmfd.463280](https://doi.org/10.17341/gazimmfd.463280)
- Muratoğlu, Y., & Akkaya, A. (2015). Elektrikli Araç Teknolojisi ve Pil Yönetim Sistemi-İnceleme. *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 458, 10-14.
- Nemry, F., Leduc, G., & Muñoz, A. (2009). Plug-in hybrid and battery-electric vehicles: state of the research and development and comparative analysis of energy and cost efficiency. Joint Research Centre (Technical Note: JRC 54699). <http://ipts.jrc.ec.europa.eu/publications/pub.cfm?id=2759>
- Nor, J. K. (1993). Art of charging electric vehicle batteries. *Proceedings of WESCON 1993*, 521-525. doi:[10.1109/WESCON.1993.488489](https://doi.org/10.1109/WESCON.1993.488489)
- 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](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803021-9.00004-5)

- Oman, H., & Gross, S. (1995). Electric-vehicle batteries. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 10(2), 29-35. doi:[10.1109/62.350734](https://doi.org/10.1109/62.350734)
- Omar, N., Verbrugge, B., Mulder, G., Van Den Bossche, P., Van Mierlo, J., Daowd, M., Dhaens, M., & Pauwels, S. (2010). Evaluation of performance characteristics of various lithium-ion batteries for use in BEV application. *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-6, 1-3 September, Lille, France. doi:[10.1109/VPPC.2010.5729083](https://doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729083)
- Omar, N., Van Den Bossche, P., Mulder, G., Daowd, M., Timmermans, J. M., Van Mierlo, J., & Pauwels, S. (2011). Assessment of performance of lithium iron phosphate oxide, nickel manganese cobalt oxide and nickel cobalt aluminum oxide based cells for using in plug-in battery electric vehicle applications. *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-7, 6-9 September, Chicago, IL, USA. doi:[10.1109/VPPC.2011.6043017](https://doi.org/10.1109/VPPC.2011.6043017)
- Palmer, K., Tate, J. E., Wadud, Z., & Nellthorp, J. (2018). Total cost of ownership and market share for hybrid and electric vehicles in the UK, US and Japan. *Applied Energy*, 209, 108-119. doi:[10.1016/j.apenergy.2017.10.089](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.089)
- Pang, Q., Liang, X., Kwok, C. Y., & Nazar, L. F. (2016). Advances in lithium-sulfur batteries based on multifunctional cathodes and electrolytes. *Nature Energy*, 1(9), 1-11. doi:[10.1038/nenergy.2016.132](https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.132)
- Park, M., Ryu, J., Wang, W., & Cho, J. (2016). Material design and engineering of next-generation flow-battery technologies. *Nature Reviews Materials*, 2(1), 1-18. doi:[10.1038/natrevmats.2016.80](https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.80)
- Parsons, M. B., & Mepsted, G. O. (2014). Development of off-road hybrid-electric powertrains and review of emerging battery chemistries. *5th IET Hybrid and Electric Vehicles Conference*, 1-7, 5-6 November, London. doi:[10.1049/cp.2014.0940](https://doi.org/10.1049/cp.2014.0940)
- Perujo, A., Grootveld, G. V., & Scholz, H. (2012). Present and future role of battery electrical vehicles in private and public urban transport. In: Z. Stević (Eds), *New Generation of Electric Vehicles* (pp. 3-25). Intech doi:[10.5772/54507](https://doi.org/10.5772/54507)
- Rahman, M. A., Wang, X., & Wen, C. (2014). A review of high energy density lithium-air battery technology. *Journal of Applied Electrochemistry*, 44(1), 5-22. doi:[10.1007/s10800-013-0620-8](https://doi.org/10.1007/s10800-013-0620-8)
- Ramoni, M. O., & Zhang, H. C. (2013). End-of-life (EOL) issues and options for electric vehicle batteries. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15(6), 881-891. doi:[10.1007/s10098-013-0588-4](https://doi.org/10.1007/s10098-013-0588-4)
- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372-404. doi:[10.3390/smartsities4010022](https://doi.org/10.3390/smartsities4010022)
- Scrosati, B., & Garche, J. (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2419-2430. doi:[10.1016/j.jpowsour.2009.11.048](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.048)
- Soloveichik, G. L. (2011). Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 2(1), 503-527. doi:[10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116](https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116)
- Stan, A. I., Swierczynski, M., Stroe, D. I., Teodorescu, R., & Andreasen, S. J. (2014). Lithium ion battery chemistries from renewable energy storage to automotive and back-up power applications - An overview. *2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2014*, 713-720, 22-24 May, Bran, Romania. doi:[10.1109/OPTIM.2014.6850936](https://doi.org/10.1109/OPTIM.2014.6850936)
- Sun, X., Li, Z., Wang, X., & Li, C. (2020). Technology development of electric vehicles: A review. *Energies*, 13(1), 1-29. doi:[10.3390/en13010090](https://doi.org/10.3390/en13010090)
- Sundaram, S. M., Kulkarni, M., & Diwakar, V. (2016). Management of large format liion batteries. *2015 IEEE International Transportation Electrification Conference*, 1-7, 27-29 August, Chennai, India. doi:[10.1109/ITEC-India.2015.7386883](https://doi.org/10.1109/ITEC-India.2015.7386883)
- Tarascon, J. M. (2010). Key challenges in future Li-battery research. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1923), 3227-3241. doi:[10.1098/rsta.2010.0112](https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0112)
- Tarascon, J. M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414(6861), 359-367. doi:[10.1038/35104644](https://doi.org/10.1038/35104644)

- Tie, S. F., & Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 82-102. doi:[10.1016/j.rser.2012.11.077](https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077)
- Tinğ, N. S., Aksoy, İ., & Şahin, Y. (2015). Elektrikli Araçların Batarya Şarjında Kullanılan Güç Faktörü Düzeltmeli Klasik Ve Interleaved Yükseltici Türü Dönüştürücülerin Karşılaştırılması. VI. Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi 2015, 1-6, 4-6 Haziran, Kocaeli, Türkiye.
- The Nobel Prize in Chemistry. (2019). <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/popular-information/>
- Tredeau, F. P., & Salameh, Z. M. (2009). Evaluation of lithium iron phosphate batteries for electric vehicles application. *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1266-1270, 7-10 September, Dearborn, MI, USA. doi:[10.1109/VPPC.2009.5289704](https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289704)
- Tubb, R. (1939). Battery-driven electric vehicles. *Proceedings of the Institution of Automobile Engineers*, 33(2), 582-603. doi:[10.1243%2FPIAE_PROC_1938_033_029_02](https://doi.org/10.1243%2FPIAE_PROC_1938_033_029_02)
- Van den Bossche, P., Vergels, F., Van Mierlo, J., Matheys, J., & Van Autenboer, W. (2006). SUBAT: An assessment of sustainable battery technology. *Journal of Power Sources*, 162(2), 913-919. doi:[10.1016/j.jpowsour.2005.07.039](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.07.039)
- Van Schalkwijk, W. A. (1993). Lithium rechargeable batteries. *Proceedings of WESCON 1993*, 291-296. doi:[10.1109/WESCON.1993.488450](https://doi.org/10.1109/WESCON.1993.488450)
- van Vliet, O. P. R., Kruithof, T., Turkenburg, W. C., & Faaij, A. P. C. (2010). Techno-economic comparison of series hybrid, plug-in hybrid, fuel cell and regular cars. *Journal of Power Sources*, 195(19), 6570-6585. doi:[10.1016/j.jpowsour.2010.04.077](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.04.077)
- Vidyanandan, K. V. (2019). Batteries for Electric Vehicles. IEEE.
- Wang, Y., & Huang, H. Y. S. (2011). Comparison of lithium-ion battery cathode materials and the internal stress development. In: Conference Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition - Volume 4 (Parts A and B), 1685-1694, 11-17 November, Denver, Colorado, USA. doi:[10.1115/imece2011-65663](https://doi.org/10.1115/imece2011-65663)
- Wen, J., Zhao, D., & Zhang, C. (2020). An overview of electricity powered vehicles: Lithium-ion battery energy storage density and energy conversion efficiency. *Renewable Energy*, 162, 1629-1648. doi:[10.1016/j.renene.2020.09.055](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.055)
- Winter, M., & Brodd, R. J. (2004). What are batteries, fuel cells, and supercapacitors?. *Chemical Reviews*, 104(10), 4245-4270. doi:[10.1021/cr020730k](https://doi.org/10.1021/cr020730k)
- Xiao, Q., Li, B., Dai, F., Yang, L., & Cai, M. (2015). Application of lithium-ion batteries in vehicle electrification. In: P. K. Shen, C-Y. Wang, S. P. Jiang, X. Sun, & J. Zhang (Eds.), *Electrochemical Energy: Advanced Materials and Technologies* (pp. 159-168). CRC Press.
- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385. doi:[10.1016/j.rser.2015.04.130](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.130)
- 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](https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039071)
- Young, K., Wang, C., Wang, L. Y., & Strunz, K. (2013). Electric Vehicle Battery Technologies. In: R. Garcia-Valle, J. A. P. Lopes (Eds.), *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks* (pp. 15-56). doi:[10.1007/978-1-4614-0134-6](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0134-6)
- Yoshino, A. (2012). The Birth of the Lithium-Ion Battery. *Angewandte Chemie International Edition*, 51(24), 5798-5800. doi:[10.1002/anie.201105006](https://doi.org/10.1002/anie.201105006)