



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SÜRDÜRÜLEBİLİR PİL TEKNOLOJİLERİ VE ÇEVRESEL
İNOVASYON**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eda KILIÇ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Melayib BİLGİN

AKSARAY, 2024

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 212301420 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Eda KILIÇ tarafından hazırlanan SÜRDÜRÜLEBİLİR PİL TEKNOLOJİLERİ VE ÇEVRESEL İNOVASYON” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr Melayib BİLGİN

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Doç. Dr. Hakan Çelebi

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Doç. Dr. Fatma KUNT

Necmettin Erbakan Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 28/06/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Eda KILIÇ

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sürecinde desteklerini esirgemeyen değerli insanlara teşekkür etmek istiyorum.

Öncelikle, başarılı bir çalışma için gerekli olan cesaret ve inancı bana aşılayan aileme ve dostlarıma teşekkür ederim. Onların samimi destekleri, bu yolculuğun en büyük motivasyon kaynağı oldu. Ayrıca, yanı başımdan ayrılmayan ve her zaman neşe kaynağı olan kedim Garfield'a da özel bir teşekkür borçluyum.

Pomega Enerji'nin değerli Kıdemli Planlama ve Tedarik Zinciri Mühendisi Sertaç Yaşar'a da teşekkürlerimi sunarım. Verdiği değerli bilgiler, bu tezin başarılı bir şekilde tamamlanmasına katkı sağladı.

Exitcom'un Genel Müdürü Murat Ilgar'a ise özel bir teşekkür borçluyum. Yaratıcı fikirleri ve sağladığı destek, bu çalışmanın ilerlemesinde büyük rol oynadı.

Bu süreçte gerekli esneklikleri sağlayan değerli müdürüm Sayın Ali Pervaz'a da teşekkürlerimi iletmek isterim. Onun anlayışı ve desteği bu çalışmanın tamamlanmasını kolaylaştırdı.

Tez danışmanım Prof. Dr. Melayib Bilgin'e sonsuz minnettarlığımı ifade etmek isterim. Bilgeligi ve yönlendirmeleri, bu çalışmanın şekillenmesinde kritik bir rol oynadı.

Herkese sonsuz teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım.

Eda KILIÇ
AKSARAY, 2024

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	9
1.1 Problem Durumu	11
1.2 Problem Cümlesi	11
1.3 Alt Problemler	11
1.4 Araştırmanın Amacı	12
1.5 Araştırmanın Önemi	12
1.6 Enerji Depolama Teknolojilerinde İlerleme ve Elektromobilité Dönüşümü ..	12
1.7 Sürdürülebilirlik ve Pil Teknolojileri	16
1.8 Pil Teknolojilerinin Evrimi ve Tarihsel Gelişimi.....	17
1.9 Pil Nedir	19
1.10 Çalışma Prensibine Göre Piller	21
1.10.1 Birincil hücre veya pil (FLB)	21
1.10.2 İkincil hücre veya pil (SLB)	22
1.10.3 Yedek hücre veya pil	24
1.10.4 Yakıt hücresi.....	24
1.11 Kullanılan Kimyasalın Çeşidine Göre Piller	25
1.11.1 Kurşun asit piller.....	25
1.11.2 Lityum iyon piller.....	25
1.11.3 Sodyum iyon piller	25
1.11.4 Nikel kadmiyum piller	26
1.11.5 Lityum sülfür piller.....	26
1.11.6 NanoBolt lityum tungsten piller	26
1.11.7 Redox akış pilleri	26
1.11.8 Alüminyum grafit piller	26
1.11.9 Biyoelektrokimyasal piller.....	27
1.11.10 Organosilikon elektrolit piller.....	27
1.11.11 Katı hal pilleri	27
1.11.12 Altın nanokablolu jel elektrolit piller	27
1.12 Geleneksel pil teknolojileri	28
1.12.1 Kurşun-Asit (Pb-Asit) piller	28
1.12.2 Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd) piller	30
1.12.3 Nikel-Metal Hidrit (Ni-MH) piller	31
1.12.4 Zebra piller (zero emission battery research activity)	32
1.12.5 Sodyum-Kükürt (Na-S) piller	33
1.12.6 Lityum-İyon (Li-iyon) piller.....	35
1.13 Yeni nesil pil teknolojileri	37
1.13.1 Katı hal piller	38
1.13.2 Lityum sülfür (kükürt) (li-s) piller	40
1.13.3 Sodyum iyon piller	42
1.13.4 Metal İyon (Me-ion)-Metal Sülfür (Me-S)-Metal Hava(Me-Air) Pili... 44	
1.13.5 Redoks akış pilleri	48

1.13.6 Esnek ince film piller	49
1.13.7 Grafen pilleri	51
1.14 Pil Endüstrisinde Sürdürülebilirlik	51
1.15 Sürdürülebilir Pil Teknolojilerinde Gelişmeler	52
1.15.1 Şarj edilebilir pillerin geliştirilmesi	52
1.15.2 Karbon ayak izi azaltılması	54
1.15.3 Değerli malzemelerin geri kazanılması	57
1.15.4 Daha sürdürülebilir malzemeler kullanılması	57
1.15.5 Yenilenebilir enerji ile şarj edilebilir piller	59
1.16 Çevresel Yeniliğin Tanımı ve Önemi	60
1.17 Pil Endüstrisinde Çevre Sağlığı	63
1.17.1 Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA)	63
1.17.2 Atık yönetim planları	64
1.17.3 Çevresel risk değerlendirmesi (ÇED)	65
1.17.4 Sürdürülebilirlik raporları	66
1.17.5 Yeşil pil üretim süreçleri	66
1.18 Atık Pillerin Çevresel Etkileri	68
1.18.1 Nikel	68
1.18.2 Kadmiyum	68
1.18.3 Bakır	69
1.18.4 Çinko	69
1.18.5 Kobalt	69
1.18.6 Kurşun	70
1.19 Pillerin Geri Dönüşümü	71
1.19.1 Hidrometalurjik geri dönüşüm	74
1.19.2 Pirometalurjik geri dönüşüm	75
1.19.3 Geliştirilmeye devam edilen yöntemler	75
1.20 Dünya’da Şarjlı Pil Teknolojileri	77
1.20.1 TOGG pili	78
1.20.2 Northvolt sodyum iyon pil teknolojisi	79
1.20.3 Volkswagen katı hal pil testi	81
1.20.4 Festo biyonic-hidrojen pili	82
1.20.5 Lightyear 0 güneş enerjisi teknolojisi	84
1.21 Örnek Olay: Bir Pil Üreticisi	85
1.21.1 Şirket profili ve faaliyetleri	85
1.21.2 Çevresel inovasyon ve sürdürülebilir çabalar	86
1.21.3 Karşılaşılan zorluklar ve tavsiyeler	89
2. KAYNAK ÖZETLERİ	92
3. MALZEME VE YÖNTEM	94
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	95
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR	108
ÖZGEÇMİŞ	118

YÜKSEK LİSANS TEZİ
SÜRDÜRÜLEBİLİR PİL TEKNOLOJİLERİ VE ÇEVRESEL İNOVASYON

Eda KILIÇ

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Melayib BİLGİN

ÖZET

Günümüzde, enerji depolama sistemleri modern yaşamın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir ve bu sistemlerin kalbi, hiç kuşkusuz, pil teknolojileridir. Ancak, bu teknolojilerin geleneksel üretim ve kullanımı çevresel açıdan endişe verici sonuçlara yol açabilir. Bu bağlamda, çevre dostu ve sürdürülebilir çözümler arayışı, sürdürülebilirlik kavramını günümüzde daha da önemli hale getirmektedir. Başlangıç olarak, bu çalışma, mevcut sürdürülebilir pil teknolojileri üzerinde detaylı bir inceleme sunmaktadır. Bu teknolojilerin, pil endüstrisindeki çevresel etkilerin azaltılması ve doğal kaynakların daha verimli bir şekilde kullanılması konularındaki potansiyelleri titizlikle araştırılmaktadır. Ayrıca, geri dönüşüm ve atık yönetimi gibi çevresel faktörlerin, pil üretim süreçlerine nasıl başarılı bir şekilde entegre edilebileceği üzerinde ayrıntılı bir şekilde durulmaktadır. Tezin bir diğer odak noktası, gelecekteki araştırma alanları ve teknolojik gelişmelerdir. Bu bağlamda, yenilikçi pil teknolojileri ve çevrenin sürdürülebilirliğiyle uyumlu çözümler arasındaki potansiyel fırsatlar detaylı bir şekilde incelenmekte ve daha çevre dostu enerji depolama sistemlerinin nasıl geliştirilebileceği üzerinde ayrıntılı bir şekilde durulmaktadır. Ek olarak, hem ülkemizde hem de yurtdışında yaşanan gelişmeleri kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Çalışmanın sunduğu bulgular ve öneriler, akademisyenler ve endüstri profesyonelleri için değerli bir kaynak oluşturacaktır. Gelecekteki sürdürülebilir enerji depolama sistemlerinin sağlanması, çevresel etkilerin ciddi bir şekilde azaltılmasını gerektirir. Bu bağlamda, yenilikçi çözümlerin hızla benimsenmesi hayati öneme sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Pil Endüstrisi, Yenilikçi Çözümler, Sürdürülebilirlik, Atık Yönetimi.

Haziran, 2024; 118 sayfa

M.Sc. THESIS

**SUSTAINABLE BATTERY TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTAL
INNOVATION**

Eda KILIÇ

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Melayib BİLGİN

ABSTRACT

Nowadays, energy storage systems have become an indispensable part of modern life, and the heart of these systems is undoubtedly battery technologies. However, conventional production and use of these technologies can lead to environmentally worrying consequences. In this context, the search for environmentally friendly and sustainable solutions makes the concept of sustainability even more important today. To begin, this study provides a detailed review of existing sustainable battery technologies. The potential of these technologies to reduce environmental impacts in the battery industry and use natural resources more efficiently is being meticulously researched. Additionally, detailed consideration is given to how environmental factors such as recycling and waste management can be successfully integrated into battery production processes. Another focus of the thesis is future research areas and technological developments. In this context, the potential opportunities between innovative battery technologies and solutions compatible with environmental sustainability are examined in detail and how more environmentally friendly energy storage systems can be developed is emphasized in detail. In addition, it comprehensively covers the developments both in our country and abroad. The findings and recommendations offered by the study will constitute a valuable resource for academics and industry professionals. Ensuring future sustainable energy storage systems requires drastic reductions in environmental impacts. In this context, the rapid adoption of innovative solutions is vital.

Keywords: Battery Industry, Innovative Solutions, Sustainability, Waste Management.

June, 2024; 118 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. 2031'e kadar küresel pil üretim kapasitesi	14
Şekil 1.2. Avrupa'daki dev fabrikalar	15
Şekil 1.3. RecycLIB Batarya üretimi nasıl daha sürdürülebilir hale getirilir ? (Fraunhofer ISC)	17
Şekil 1.4. Bağdat pili.....	18
Şekil 1.5. Pil tarihçesi	18
Şekil 1.6. Şarj edilebilir pillere özgü enerji karşılaştırması	23
Şekil 1.7. Şarj edilebilir pillerin yaklaşık çevrim ömrü karşılaştırması.....	24
Şekil 1.8. Tipik yakıt hücresinin çalışma prensibi	25
Şekil 1.9. Pilin Yapısı	28
Şekil 1.10. Kurşun-asit pil şeması.....	30
Şekil 1.11. Ni-Cd pil şeması	31
Şekil 1.12. Ni-MH pil şeması	32
Şekil 1.13. Sodyum Kükürt pil	35
Şekil 1.14. Lityum İyon pil	37
Şekil 1.15. Pillerin CO ₂ ayak izi	39
Şekil 1.16. Geleneksel pil ile geleceğin katı pili arasındaki fark	40
Şekil 1.17. Lityum Sülfür pil şeması	42
Şekil 1.18. Lityum Sülfür pil şeması	42
Şekil 1.19. Sodyum iyon pil şeması.....	43
Şekil 1.20. Metal hava pili	47
Şekil 1.21. Akış pili	49
Şekil 1.22. Araç üretimi sırasında ve batarya üretimi sırasında çıkan emisyonlar	55
Şekil 1.23. Farklı pil malzemelerinin sera gazına etkileri	56
Şekil 1.24. BYD'den bıçak pil	59
Şekil 1.25. Araç ve sabit akülerin başlıca yaşam döngüsü aşamaları	64
Şekil 1.26. Pil malzemelerinin çevresel etkileri.....	67
Şekil 1.27. Kobalt kullanımının dünya çapında dağılımı	70
Şekil 1.28. Avrupa batarya geri dönüşüm haritası (Battery News)	73
Şekil 1.29. Sodyum klorür, nikel ve manganez için üretim hacimleri (09.2023).....	77
Şekil 1.30. Togg otomobili bataryası	78
Şekil 1.31. Northvolt sodyum kesesi	80
Şekil 1.32. Zwickau'daki VW fabrikasında elektrikli otomobillerin montajı	81
Şekil 1.33. Hidrojenden formik asite	83
Şekil 1.34. Ligtyear	84
Şekil 1.35. Pomega enerji depolama teknolojileri tarihçesi	86
Şekil 4.1. Pillerin enerji yoğunluklarının karşılaştırılması	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Pil kullanım uygulamalarının yüzde payı	13
Çizelge 1.2. Pilin anatomisi	21
Çizelge 1.3. Pil teknolojisinin gelişiminin tahmini	47
Çizelge 1.4. Üç tip pil geri dönüşüm prosesinde avantaj, dezavantaj ve zorluk	76
Çizelge 4.1. Pil Türlerinin avantajları, dezavantajları ve çevresel etkileri	95



SİMGELER VE KISALTMALAR

AB	Avrupa Birliği
Al	Alüminyum
BEV	Bataryalı Elektrikli Araç
Ca	Kalsiyum
Cd	Kadmiyum
CO₂	Karbondioksit
CRMA	Kritik Hammadde Yasası
EBA	Avrupa Batarya Birliği
ERA	Çevresel Risk Değerlendirmesi
EV	Elektrikli Araç
Fe	Demir
FLB	Birincil piller
Green PPAs	Yeşil Enerji Satın Alma Anlaşmaları
H₂SO₄	Sülfürik asit çözeltisi
HT	Yüksek Sıcaklık
LCA	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
LCO	Lityum Kobalt Oksit
LEED	Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik
LFP	Lityum Demir Fosfat (LiFePO ₄)
LIB	Lityum İyon Pil
Li-S	Lityum Kükürt
LMO	Lityum Manganez Oksit
Me-Air	Metal Hava
Me-ion	Metal İyon
Me-S	Metal Kükürt
Mg	Magnezyum
Mg cm	Miligram Santimetre
MWh	Megawatt-hour
Na-S	Sodyum-Kükürt
NCA	Nikel, Kobalt, Alüminyum
NFP	Nikel, Demir, Fosfat
Ni-Cd	Nikel-Kadmiyum
Ni-MH	Nikel-Metal Hidrit
NMC	Nikel, Manganez, Kobalt Oranı
NZIA	Net Sıfır Endüstri Yasası
Pb	Kurşun
PbO₂	Kurşun Dioksit
PV	Fotovoltaik
RT	Oda Sıcaklığında
SDGs	Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri
SIB	Sodyum İyon pil
SLB	İkincil Piller
SSB	Katı Hal Pili
Wh/Kg	Watt saat / Kilogram
Wh/L	Wattsaat /litre
WTW	Well to Wheels
Zn	Çinko
µL (mA h)	Mikrolitre (miliamper saat)

1. GİRİŞ

Piller, günlük hayatta elektrik enerjisi sağlayan ve depolayan cihazlardır. Birincil piller ve ikincil piller olmak üzere iki ana türü bulunmaktadır. Birincil piller, şarj edilemeyen pillerdir. Bir kez kullanıldıktan sonra tekrar şarj edilemezler ve içerisindeki kimyasal enerji tükendikten sonra atılırlar. Bu piller genellikle "kuru piller" olarak adlandırılır ve içerdikleri malzemeye göre farklı isimler alırlar. Örneğin, çinko piller, alkalın piller, lityum piller gibi çeşitleri bulunur. İkincil piller ise şarj edilebilir pillerdir. İçerdikleri kimyasal enerji tükendikten sonra şarj edilerek tekrar kullanılabilirler. Lityum-iyon piller ve nikel-kadmiyum piller gibi çeşitleri bulunur. Her iki tür pil de çeşitli metalleri içerir, bunlar arasında lityum, kadmiyum, cıva, nikel, gümüş, çinko, manganez ve kurşun gibi elementler bulunur. Piller, taşınabilir elektronik cihazlardan endüstriyel uygulamalara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır ve enerji depolama ihtiyacının artmasıyla önemleri giderek artmaktadır (Kul, 2020).

Geleneksel enerji kaynaklarının kısıtlı ve çevresel olarak zararlı olması, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebi artırmıştır. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımı için güvenilir ve verimli enerji depolama sistemlerine ihtiyaç vardır. Bu noktada, yeni nesil pil teknolojileri devreye girer. Daha yüksek enerji yoğunluğu, daha uzun ömür, daha hızlı şarj/deşarj süreleri ve daha düşük maliyet gibi avantajlar sunan bu teknolojiler, temiz enerji geçişini hızlandırmada kilit bir rol oynamaktadır.

Pil teknolojilerinin sürdürülebilirlikle uyumlu hale getirilmesi, çevresel koruma ve doğal kaynakların korunması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu, hem pil endüstrisi hem de tüketiciler için önemli bir sorumluluktur ve gelecek nesiller için daha temiz bir çevre ve daha sürdürülebilir bir gelecek için atılması gereken önemli adımlardan biridir. Paris Anlaşması, endüstriyel ve ulaşım sektörlerindeki enerji sistemlerinin dönüşümünü teşvik ederek sera gazı emisyonlarını azaltmayı amaçlamaktadır (Schleussner vd., 2016). Bu anlaşma, 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (Sustainable Development Goals-SDGs) çerçevesinde, daha dengeli bir dünya, daha sağlıklı toplumlar ve daha canlı ekonomilerin oluşturulması için önemli bir fırsat sunmaktadır.

Öte yandan, Avrupa Yeşil Anlaşması, 1990 seviyelerine kıyasla 2030'a kadar net sera gazı emisyonlarında en az %55 azalma hedefini gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır (Sikora, 2021).

Ulaşım sektörünün karbonsuzlaştırılması yolunda, Avrupa Birliği (AB), ekonomisinin tamamen karbonsuzlaştırılması ve 2050'ye kadar iklim nötrlüğüne ulaşma hedefini belirlemiştir. Pil sektöründeki ilerlemeyi hızlandırmak için Avrupa Komisyonu, 2017'de Avrupa Batarya Birliği'ni (EBA) kurmuş ve 2018'de Bataryalar Stratejik Eylem Planını benimsemiştir. AB'nin finansman programları olan Ortak Avrupa İlgi Projeleri (Important Project of Common European Interest IPCEI) bu amaçlar doğrultusunda önemli araçları temsil etmektedir (Mathieu, 2019). Avrupa Pil İttifakı altında faaliyet gösteren bu kuruluşlar, batarya üretimini desteklemeyi, sürdürülebilir pil teknolojilerini teşvik etmeyi, kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamayı ve batarya atıklarının yönetimini iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

Bununla birlikte, dünya genelindeki farklı ülkeler, elektrikli araçların ve temiz enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek için çeşitli stratejiler benimsemektedir. Örneğin, Birleşik Krallık içten yanmalı motorlu araçların satışını 2030'un sonuna kadar durdurmayı planlarken (URL-1), ABD temiz ve eşit bir enerji ekonomisi oluşturarak 2035 yılına kadar karbonsuz elektrik elde etmeyi hedeflemekte ve en geç 2050 yılında sıfır emisyonu ulaşmayı amaçlamaktadır (URL-2). Çin'in enerji dönüşümü için 2021'de yaptığı yatırımların tutarı 297 milyar doları bulurken, ABD'de ise aynı dönemde yapılan enerji dönüşümü yatırımları 120 milyar dolara ulaşmıştır (URL-3). Bu değişen küresel eğilimler, pil endüstrisindeki paydaşların sorumluluklarını gözden geçirmelerini ve sürdürülebilirlik odaklı stratejiler geliştirmelerini gerektirebilir. Bu kapsamda, kritik malzemelerin alternatiflerinin bulunması, ham ve rafine edilmiş malzemelere erişimin güvence altına alınması ve döngüsel ekonominin bir parçası olarak geri dönüştürülmüş malzemelerin entegrasyonu gibi önlemler, sektörün gelecekteki başarısı için kritik öneme sahip olabilir (Granholm, 2021).

Pil endüstrisinin yaygın olarak kullanıldığı elektrikli araçların (EV) tercih edilmesine engel olan şeyler arasında yüksek satın alma maliyeti, sınırlı sürüş mesafesi ve erişilebilir şarj istasyonlarının bulunmaması yer almaktadır. Yaygın benzin istasyonları gibi aynı pratikliği sunan yüksek güçlü bir şarj altyapısının teşvik edilmesi

gerekmektedir. Ayrıca, pil sağlığını koruyarak hızlı enerji depolamasına olanak tanıyan pil geliştirme çalışmaları da önemlidir. Şarj yöntemleri, pil ömrünü uzatmayı, hasarı önlemeyi ve şarj süresini kısaltmayı hedeflemelidir. Yazarlar bu konuyla ilgili, devre karmaşıklığını azaltmak için değişken şarj akımına ve otomatik voltaj dengelemesine sahip bir akü şarj cihazı önermişlerdir. Elektrikli araç hızlı şarj teknolojilerinin incelenmesi, batarya sistemlerine etkileri ve ilgili ısı yönetimi sınırlamalarını içermektedir. Bu inceleme, güç elektroniği dönüştürücü topolojileri vasıtasıyla hızlı şarj sistemlerini geliştirmek için umut verici yeni yaklaşımları ve fırsatları da vurgulamaktadır (Liu vd., 2021; Collin vd., 2019).

1.1 Problem Durumu

Geleneksel pil teknolojilerinin çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik konusundaki yetersizlikleri, modern enerji ihtiyaçlarını karşılamada önemli sorunlar oluşturmaktadır. Pil üretiminde kullanılan malzemelerin çıkarılması ve işlenmesi çevresel zararlara yol açmakta, pil atıkları ise ciddi çevresel sorunlara neden olmaktadır. Özellikle, fosil yakıtlara dayalı enerji depolama sistemlerinin sürdürülebilirlik açısından yetersiz kalması, yeni nesil ve çevre dostu pil teknolojilerinin geliştirilmesi gerekliliğini doğurmaktadır.

1.2 Problem Cümlesi

Bu araştırmada, geleneksel pil teknolojilerinin çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik açısından yetersizlikleri ele alınarak, çevre dostu ve sürdürülebilir pil teknolojilerinin geliştirilmesi gerekliliği incelenmektedir.

1.3 Alt Problemler

- Geleneksel pil teknolojilerinin çevresel etkileri nelerdir?
- Geleneksel pil teknolojilerinin sürdürülebilirlik açısından yetersizlikleri nelerdir?
- Çevre dostu pil teknolojileri hangi özelliklere sahip olmalıdır?
- Yeni nesil pil teknolojilerinin geliştirilmesinde karşılaşılan zorluklar nelerdir?
- Sürdürülebilir pil teknolojilerinin geliştirilmesi için hangi stratejiler uygulanabilir?

1.4 Araştırmanın Amacı

Bu araştırmanın amacı, geleneksel pil teknolojilerinin çevresel etkilerini ve sürdürülebilirlik açısından yetersizliklerini analiz ederek, çevre dostu ve sürdürülebilir pil teknolojilerinin geliştirilmesi için gerekli stratejileri belirlemektir. Bu doğrultuda hem mevcut pil teknolojilerinin değerlendirilmesi hem de yenilikçi çözümlerin sunulması hedeflenmektedir.

1.5 Araştırmanın Önemi

Araştırmanın önemi, modern enerji ihtiyaçlarına uygun, çevre dostu ve sürdürülebilir pil teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik bilgi ve stratejiler sunarak hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de sürdürülebilir enerji depolama çözümlerine katkı sağlamasıdır. Bu çalışma, gelecekteki enerji depolama sistemlerinin daha verimli ve çevreye duyarlı bir şekilde tasarlanmasına yardımcı olacak önemli bilgiler sunmaktadır.

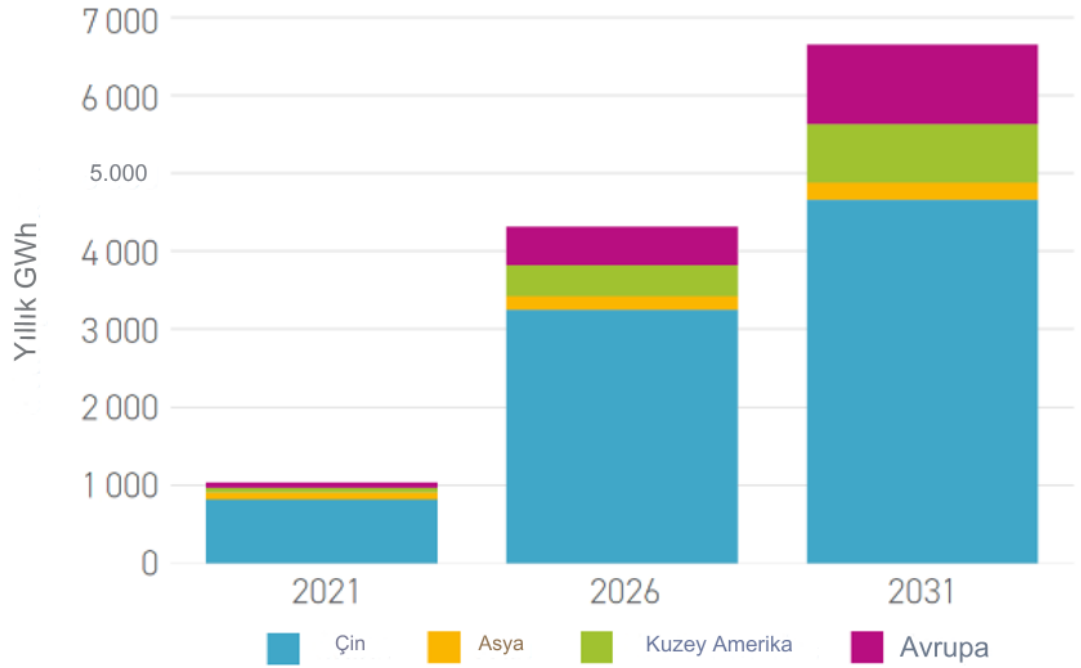
1.6 Enerji Depolama Teknolojilerinde İlerleme ve Elektromobilité Dönüşümü

Yenilikçi bir enerji depolama teknolojisi, muhtelif temel ölçütlere göre performansını artırmayı hedef alan bir takım dönüşümden geçmektedir. Bunların arasında kapasite, gravimetrik ve enerji yoğunluğu (Wh/kg ve Wh/L), güç, şarj süresi, güvenlik, döngü ve ömrü, çevresel etki ve enerji birimi başına maliyeti yer almaktadır. Özellikle enerji yoğunluğu, 2010'da 110 Wh/kg (9 Wh/L) iken, 2020'de 300 Wh/kg (450 Wh/L) olarak önemli bir ilerleme kaydetmiştir. 2030'a doğru 550 Wh/kg (1200 Wh/L) olacağı tahmin edilmektedir (URL-4) (URL-5) (Cao vd., 2020). Ek olarak, pillerin maliyetinin 2030 yılına kadar 102 \$/kWh'den, 80 \$/kWh'ye azalması beklenmektedir, bu da önemli bir ölçüde maliyet düşüşü yaşanacağını göstermektedir (URL-6). Yeni nesil piller ve güç arayüzleriyle ilgili araştırma, tasarım ve üretim çabaları, tüm sürecin uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlamak adına küresel döngüsel ekonomi ilkeleriyle bütünleşmelidir. Bu bütünleşme; pillerin geri dönüşümü, yeniden kullanımı, yeniden imalatı ve yeniden satışı gibi süreçlerle ikinci bir yaşam deneyimi kazanmasından geçmektedir. Pil türüne bağlı olarak, dönüştürücülerin yapıları, bileşenleri ve kontrol sistemleri, pilin ve genel sistemin verimliliğini, dayanıklılığını, performansını ve maliyetini optimize ederken güvenli ve etkin bir şekilde şarj ve deşarj işlemlerini yönetmelidir (Yue vd., 2021). Tablo 1.6.1'de, her bir uygulama türünün payı yüzde

olarak gösterilmektedir. Özellikle, enerji depolama uygulamalarına büyük önem verilmelidir. Sera gazı emisyonlarını azaltmayı, karbon nötrlüğünü teşvik etmeyi ve içten yanmalı motorlu taşıtların aşamalı olarak kullanımdan kaldırılmasını hedefleyen yerel ve uluslararası düzenlemelerin uygulanması, elektromobilité sektörünü kesinlikle yönlendirecektir. Elektrikli araç sayısının önemli ölçüde artması beklenmektedir, bu da elektrikli batarya üretiminin artırılmasını gerektirecektir. Her bir bataryanın enerji depolama kapasitesinin artırılması da elektromobilité sektöründeki bir trend olacaktır. Sonuç olarak, elektromobilité sektörü, sabit depolama sistemleri veya taşınabilir elektronik cihazlar gibi diğer sektörlerle kıyaslandığında, toplam enerji depolama kapasitesi açısından daha büyük bir öneme sahip olacaktır. Bu, diğer sektörlerin enerji ihtiyaçlarının azalacağı anlamına gelmez; tam tersine, elektromobilité sektörü toplam depolanan enerjinin yüzdesel olarak daha büyük bir payını alacaktır. 2025'ten 2030'a kadar enerji depolama ve taşınabilir elektronik sektörlerindeki yüzdesel azalmayı açıklayan budur (Liu vd., 2022).

Çizelge 1.1. Pil kullanım uygulamalarının yüzde payı (Liu vd., 2022).

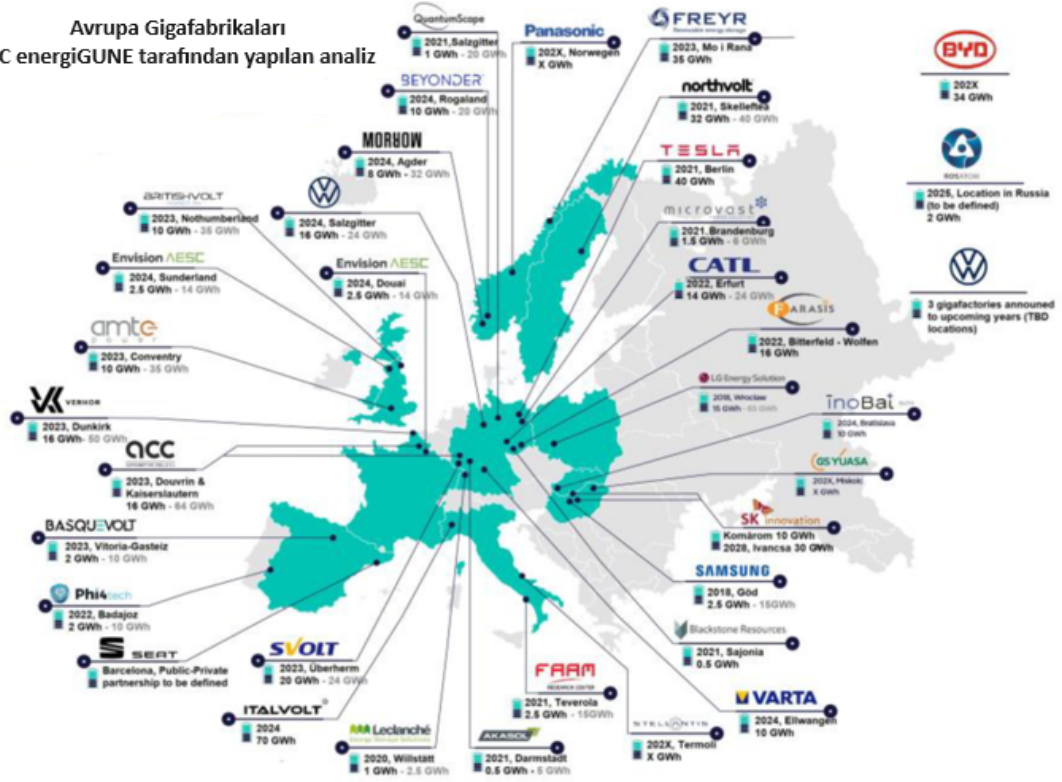
	YIL		
	2020	2025	2030
E- Mobilite	81.21%	83.21%	88.94%
Enerji Depolama	3.55%	10.81%	8.43%
Taşınabilir Elektronik	15.25%	5.97%	2.63%



Şekil 1.1. 2031'e kadar küresel pil üretim kapasitesi (Gifford, 2022).

Şekil 1.1'de Avrupa için kurulmuş ve planlanan büyük fabrikaları veya genel bir bakışı göstermektedir. 2021'de Çin, dünya genelindeki lityum iyon pil üretim kapasitesinin yaklaşık %79'unu oluştururken, Kuzey Amerika ve Avrupa sırasıyla yaklaşık %5 ve %7'lik paya sahiptir. Avrupa'nın küresel pil tedarik pazarındaki payının 2026'da %11'e, 2031'de ise %15'e ulaşması beklenmektedir (URL-7).

Avrupa Gigafabrikaları
CIC enerjiGUNE tarafından yapılan analiz



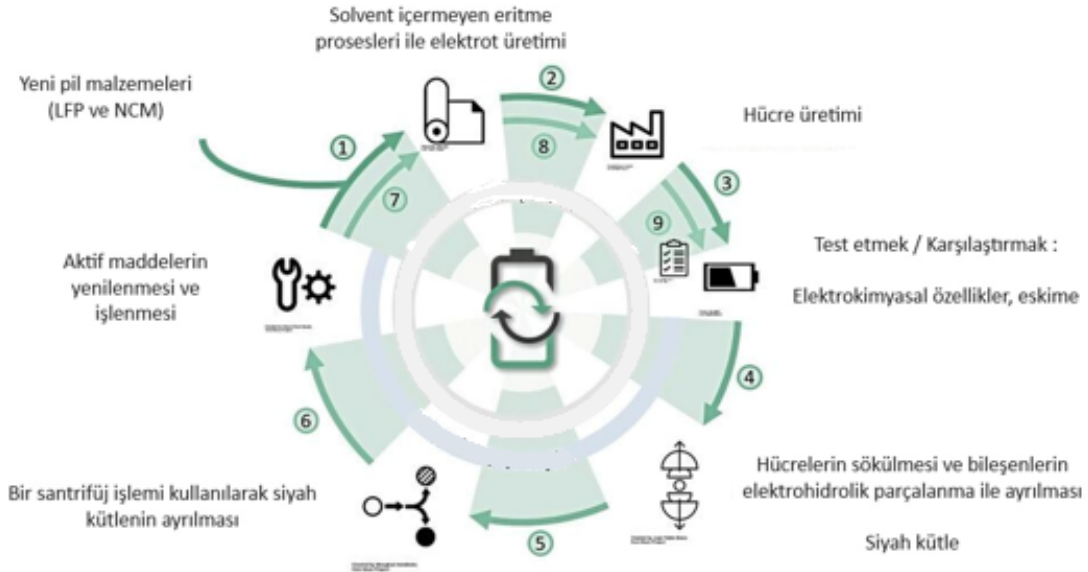
Şekil 1.2. Avrupa'daki dev fabrikalar (URL-7).

Günümüzde yaygın olarak kullanılan Lityum iyon piller (LIB'ler), şebeke uygulamalarında frekans ve voltaj düzenlemesini iyileştirme ve kesintiler sırasında yedek güç sağlama potansiyeline sahiptir. Yenilenebilir enerji santralleri veya akıllı şebekeler gibi alanlarda, LIB'ler güç sisteminin istikrarını sağlamaya ve değişen elektrik talebini karşılamaya yardımcı olabilir. Enerji piyasasındaki fiyat farklılıklarından diğer bir deyişle enerji arbitrajından yararlanmak için de piller kullanılabilir. Özellikle, enerji maliyetinin düşük olduğu dönemlerde enerji depolanabilir ve fiyatın yükseldiği dönemlerde serbest bırakılarak ekonomik fayda sağlanabilir. Ayrıca, şebeke bağımsız ortamlarında, telekom baz istasyonları gibi veya ev kullanımı için de kullanılabilir. Pillere yönelik araştırmalar, elektrotlar ve elektrolitler için malzemeler, elektrotların konfigürasyonu ve bileşimi, hücrelerin düzeni (kese, silindirik ve prizmatik şekillerde), ayırıcı malzemesi ve kalınlığı, pillerin tasarımı gibi birçok alana odaklanmıştır. Bununla birlikte, paket kapağı, elektronik kartlar, sensörler, röleler ve soğutma sistemleri gibi diğer bileşenlerde önemlidir. Araştırma faaliyetlerinin önemli bir bölümü aynı zamanda çevre dostu tasarım ve geri dönüşüm yolları üzerine yoğunlaşmaktadır.

1.7 Sürdürülebilirlik ve Pil Teknolojileri

21. yüzyılın başından bu yana, enerjiyi verimli kullanma ve emisyonları azaltma konusundaki çabalar, sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesi, düşük karbonlu toplumların oluşturulması ve toksik olmayan çevrelerin korunması amacıyla hızla ilerlemektedir. Bu çabalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının benimsenmesi ve yeşil teknolojilerin geliştirilmesi yoluyla desteklenmektedir (Sun vd., 2019). Elektronik cihazların ve kablosuz teknolojinin kullanımının artmasıyla birlikte pil tüketimi önemli ölçüde artmıştır. Bu durum, geleneksel pillerle ilişkili çevresel etki ve kaynak kullanımı sorunlarını çözebilecek sürdürülebilir pil teknolojilerine ihtiyaç duyulmasına yol açmıştır. Son yıllarda, olumsuz çevresel etkiyi en aza indirebilecek ve kaynak verimliliğini artıracak sürdürülebilir pil teknolojilerine olan ilgi giderek artmaktadır. Bu sürdürülebilir pil teknolojileri, pillerin verimliliğini, güvenilirliğini ve güvenliğini artırırken yaşam döngüleri boyunca çevresel ayak izlerini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu tür teknolojinin bir örneği, elektrikli araçlarda ve taşınabilir elektroniklerde yaygın olarak kullanılan lityum iyon pillerdir.

Bu piller, geleneksel pil teknolojilerine göre daha fazla enerji yoğunluğu ve daha uzun ömür gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca kurşun ve kadmiyum gibi tehlikeli maddeler içermedikleri için daha çevre dostu olma potansiyeline de sahiptirler. Şekil 1.3.'de yer aldığı gibi, pillerin sürdürülebilirliğini daha da artıracak yenilikçi pil malzemeleri ve tasarımlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin araştırmacılar, pil üretiminde sodyum iyon ve magnezyum iyon piller gibi daha bol bulunan ve çevre dostu malzemelerin kullanımını araştırmaktadır. Sürdürülebilir piller, çevresel etkileri en aza indirmek için sosyal ve ekolojik standartlara tam uygun malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Bu piller uzun ömürlü, güvenli, onarılabilir, yeniden kullanılabilir ve geri dönüştürülebilir özelliklere sahiptir. Temiz elektrikli araçlara güç sağlayarak 2050 iklim hedeflerine ulaşmak için ulaştırma sektöründeki emisyonları %90 oranında azaltmayı hedeflemektedir. Yenilenebilir enerjiye yönelik çabaları desteklemektedir. Ayrıca karbon ayak izini ve çevresel etkileri azaltmaktadır (European Commission, Sustainable Batteries in Their Full Life Cycle; 2020) (URL-72).



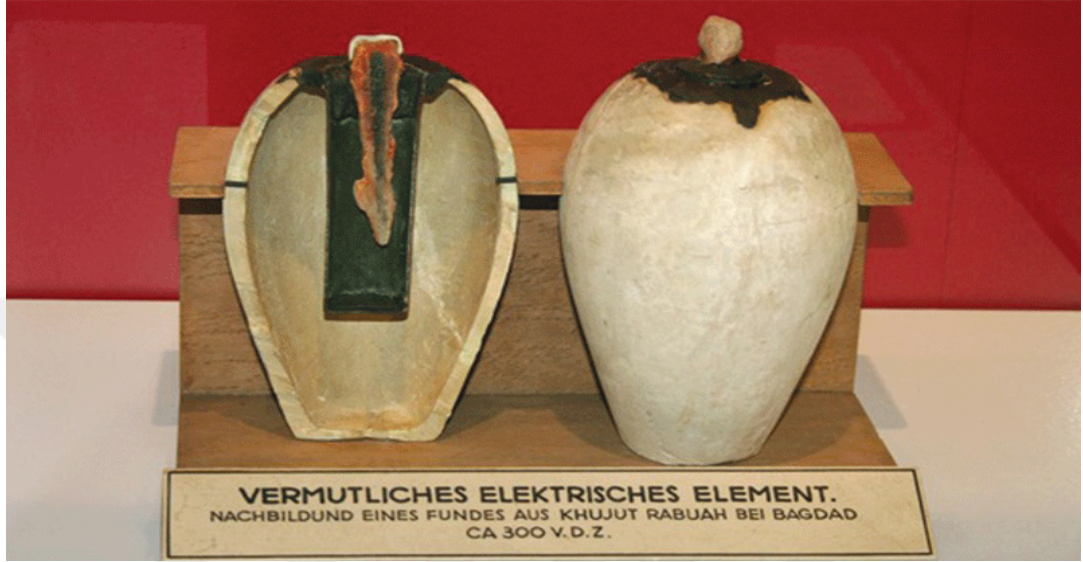
Şekil 1.3. RecycLIB Batarya üretimi nasıl daha sürdürülebilir hale getirilir ? (Fraunhofer ISC) (URL-71).

1.8 Pil Teknolojilerinin Evrimi ve Tarihsel Gelişimi

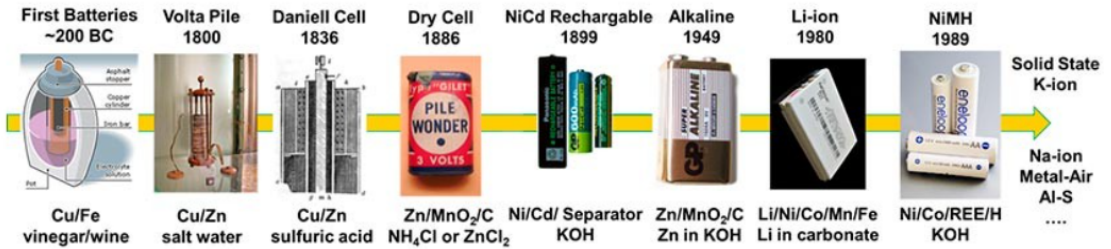
Şekil 1.4'de bataryaların tarihçesi, insanlığın enerji depolama ihtiyacını karşılama yolculuğunda önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilmektedir. Şekil 1.4.'de gösterildiği gibi Bağdat pilleri, tarihte ilk keşfedilen piller olarak bilinmektedir. Alman arkeolog Wilhelm Konig, 1936'da Bağdat'ın güneydoğusundaki Khujut Rabu bölgesinde arkeolojik kazılar yapmış ve 1938'de bu kazıların sonuçlarını değerlendirirken çömlek görünümüne sahip olan Bağdat pillerini keşfetmiştir (Kul., 2020). İlk pilin icadı ise, 1800 yılında İtalyan bilim adamı Alessandro Volta'ya atfedilmektedir. Tuzlu suya batırılmış kartonla ayrılmış bakır ve çinko disklerden oluşan Volta hücresi, modern pillerin öncüsü olmuştur. Ancak ilk piller yeniden şarj edilemediği için kimyasal reaktifleri tükenene kadar kullanılmaktaydı. Şarj edilebilir pil teknolojisinin doğuşu, 1859 yılında Fransız Doktor Gaston Plante tarafından gerçekleştirilmiştir. Plante, kurşun ve asit kimyasına dayalı olarak ilk şarj edilebilir pil olan kurşun-asit aküyü icat etmiştir. Bu buluş, pilin deşarj sürecini tersine çevirerek yeniden şarj edilmesini mümkün kılarak enerji depolama teknolojisinde önemli bir adım olmuştur (URL-73).

Daha sonraki yıllarda, şarj edilebilir pil teknolojileri hızla gelişmiştir. 1899'da nikel-kadmiyum, 1980'lerin ortalarında nikel-metal-hidrit ve 1977'de lityum-iyon piller gibi çeşitli yeni pil tipleri icat edilmiştir. Bu gelişmeler, elektrikli araçların yaygınlaşmasını sağlayarak ve 19. yüzyılın sonlarında Avrupa ve Amerika'nın elektrifikasyonuna

büyük ölçüde katkıda bulunarak, elektrifikasyon alanında devrim yarattı. Elektrikli arabalar, sessiz çalışmaları, emisyonlu olmaları ve benzinli arabalara göre kullanım kolaylığı nedeniyle 1900'lü yılların başında yaygınlaşmıştır. Bu gelişmeler, modern pil teknolojisinin ve şarj edilebilir bataryaların toplumsal ve endüstriyel dönüşümde oynadığı kritik rolü vurgulamaktadır (URL-73).



Şekil 1.5. Bağdat pili (Kul, 2020).



Şekil 1.6. Pil tarihçesi (Semco Üniversitesi, Batteries: a History of innovation, 2024) (URL-69).

- Voltaik Hücrenin Bulunuşu (1800): 18. yüzyılda elektrokimya alanındaki erken çalışmalar, batarya teknolojisinin temellerini atmıştır. Luigi Galvani'nin 1780'lerde yaptığı hayvan doku deneyleri, elektrik akımının canlı organizmalarda nasıl etkileşime girdiği konusunda ilk ipuçlarını ortaya koymuştur. Ardından, Alessandro Volta 1800'de voltaik hücreyi icat ederek, metal disklerin sıralanmasıyla çalışan ilk kimyasal bataryayı oluşturmuştur. Bu icat, günümüz bataryalarının çoğunun temelini oluşturan prensipleri içermektedir (URL-8).

- Güncel Kimyasal Pil Teknolojilerinin Temelleri (19. Yüzyıl): İlerleyen yıllarda, çeşitli bilim insanları ve mucitler farklı kimyasal bileşimlere dayanan piller geliştirmiştir. Örneğin, Daniell hücresi (1836) ve Leclanché pil (1866) bu dönemde icat edilmiştir. Georges Leclanché tarafından icat edilen zink-karbon pil, oldukça dayanıklı ve ekonomik bir bataryası ile ilgi odağı olmuştur. Bu pil, taşınabilir cihazlarda ve aydınlatma alanlarında sıklıkla kullanılmış ve ticari olarak üretilmiştir. Zink-karbon piller, 19. yüzyılın sonlarına doğru evlerde, sokaklarda ve endüstride elektrik enerjisi sağlamak için yaygın bir şekilde kullanılmıştır (URL-8).
- Kuru Hücrenin Bulunuşu (1886-87): Carl Gassner, birincil hücrelerin (tek kullanımlık piller (FLB) kurumasını önleyen kuru hücreyi icat etmiştir. Gassner'ın kuru hücresi, önceki ıslak hücrelere göre daha sağlam bir yapıya sahipti; bakım gerektirmemekte, sızmamakta ve herhangi bir yönde kullanılabilmekteydi. 1,5 volt potansiyel sağlayarak, 1896'da National Carbon Company tarafından pazarlanan Columbia'nın, kuru hücre olarak ilk serisi üretilmiştir. National Carbon Company, Gassner'in tasarımını kullanarak Paris'in süpürgesinin rulo mukavva kısmını değiştirerek geliştirmiştir. Bu yenilik katot için daha fazla alan bırakmış ve pilin montajını kolaylaştırmıştır (URL-9).
- Lityum-İyon Piller (1990'lar): Gerçek bir yenilik, John Goodenough, Stanley Whittingham ve Akira Yoshino'nun lityum iyon pillerini icat etmesiyle gerçekleşmiştir. 1990'ların başlarında ticari olarak kullanıma sunulan bu teknoloji, öncelikle kameralar, cep telefonları ve dizüstü bilgisayarlar için kullanılmaya başlanmış ve daha sonra elektrikli araçlar için elektrik depolama alanında bir devrim yaratmıştır. Lityum-iyon piller, önceki modellere göre önemli ölçüde daha hafif, daha güçlü ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu da daha uzun menzilli ve daha yüksek performansa sahip elektrikli araçların üretilmesini sağlayarak onları günlük kullanım için daha pratik hale getirmiştir (URL-10)

1.9 Pil Nedir

Piller, elektrik ve elektrokimya kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Bir pilin veya hücrenin bir katodu (pozitif plaka) ve bir anodu (negatif plaka) olmak üzere 2 adet elektrodu vardır. Bu elektrotlar birbirinden ayrılmalıdır ve çoğunlukla iyonların elektrotlar arasında geçişine izin veren bir

elektrolit içerirler. Pilin içersine sıkıştırılan kimyasal madde elektrik enerjisine çevrilir, bunun sonucunda enerji ortaya çıkmaktadır. İyonların elektrolit ile kimyasal reaksiyona girmesi sonucu iki kutba da (pozitif + ve negatif-) enerji gönderilmektedir. Bu işlem elektrolit sıvısı bitene kadar devam etmektedir. Elektrot malzemeleri ve elektrolit, bir pilin terminalleri arasında yeterli elektromotor kuvveti (volt cinsinden ölçülür) ve elektrik akımı (amper cinsinden ölçülür) geliştirebilecek şekilde seçilmekte ve düzenlenmektedir. Bir elektrotun, yalnızca sınırlı sayıda kimyasal enerji birimi içerdiği ve bu nedenle belirli bir kapasiteye sahip olduğu ve sonunda tükeneceği dikkate alınmalıdır. Bir pilin aktif parçaları genellikle bir kutu içinde muhafaza edilmektedir ve bu kutu, bir kapak sistemi (veya ceket) ile havayı dışarıda ve elektrolit çözücüyü içeride tutarak montaj için bir yapı sağlamaktadır. Piller, günlük yaşamımızda kullandığımız pek çok cihazın çalışması için gereklidir ve elektrik enerjisi sağlamak için yaygın bir yöntemdir (Schumm, 2024).

Pilde her bir ünite genellikle 1.5 voltluk bir gerilime sahiptir. Bu üniteler bir araya getirilerek daha yüksek voltajlı piller oluşturulabilir. Örneğin, 9 voltluk bir pilin içinde seri olarak bağlanmış altı adet 1.5 voltluk pil bulunabilir. Enerjinin iletimi için iki maddeye ihtiyaç duyulur: elektrokimyasal olarak aktif ve farklı kompozisyonlara sahip iki ayrı elektrot. Bu iki elektrot, aralarında iletkenlik sağlayacak bir elektrolite batırılır. Elektrotlardan biri çinko veya lityum gibi bir metal içerir, bu da elektrolitin içinde negatif bir gerilim oluşturur ve negatif elektrotu temsil etmektedir. Diğer elektrot ise oksijenle zenginleştirilmiş, elektron ileten bir bileşikten oluşmaktadır. Örneğin mangandioksit, gümüşoksit, nikelhidroksit veya uygun bir oksijen elektrotu kullanılabilir. Bu elektrot, elektrolitin içinde pozitif bir gerilim oluşturur ve elektrokimyasal sistemin pozitif elektrotunu temsil etmektedir. Ünitenin voltajı, elektrokimyasal sisteme bağlı olarak 1.2 V ile 3.6 V arasında değişebilir (Eröztürk, 2004).

Çizelge 1.2. Pilin anatomisi (S&P Global) (URL-70).

Pil bileşenleri	Tipik kompozisyon	İşlev
Katot	Lityum, Nikel, Kobalt, Manganez, Alüminyum, Demir ve Fosfat	Li-iyonların anot tarafında depolanacak elektrolit ve elektron kanalı yoluyla katkıda bulunması
Anot	Grafit, Silikon (Si)	Pil şarj edildiğinde Li-iyonları depoda tutmak ve deşarj olduğunda Li-iyonları ve elektronları katoda geri salmak
Ayırıcı	Polietilen (PE)	Li-iyonların aralarında dolaşabilmesine izin verirken katot ve anot malzemelerini ayrı tutmak
Akım toplayıcı (Katot)	Alüminyum (Al)	Katot tarafında elektrokimyasal reaksiyondan üretilen elektronların toplanması ve katot malzemeleri tarafından oksitlenmesinin önlenmesi
Akım toplayıcı (Anot)	Bakır (Cu)	Reaksiyon sonucu oluşan elektronların anot tarafında toplanması ve anot malzemeleri tarafından oksitlenmesinin önlenmesi
Elektrolit	Çözücüler (EC, DMC, DEC, EMC, PC, vb.); Tuzlar (LiPF ₆ , LiClO ₄ , LiBF ₄ ve benzeri)	İyi bir termal kararlılığı ve geniş bir çalıştırılabilir voltaj penceresini korurken, Li-iyonlara iyi bir iletkenlik sağlar.

1.10 Çalışma Prensibine Göre Piller

1.10.1 Birincil hücre veya pil (FLB)

Genellikle, birincil piller şarj edilemez. İlk ömürlü pillerin geçmiş çalışma verileri, pilin ilk uygulamasında nasıl eskidiğini ve performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Çalışma koşulları, şarj yöntemleri ve sıcaklık gibi faktörler, ilk ömürlü pillerin bozulmasında ve eskimesinde rol oynamaktadır (Gua vd., 2023). Kullanım ömürlerini tamamladıktan sonra atılan piller, içlerinde bulunan ağır metallerin doğaya salınmasıyla çevre kirliliğine yol açmaktadır ve dolayısıyla insan sağlığını tehdit etmektedir. Ayrıca, yüksek oranda çinko, mangan ve demir gibi metaller içerdikleri için ekonomik değer taşımaktadırlar, çünkü doğal kaynaklar yerine kullanılan madenleri içermektedirler. Kullanım alanları arasında kameralar, robot oyuncaklar, saatler, ışıklar, radyolar yer almaktadır.

Bu piller, çoğunlukla emici malzeme veya ayırıcıdaki elektrolitleri kullanmaktadır. Elektrolit tipine bağlı olarak birincil piller sulu ve susuz olarak sınıflandırılabilir.

Sulu piller, su bazlı elektrolit çözeltileri içermektedir. Bu tür piller arasında Çinko-Karbon, Çinko-Klorür, Alkalın Çinko-Mangan Dioksit, Çinko-Hava, Çinko-Gümüş Oksit ve Çinko-Cıva Oksit pilleri bulunmaktadır.

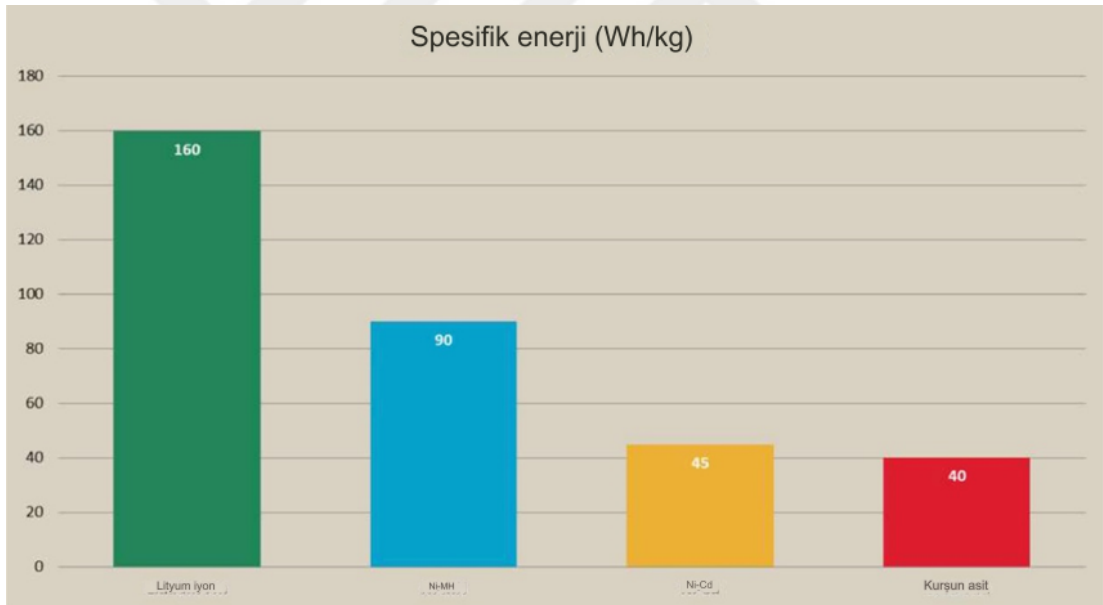
Susuz elektrolit türü piller ise; Lityum-Tiyonil Klorür, Lityum-Sülfürlü Klorür, Lityum-Kükürt Dioksit, Lityum-Mangan Dioksit, Lityum-Karbon Monoflorür, Lityum-Demir Disülfür, Lityum-İyot ve Lityum-Gümüş Vanadyum Oksit gibi çeşitli türleri içermektedir.

1.10.2 İkincil hücre veya pil (SLB)

İkincil bir hücre veya pil; deşarj sırasında, akımın tersi yönde hareket ederek devreden geçmesiyle şarj edilebilmektedir. Bu piller, iki elektrot olan anot ve katottan oluşur. Şarj edilebilir pil sistemleri hem sulu hem de susuz elektrolitlere sahiptirler. Elektrotlar, şarj ve enerji dağıtımı sırasında iyonları depolayan ve serbest bırakan ince tabakalardır. Genellikle, anot grafit ve diğer metallerden yapılırken katot, kobalt, mangan, nikel gibi oksitler, fosfatlar veya silikatlar formunda farklı metallerden oluşabilir (Hsu vd., 2024). Nikel, kobalt, lityum gibi kıymetli madenler içerdikleri için, bu piller dünya çapında stratejik ve ekonomik açıdan büyük öneme sahiptir. Kullanım alanlarının gelişmesiyle birlikte, her gün daha da artan ham madde talebi, doğal kaynaklardan elde edilenlerin bu talebi karşılamasını zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda, geri dönüşüm ve geri kazanım işlemleri, talebi dengelemekte önemli bir rol oynamaktadır. Kullanım alanları arasında endüstriyel taşıma araçları, askeri teçhizat, otomotiv, elektrikli bisikletler ve golf arabaları yer almaktadır. SLB'ler düşük performansları nedeniyle genellikle yeni pillerden daha az güvenilirdir; bu da daha fazla kullanılmadan önce güvenlik ve ekonomik açıdan kapsamlı bir değerlendirmeyi gerektirmektedir (Gua vd., 2023). Genellikle, bu pillerin kullanım ömrü yaklaşık olarak 3 yıl veya daha az kabul edilmektedir. Pilin ömrü sonuna yaklaştıkça, şarj etme süreleri kısalmakta, şarj işlemi daha hızlı gerçekleşmekte ve ardışık şarj ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Aşırı deşarj durumunda, pil ani ve hızlı bir şekilde boşalabilir, bu da pilin kullanım ömrünün sona erdiğini ve değiştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Şekil 1.7 ve Şekil 1.8'de karşılaştırılmıştır. Pil teknolojilerindeki gelişmeler, şarj edilebilir pillerin yaşadığı bazı dezavantajları azaltabilir. Örneğin, nanoteknoloji kullanılarak pilin çalışma ömrü artırılabilir ve pilin performansında düşüş yaşanması önlenerek daha uzun süre verimli bir şekilde kullanılabilir hale gelebilir. Pillerin dengesiz

sıcaklık koşullarında kullanımı, pil performansını ve ömrünü etkileyebilir. Genellikle, pillerin maksimum çalışma sıcaklığı -20 ila +60 santigrat derece arasındadır. Özellikle nikel-metal hidrit piller ve kurşun asitli aküler, düşük sıcaklıklarda performans kaybına yol açabilir veya ömürlerini kısaltabilir. Pilin düşük sıcaklıklarda kullanılması gerekiyorsa, Nano izolasyon gibi yan koruyucular veya aşamalı değişim nanomalzemeleri kullanılabilir. Bu malzemeler, pilin soğuk ortamlarda sıcaklığının düşmesini önler ve aşırı ısınmayı engeller. Ayrıca, pillerin yapısında nano değişiklikler yapılması, pilin çalışma sıcaklığına uyum sağlamasına yardımcı olabilir (Hsu vd., 2024).

Sulu elektrolitli piller arasında Kurşun Asit, Nikel-Metal Hidrür, Nikel-Kadmiyum ve Alkalın Çinko-Mangan Dioksit pilleri bulunmaktadır. Susuz elektrolitli piller ise Lityum İyon, Lityum Metal, Sodyum Kükürt, Metal Hava ve Sodyum Nikel Klorür gibi çeşitli türleri içermektedir.



Şekil 1.7. Şarj edilebilir pillere özgü enerji karşılaştırması (Hsu vd., 2024).



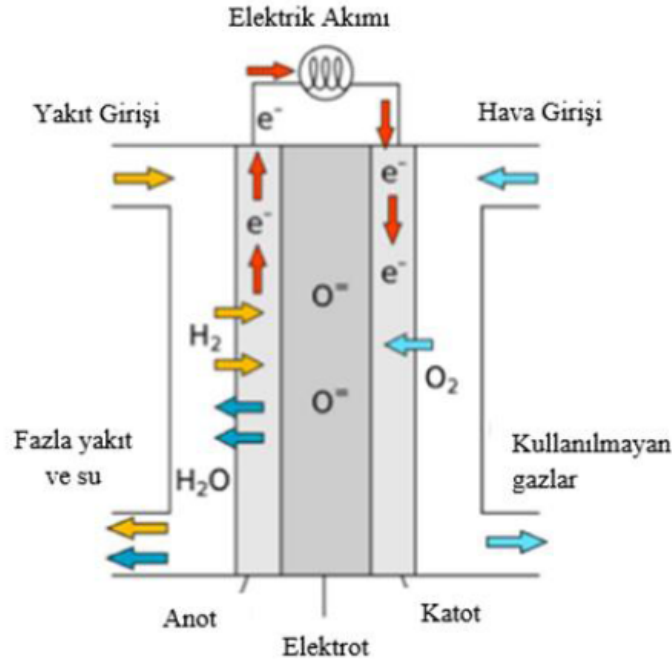
Şekil 1.8. Şarj edilebilir pillerin yaklaşık çevrim ömrü karşılaştırması (Hsu vd., 2024).

1.10.3 Yedek hücre veya pil

Yedek hücre veya pil, birincil pil grubuna aittir. Bu tür piller genellikle uzun süreli depolama amacıyla tercih edilmektedirler. Hücrenin aktif kimyasalları, ihtiyaç duyulana kadar ayrı ve izole edilmiş bir şekilde saklanmaktadır (URL-11). Yedek piller, elektrolit içermeyecek şekilde monte edilmektedirler. Etkin hale getirilmiş hücrelerin performansını olumsuz etkileyebilecek tehlikeli koşullar altında güvenle saklanabilirler. Piller kullanılmadan önce eksik parçaları eklenerek tamamlanabilir (Root, 2010).

1.10.4 Yakıt hücresi

Şekil 1.9'da yer alan yakıt hücreleri, hidrojen veya başka bir yakıtın kimyasal enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üreten ve yakıtın gizli kimyasal enerjisini ortaya çıkaran cihazlardır. Yakıt hücrelerinin çalışma prensibi pillerle benzerlik gösterir. Ancak, yakıt hücreleri tükenmez ve tekrar şarj edilmeleri gerekmez. Sürekli yakıt tedariki sağlandığında, elektrik ve ısı üretirler. Yakıt hücresinin yapısal bileşenleri arasında anot, katot ve elektrolit zarı bulunur. Yakıt hücresi, hidrojeni anottan ve oksijeni katottan geçirerek çalışır (Emeksiz ve Kara, 2022).



Şekil 1.9. Tipik yakıt hücresinin çalışma prensibi (Emeksiz ve Kara, 2022).

1.11 Kullanılan Kimyasalın Çeşidine Göre Piller

1.11.1 Kurşun asit piller

Genelde fotovoltaik sistemlerde tercih edilir. Uzun ömürlü, düşük maliyetli olma gibi avantajları vardır. Yüksek bakım maliyetleri ve düşük enerji yoğunlukları ise dezavantajları arasında yer almaktadır. Aşırı şarj durumunda yapısında bulunan sülfirik asit patlama tehlikesi yaratmaktadır (Emeksiz ve Kara, 2022).

1.11.2 Lityum iyon piller

Kurşun asit pillerden sonra en çok tercih edilen pil çeşididir. Toksik maddeler içermedikleri için kolay imha edilebilirler. Aşırı ısınma sorunu ve yüksek gerilimlerde zarar verme olasılığı bulunmaktadır (Emeksiz ve Kara, 2022).

1.11.3 Sodyum iyon piller

Sodyum maddesinin ağır yapılı olması dezavantajları arasındadır. Fakat gelecekte lityum iyon pillerin yerini alması beklenmektedir (Emeksiz ve Kara, 2022).

1.11.4 Nikel kadmiyum piller

1.3 volt'a kadar gerilim üretme özellikleri vardır. İçinde bulunan kadmiyum bulunması nedeniyle imhası ve geri dönüşümü zorludur (Emeksiz ve Kara, 2022).

1.11.5 Lityum sülfür piller

Daha yüksek kapasiteli bir pil çeşidi olduğu için gelecekte aktif kullanıma geçme şansına sahiptir. Ancak ömrü diğer pil çeşitlerine göre kısadır. Ayrıca elektrokimyasal tepkimelerde sülfür katodu zamanla korozyona uğramaktadır (Emeksiz ve Kara, 2022).

1.11.6 NanoBolt lityum tungsten piller

N1 Technologies, Inc.'deki araştırmacılar, bakır anot alt katmanına yapışan ve ağ benzeri bir nano yapı oluşturan çok katmanlı tungsten ve karbon nanotüplerini birleştirerek pil anot malzemelerini geliştirdiler. Bu, şarj ve deşarj döngüleri sırasında artan iyon bağlanması için geniş bir yüzey alanı oluşturmaktadır. Böylece pillerin daha fazla enerji depolamasına ve hızlı şarj olmasına olanak sağlanmaktadır (URL-12).

1.11.7 Redox akış pilleri

Hidroklorik ve sülfürik asit ilavesiyle, bu pil türünde Li-ion pillere göre %70 daha yüksek bir enerji yoğunluğu gözlemlenmiştir. Bu pil çeşidi, rüzgâr tribünleri ve güneş panellerinden elde edilen enerjinin depolanması için idealdir. Elektrikli araçlarda tercih edildiğinde ise tek bir şarjla 1600 km'ye kadar sürüş imkânı sunmaktadır. Ayrıca, daha hafif ve yüksek enerji depolama kapasitesi sunan bir yapısı bulunmaktadır (URL-13).

1.11.8 Alüminyum grafit piller

Stanford Üniversitesi'nde geliştirilen bu piller, son derece hızlı şarj olma yeteneği sunmaktadır. Akıllı telefonlar için yapılan denemelerde, telefonun 60 saniyede şarj edilebildiği gözlemlenmiştir. Ancak, şu anki prototipte sadece 1.5 V enerji çıkışı sağlanabilmektedir, bu da mevcut elektronik cihazlar için yeterli değildir. Daha işlevsel bir kullanım şekli bulunması halinde, bu piller daha hafif, daha yüksek enerji kapasitesine sahip ve güvenli olacaktır (URL-13).

1.11.9 Biyoelektrokimyasal piller

Bu piller oksidasyon yöntemi kullanmaktadır. Anaerobik bakteriler ile asetik asit üretmektedir. İçeriğindeki bakterilerin sürekli olarak kendini yenilemesi ve sonsuz ömre sahip olması avantajına sahiptir. Bu teknoloji, geleceğin tükenmeyen pil özelliğini üstlenebilir (URL-13).

1.11.10 Organosilikon elektrolit piller

Li-ion pillerde elektrotlardaki ateş alma ve patlama risklerini azaltmak amacıyla organosilikon bazlı solventlerin kullanılması, bu teknolojinin gelişmesine yol açmıştır. Ancak, bu teknoloji henüz araştırma aşamasındadır ve çalışmalar hızla ilerlemektedir (URL-12).

1.11.11 Katı hal pilleri

Katı hal pilleri, ısınma sorunları ve yangın riskini ortadan kaldırılarak performans kaybı olmaksızın ömür boyu kullanım sağlayabilir (URL-13).

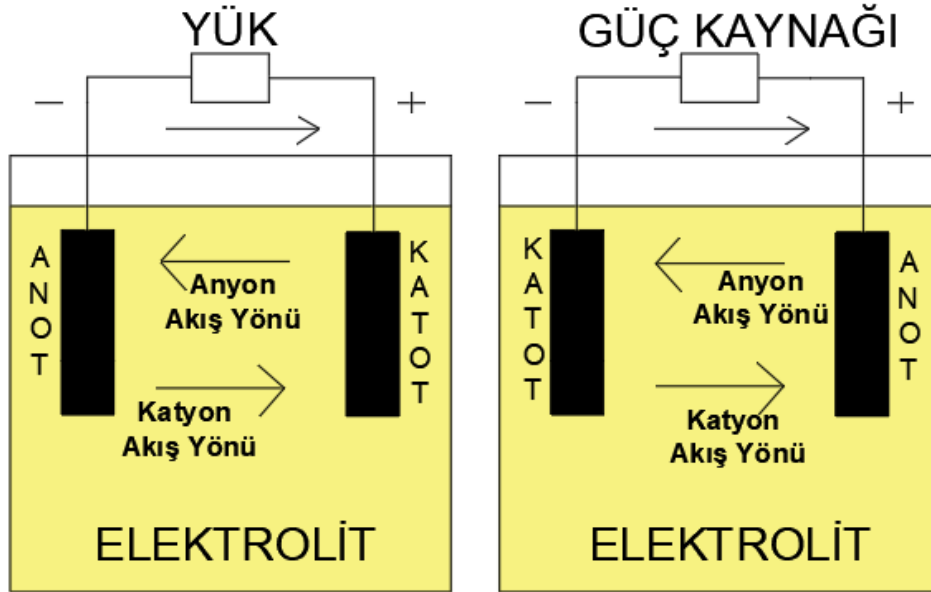
Güvenlikli olması, düşük üretim maliyeti ve yüksek enerji yoğunluğu sayesinde katı hal piller, gelecek nesillerin pil sistemi için en umut verici pil tipi olarak kabul edilmektedir (Barut, 2019).

1.11.12 Altın nanokablolu jel elektrolit piller

Lityum iyon piller için daha iyi bir elektrolit arayışında olan Kaliforniya Üniversitesi Irvine'deki araştırmacılar tarafından, sıvılara nazaran daha az yanıcı olan jeller üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Altın nanoteller mangan dioksitle, ardından elektrolit jelle kaplanmıştır. Nanoteller genellikle pillerde kullanılamayacak kadar hassastır. Ancak bunlar dayanıklı bir hale gelmiştir. Araştırmacılar ortaya çıkan elektrodu şarj ettiğinde, onun şarj tutma özelliğini kaybetmeden 200.000 döngüden geçtiğini keşfetmişlerdir. Bu, geleneksel bir pildeki 6.000 döngüye eşdeğer olduğu için başarılı bir tasarımıdır (URL-12).

1.12 Geleneksel pil teknolojileri

Geleneksel pil teknolojileri, çağdaş yaşamın vazgeçilmez bir parçasıdır ve elektronik cihazların enerji ihtiyacını karşılamak için geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak, bu teknolojilerin bazı önemli kısıtlamaları ve çevresel etkileri bulunmaktadır. Öncelikle, geleneksel pillerin sınırlı enerji depolama kapasitesi ve uzun şarj süreleri, kullanıcılar için pratik kullanımı zorlaştıran önemli bir kısıtlama oluşturmaktadır. Özellikle taşınabilir cihazlar için bu durum, günlük yaşamı etkilemekte ve sürekli olarak şarj etme gereksinimini artırmaktadır. Bunların yanında, bazı geleneksel pil teknolojilerinin çevreye zararlı olabileceği bilinmektedir. Özellikle kurşun asit piller gibi bazı piller, atıklarının doğaya zarar vermesiyle çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bu durum, pilin kullanım ömrü sona erdiğinde atılmasıyla ilgili ciddi endişelere yol açmaktadır. Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte, çevre dostu ve verimli pil teknolojilerinin geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Şekil 1.10'da genel pil yapısı gösterilmiştir.

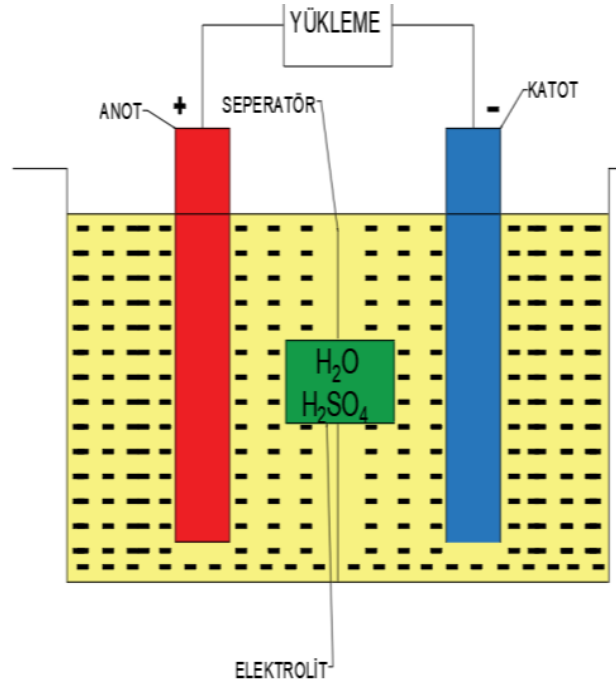


Şekil 1.10. Pilin Yapısı (Efe ve Güngör, 2021).

1.12.1 Kurşun-Asit (Pb-Asit) piller

Şekil 1.11'de şeması yer alan kurşun asit piller de kullanıma sunulan ilk pil çeşidi olarak kabul görmektedir. İlk olarak 1859 yılında Fransız fizikçi Gaston Plante tarafından kurşun asit pil icat edilmiştir (URL-14). Kurşun-asit piller, negatif & pozitif

elektrot ve elektrolit içerir; bu elektrotlar sırasıyla kurşun dioksit (PbO_2), kurşun (Pb) ve sülfürik asit çözeltisi (H_2SO_4) olarak bilinir. Kurşun-asit piller genellikle düşük maliyetlidir (300-600\$/kWh aralığında), kolay üretimi, basit bakım gereksinimlerine sahiptir. Verimli bir geri dönüşüm süreci ile %97'sinden fazlası geri dönüştürülebilir (Reddy, 2011). Ayrıca, çeşitli boyutlarda ve tasarımlarda mevcut olmaları, geniş bir sıcaklık aralığında etkili bir şekilde çalışabilme yetenekleri de dikkat çekicidir (Lach vd., 2019). Ağırlığın kritik bir faktör olmadığı daha büyük güç gerektiren uygulamalarda, en ekonomik seçenek kurşun asit akülerdir. Bu aküler, hastane ekipmanları, tekerlekli sandalyeler, acil durum aydınlatma sistemleri ve kesintisiz güç kaynakları (UPS) gibi çeşitli alanlarda tercih edilmektedir. Bu pillerin dezavantajları arasında sınırlı enerji yoğunluğu, göreceli olarak düşük çevrim ömrü, uzun şarj süresi, çevre ile uyumsuzluğu, yüksek kütlesi, termal dengesizliği ve kalıcı kapasite kaybı yer almaktadır. Depolama esnasında kendi kendine deşarj hızları oldukça yüksektir. Aşırı şarj işlemi elektrotların telafisiz polarizasyona ve deşarj esnasında uzun süreli depolamada sülfat üretimine neden olmaktadır (Nazghelichi vd., 2021). Kurşun (Pb) toprak ve su kaynaklarına sızdığında toksik etkiler yaratmaktadır. Sülfürik Asit (H_2SO_4) ise toprak ve su kaynaklarını kirletmekte, asidifikasyona yol açmakta ve ekosistemlerin dengesini bozmaktadır. Bu pillerin sınırlamalarından bir diğeri, yüksek kurşun ağırlıklarından dolayı düşük C-oranlarıdır. Pilin şarj ve deşarj oranı C-oranıyla ifade edilmektedir. Bir pilin kapasitesi genellikle 1C olarak derecelendirilir; bu, tam olarak şarj edilmiş bir 1Ah pilin bir saat boyunca bir amp güç sağlaması gerektiği anlamına gelmektedir. Aynı pilin 0,5C debisiyle iki saat boyunca 500 mA, 2C ile yarım saat boyunca 2 amper elektrik verebilmesi gerekir. Ancak, çoğu pil, daha yüksek şarj oranlarında kapasitesini kaybetmektedir. Bir çalışmada, elektrokimyasal elektrokaplama yöntemiyle üretilen kurşun ve kurşun oksit nanoçubuklar, C-hızını 10°C 'ye çıkararak ve boşaltma kapasitesini 1000 döngüye çıkararak bu oranı artırmak için elektrot olarak kullanılmıştır. Benzer şekilde, bir başka çalışmada, anot katkı maddesi olarak karbon siyahı kullanılarak pil kapasitesi ve döngü sayısı artırıldı. Aktif karbon ve karbon nanotüplerin eklenmesi, kurşun-asit akülerin aktivitesini geliştirebilir (Hsu vd., 2024).



Şekil 1.11. Kurşun-asit pil şeması (Efe ve Güngör, 2021).

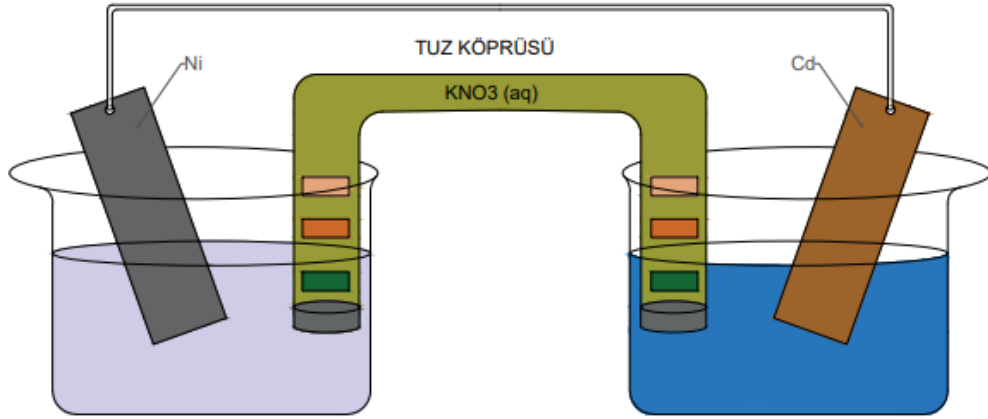
1.12.2 Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd) piller

Ni-Cd piller, 100 yılı aşkın geçmişe sahip olan bir diğer teknolojidir. Tipik olarak, nikel hidroksit pozitif elektrot, kadmiyum hidroksit negatif elektrot ve alkalın elektrolit içermektedirler. Ni-Cd pil sistemi ilk olarak 1899'da İsveçli Waldemar Jungner tarafından geliştirilmiş olup, üretimi 1950'lerde Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde başlamıştır (Bäuerlein vd., 2008). Ni-Cd piller, taşınabilir elektronik cihazlar, iki yönlü telsizler, biyomedikal ekipmanlar, profesyonel video kameralar ve elektrikli aletler, acil aydınlatma, telekomünikasyon sistemleri ve diğer endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.12'de şeması gösterilmektedir.

Avantajları arasında, geniş bir çalışma sıcaklığı olması, iyi şarj özellikleri ve kolay ve düşük bakım gereksinimleri, şarjı bekleme modunda tutmak için uygun özelliklere sahip olması yer almaktadır (Hsu vd., 2024).

Dezavantajları arasında ise, Ni-Cd piller, pahalı üretim sürecinden dolayı yüksek maliyetli olmaları yer almaktadır. Ek olarak toksik bir ağır element olan kadmiyum (Cd) içerirler, çevre dostu değildir ve batarya performansını etkileyen "hafıza etkisi" probleminin neden olmaktadır (Beaudin vd., 2015; Chen vd., 2009; Reddy, 2011).

Şarj edilebilir enerjinin kendiliğinden boşalması sebebiyle, pilin uzun süre kullanılsa bile yeniden şarj edilmesi gerekecektir (Hsu vd., 2024).



Şekil 1.12. Ni-Cd pil şeması (Efe ve Güngör, 2021).

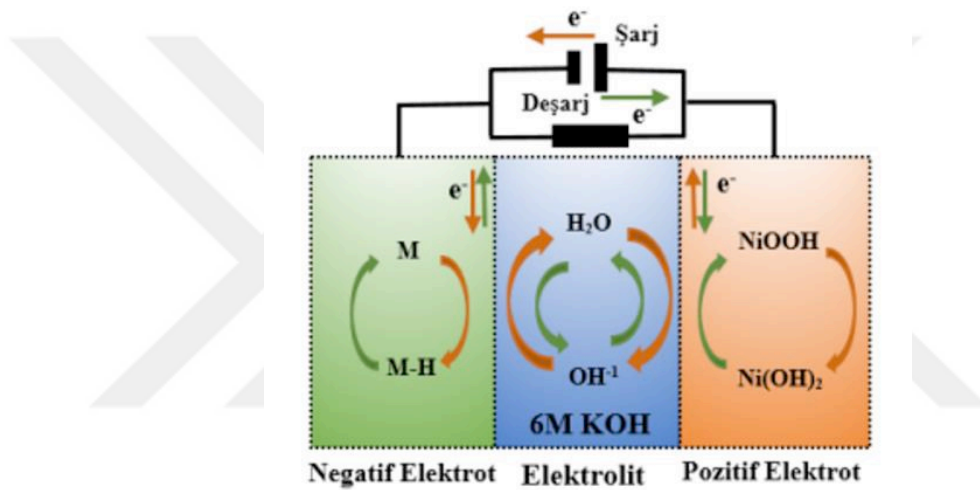
1.12.3 Nikel-Metal Hidrit (Ni-MH) piller

1989 yılında ilk olarak keşfedilen bu pil, nikel-kadmiyum pillerine çok benzeyen bir yapıya sahip olan ve şarj edilebilen bir pil türüdür. Bu pillerde pozitif elektrot nikel hidroksitinden, negatif elektrot ise hidrojen emici alaşımdan yapılmıştır. Nikel-kadmiyum pillerine kıyasla 2 ila 3 kat daha fazla kapasiteye sahip olan bu tip piller, enerji, yeniden şarj edilebilirlik ve daha düşük maliyet gibi özelliklerle dikkat çekmektedir. Pil tasarımcıları ve üreticileri, kadmiyum kullanımını azaltarak veya yeni malzemelerle değiştirerek bu avantajları daha da artırmak için yoğun araştırmalar yapmaktadır. Bu alternatif pillerden biri olan Ni-MH piller, hidrojen adsorban metal alaşımlarından yapılan anot veya negatif kutbu ve nikel oksitten yapılan katot veya pozitif kutbu içerir. Şekil 1.13'de şeması gösterilmektedir. Ayrıca, bu pillerde kullanılan elektrolit potasyum hidroksittir. Ni-MH pillerinin enerji depolama kapasitesi ve kullanım ömrü, aynı boyuttaki nikel-kadmiyum pillerine kıyasla yaklaşık %40 daha fazladır ve kullanışlı ömür boyu 600 şarj tüketim süresine ulaşabilir. Bu özellikler, Ni-MH pillerini yüksek güç gerektiren uygulamalar için ideal hale getirirken, fiyatları nispeten yüksek olabilir ve kendiliğinden boşalma oranı da dikkate değerdir.

Avantajları arasında benzer nikel-kadmiyum türlerine göre yaklaşık %30 ila %40 daha fazla enerji depolama kapasitesi sağlaması, şarj etme ve kullanım (deşarj) arasındaki

süreler açısından daha kolay saklama koşullarına sahip olması, kadmiyum gibi toksik bir kimyasal içermemesi ve taşınması ve bakımının kolay olması yer almaktadır (Hsu vd., 2024).

Dezavantajları arasında ise hizmet ömrünün kısa olması, karmaşık bir algoritma gerektirmesi, kristal oluşumunu (sülfasyon) önlemek için dikkatli şekilde muhafaza edilmesi, işlenmesi, şarj edilmesi ve tüketilmesi yer almaktadır. Bunlara ek olarak, Nikel-metal hidrit pillerin kendi kendine boşalması (kullanmadan ve bekleme esnasında), nikel-kadmiyum pillere kıyasla %50 daha fazladır ve diğer nikel-kadmiyum türlerine göre yaklaşık %20 daha pahalıdır (Hsu vd., 2024).



Şekil 1.13. Ni-MH pil şeması (Küçükdeveci, 2018).

1.12.4 Zebra piller (zero emission battery research activity)

80'li yıllarda geliştirilen Zebra pilleri, anot için sıvı sodyum ve katot için nikel klorürü (NaCl₂) kullanan bir pil teknolojisidir. Bu piller, "Sıfır Emisyon Batarya Araştırma Faaliyeti" (Zero Emission Battery Research Activity) projesinden türetilen Zebra ismiyle anılır. Zebra pillerinin elektroliti, sıvı sodyumu çevreleyen bir seramik elektrolit ile katot için sodyum klorür ve alüminyumdan oluşan ikincil bir elektrolitten oluşur. Bu piller, deşarj sırasında elde edilen elektrik enerjisini, sodyumun ürün olarak ortaya çıkan nikel klorür, nikel ve sodyum klorür ile birleştirilmesinden sağlar. Zebra pilleri, kurşun asit ve nikel tabanlı pillere kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu ve nominal voltaj değerine sahiptir. Nominal voltaj değeri 2,6V olan Zebra pillerinin ağırlıksal enerji yoğunluğu 90-120 Wh kg⁻¹ ve özgül gücü 155 W kg⁻¹'dir. Bu

özellikleri, Zebra pillerini enerji depolama alanında etkili bir çözüm haline getirirken, yüksek voltaj ve enerji yoğunluğu, uygulama alanlarını genişletmekte ve daha verimli bir enerji depolama çözümü sunmaktadır (Özcan vd., 2021).

Zebra pillerinin dezavantajları, düşük özgül güç, kendi kendine deşarj problemi ve sıcaklık yönetimi gereksinimidir. Ayrıca, bu tür pilleri üreten tek bir şirket olması ve teknolojinin sınırlı bir tedarikçiye bağlı olması da bir dezavantajdır. Zebra pillerinin ana özelliği, yüksek sıcaklıkta (300-350°C') çalışabilmesidir ve bu da pilin termal yönetimiyle entegredir. Ancak, yüksek sıcaklıkta muhafaza edilmezse, 24 saat içinde yaklaşık %10 değerinde pilin kendi kendine deşarj oranı artar. Bu nedenle, bu piller özellikle filo uygulamalarında, uzun bekleme süreleri olmadan kullanılan araçlar için daha uygun olabilir. Zebra pilleri, hibrit elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji depolama ve endüstriyel uygulamalar için farklı versiyonlarda geliştirilmektedir. Örneğin, Beta R&D yüksek güçlü, yüksek enerjili ve yük dengeleme pilleri gibi çeşitli ZEBRA akülerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır (Özcan vd., 2021).

1.12.5 Sodyum-Kükürt (Na-S) piller

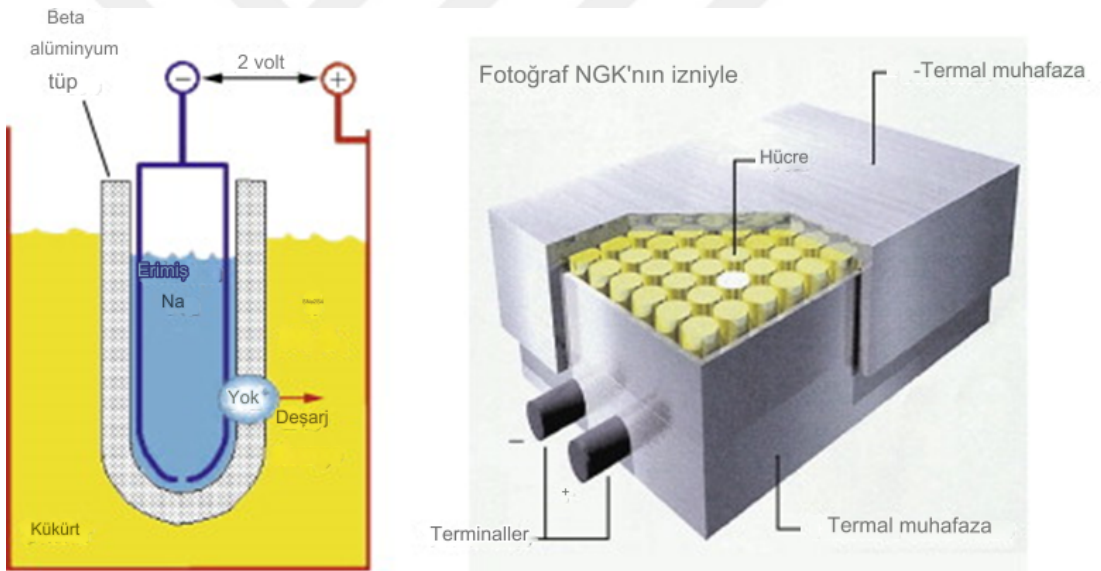
Ford Motor Company'nin 1960'larda öncülük ettiği araştırmalar, Tokyo Electric Power Company ve NGK Insulators'ın katkılarıyla ticarileşerek daha geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Sodyum-kükürt pili, başlangıçta elektrikli araçlar için otomotiv uygulamalarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Ancak, bu alandaki bazı deneysel başarısızlıkların kötü bir şekilde sonuçlandığı bildirilmiş ve bu nedenle bu uygulamaya yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları büyük ölçüde durdurulmuştur.

Sodyum kükürt pili, 300°C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan ve katı bir elektrolit kullanan bir pil türüdür, bu da onu diğer yaygın ikincil hücrelerden ayırmaktadır. Bu pilde, elektrotlardan biri erimiş sodyum, diğeri ise erimiş kükürttür ve pilin çalışması, bu iki madde arasındaki kimyasal reaksiyona dayanmaktadır. Reaktanlar arasında özellikle sodyum, patlayıcı özellikler gösterebilse de modern sodyum sülfür hücreleri genellikle yüksek güvenilirliktedir. Ancak, 2012 yılında Japonya'daki bir sodyum sülfür pil tesisinde çıkan yangın, bu tür pillerin potansiyel risklerini gözler önüne sermiştir. Bu tür yüksek sıcaklıklı pillerin verimli çalışabilmesi için sodyum ve kükürtün geçirimsiz bir elektrolit ile ayrılması gerekmektedir. Bu görevi, eriyik oluşumunu önleyen ve sodyum iyonlarının kükürt elektroduna geçişine izin verirken

sodyumun kendisinin geçişini engelleyen katı bir beta alümina elektrolit üstlenmektedir. Bu tasarım, pilin güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar, ancak yine de yüksek çalışma sıcaklıkları ve potansiyel patlayıcı reaktanlar gibi zorlukları vardır (Breeze, 2018). Şekil 1.14'de şeması gösterilmektedir.

NaS pilinde, pozitif elektrot sıvı (erimiş) kükürt, negatif elektrot ise sıvı (erimiş) sodyum içermektedir. Bu iki elektrot, katı beta alümina seramik elektrolit ile ayrılmıştır. Bu elektrolit, sadece pozitif yüklü sodyum iyonlarının geçişine izin verir ve bu iyonlar kükürt ile reaksiyona girerek sodyum polisülfidler oluşturmaktadır ($2 \text{ Na} + 4 \text{ S} \leftrightarrow \text{Na}_2\text{S}_4$). Deşarj işlemi sırasında, pozitif yüklü sodyum iyonları elektrolit boyunca hareket etmekte ve dış devrede elektronların akışıyla yaklaşık 2,0 V gerilim üretmektedir. Şarj işlemi ise bu sürecin tersidir; sodyum polisülfidler, pozitif sodyum iyonlarına dönüşerek elektrolit aracılığıyla tekrar elementel sodyuma dönüşmektedir. Bu, pilin tekrar şarj edilebilmesini sağlamaktadır (Chen vd., 2009). NaS pillerinin tipik çevrim ömrü yaklaşık 2500 çevrimdir ve enerji ile güç yoğunlukları genellikle 150-240 W/kg arasında değişmektedir. Bu piller, yüksek bir verimliliğe (%75-90) sahiptir ve darbe gücü kapasitesi, sürekli güç değerlerinin altı katından fazladır (30 saniye boyunca). Bu özellik, NaS pillerinin birleşik güç kalitesi ve zirve tıraşlama gibi uygulamalarda ekonomik olarak kullanılmasını sağlamaktadır. NaS batarya teknolojisi, Japonya'daki birçok tesis gibi büyük ölçekli enerji depolama projelerinde başarıyla kullanılmıştır. Örneğin, Tokyo Electric Power Company'deki 6 MW/8 saatlik ünite ve 8 MW/7,25 saatlik ünite gibi projelerde, 8 saatlik günlük pik tıraşlama ihtiyacını karşılamak için toplamda 20 MW'tan fazla güce sahip tesislerde gösterilmiştir. Bu başarılar, NaS pillerinin enerji depolama sektöründe gelecekte daha yaygın olarak kullanılmasını teşvik etmektedir. Örneğin, Amerika'da, American Electric Powers gibi büyük enerji şirketleri, Ohio'da 1,2 MW'a kadar kapasiteye sahip NaS sistemlerinin ilk gösterimlerini başlatmıştır. Bu gelişmeler, NaS pillerinin potansiyelini değerlendiren ve yeni pazarlarda kullanımını araştıran bir sürecin başlangıcı olarak görülebilir (Chen vd., 2009).

NaS pillerinin avantajları arasında yüksek enerji yoğunluğu (150-240 Wh/kg), %89'a kadar hücre DC verimliliği, 15 yıla kadar kullanım ömrü yer almaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu sayesinde NaS bataryaları, Kesintisiz Güç Kaynağı (UPS) uygulamalarında



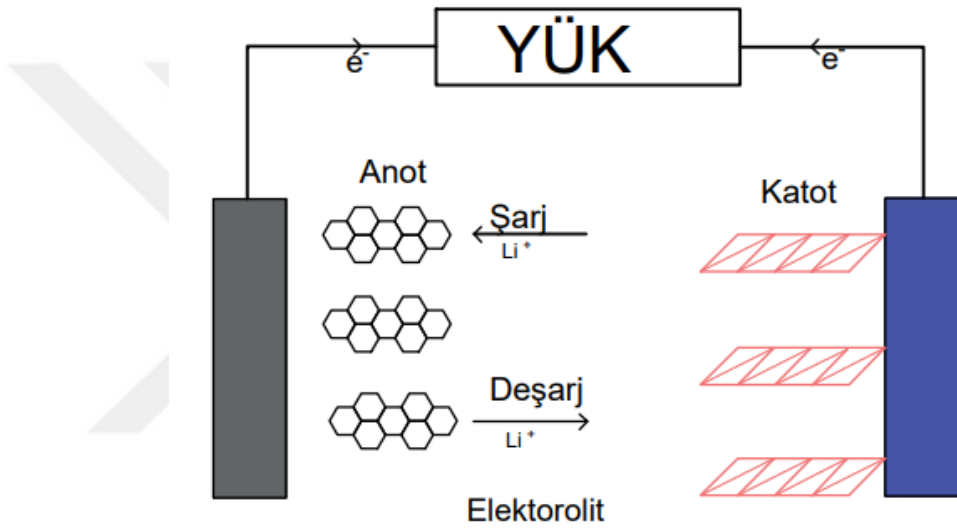
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99

gelişmeleri sayesinde, enerji yoğunluğuna (75'ten 200 Wh/kg'a çıkarıldı) ve çevrim ömrüne (10.000 çevrime kadar çıkarıldı) katkı sağlanmıştır (Chen vd., 2009). Lityum-iyon pillerin avantajları arasında yüksek enerji yoğunlukları, kolay bakımları, hafıza etkilerinin olmaması, hafif olmaları, 60°'ye kadar yüksek sıcaklıkları tolere etmeleri, yeni nesil işlemcilere uygun voltaj aralığına sahip olmaları yer almaktadır. Dezavantajları arasında ise, voltajın normal aralığın dışına çıkması durumunda pil kapasitesinin ciddi şekilde etkilenmesi, iç direnci nikel pillere göre daha yüksek olması, kısa devre durumunda pilin ısınması ve patlaması gibi güvenlik sorunlarına sahip olması, elektrikli araçlar için düşük servis ömrünün olması, diğer pillere kıyasla daha pahalı olması yer almaktadır (Hsu vd., 2024).

Ek olarak lityum madenciliği çevresel ekosistemlere zarar verir ve yerli toplulukların haklarını ihlal edebilir. Bu nedenle, Bolivya, Şili ve Arjantin gibi ülkelerde lityum projeleri hakkında yasal işlemler başlatılmıştır. Bu durum, sürdürülebilir lityum madenciliğine yönelik bir olumsuz güç oluşturmuştur. Lityumun büyük bir kısmı Latin Amerika'da üretilirken, bu ülkeler bitmiş ürünleri daha yüksek fiyatlarla ithal ederken, lityumu düşük maliyetlerle ihraç etmektedir. Bu durum, ticaret dengesizliklerine neden olmaktadır. Kobalt üretimi, özellikle Demokratik Kongo Cumhuriyeti'nde yoğunlaşmıştır. Ancak, bu ülkede yaşanan ekonomik huzursuzluk ve insan hakları ihlalleri, pil teknolojisinin arz ve talep dengesini olumsuz etkilemektedir. Rusya, nikel üretiminde önde gelen ülkelerden biridir. Ancak, Rusya-Ukrayna savaşı nedeniyle nikel fiyatları artmış ve bu, batarya ekosisteminin önündeki büyük engellerden biri haline gelmiştir (URL-15).

Katot, anot ve elektrolit için kullanılan malzemelere bağlı olarak performans ve maliyet açısından farklılık gösteren çeşitli Li-iyon kimyaları bulunmaktadır. Belirli bir Li-iyon kimyasını seçerken göz önünde bulundurulması gereken altı temel faktör; nominal voltaj, kapasite (özellik enerji ve özellik güç dahil), kullanım ömrü veya çevrim ömrü, şarj ve deşarj oranları, maliyet ve güvenlik ile çevresel etkilerdir. Bu faktörler arasındaki denge sabit değildir ve her uygulamanın farklı öncelikleri olabilir. Sürekli gelişen teknoloji ve yeni kimyasal bileşimler, tasarımcılara daha fazla esneklik ve yeni seçenekler sunarak bu dengeleri daha etkili bir şekilde yönetme imkânı tanımaktadır (Shepard, 2022).

Ülkemizde silindirik lityum iyon piller Türk Silahlı Kuvvetlerini Güçlendirme Vakfı'nın bir kuruluşu olan ASPİLSAN Enerji tarafından üretilmektedir (URL 16). Ayrıca, tezimde kullanılan bazı bilgiler, Pomega Enerji Depolama Teknolojileri'nden kıdemli planlama ve tedarik zinciri mühendisi Sertaç Yaşar ile yapılan kişisel bir görüşmeye dayanmaktadır. Bu görüşme sonucunda elde edilen bilgilere göre, şirket başarılı bir şekilde Lityum-İyon (LiFePO_4) Pil Hücresi ve Enerji Depolama Sistemleri yatırımını tamamlamıştır. Yatırım, Polatlı, Ankara'daki tesislerinde gerçekleştirilmiş olup, 2023 yılının ikinci yarısında 500 MWh kapasite ile faaliyete geçmiştir (Yaşar, 2024).



Şekil 1.15. Lityum İyon pil (Efe ve Güngör, 2021).

1.13 Yeni nesil pil teknolojileri

Pil teknolojileri otomotiv, yenilenebilir enerji ve elektronik dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde kritik bir rol oynamaktadır. Daha verimli, daha uzun ömürlü ve çevre dostu pil çözümlerine olan talep, bu alanda önemli araştırma ve geliştirmelere yol açmıştır. Malzeme sentezi ve karakterizasyonunun yanı sıra hesaplamalı modellemede devam eden iyileştirmeler, pil teknolojisi araştırmalarındaki ilerlemeyi hızlandırmıştır. Yeni nesil pil teknolojilerinin keşfi, enerji depolamada, taşınabilir güç, şebeke ölçeğinde depolamaya ve elektrikli mobiliteye dayalı çeşitli endüstrilerde ve sektörlerde devrim yaratmaya hazır, dönüştürücü bir aşamanın habercisidir. Odaklanılan alanlardan biri yeni pil kimyalarının geliştirilmesi olmuştur. Bu yeni pil kimyaları, lityum iyon piller gibi mevcut teknolojilerin sınırlı enerji yoğunluğu, uzun

şarj süreleri ve güvenlik kaygıları dahil sınırlamalarını ele almayı amaçlamaktadır (Zeng vd., 2019).

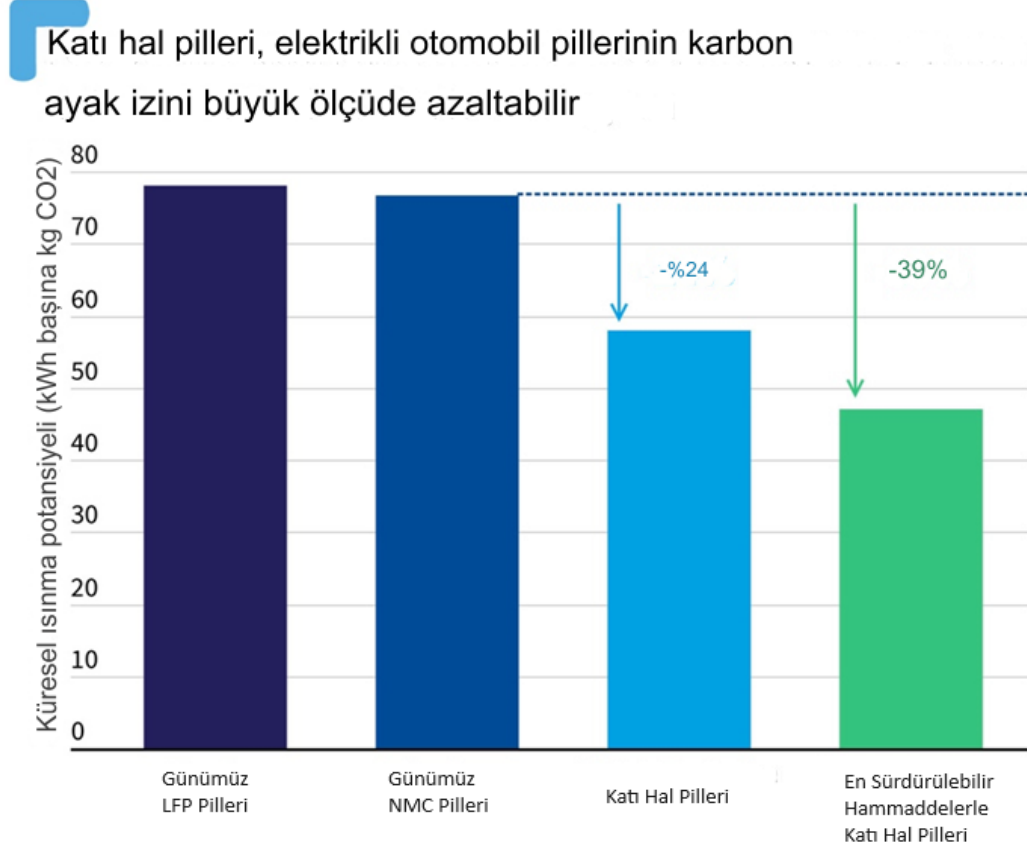
1.13.1 Katı hal piller

Michael Faraday katı hal iyoniklerinin temelini oluşturan katı elektrolitler gümüş sülfid ve kurşun (II) florürü 1831 ile 1834 arasında keşfetmiştir. Katı elektrolitler ilk olarak 19. Yüzyılda keşfedilmiştir. Daha sonra özellikle 20. yüzyılın sonlarından ve 2010'ların başında, özellikle elektrikli araçlar bağlamında, katı hal pil teknolojilerine olan ilgi yeniden artmıştır. Bu pillerde, geleneksel pillerde bulunan sıvı veya jel elektrolitler yerine katı elektrolitleri kullanılmaktadır. Maalesef sıvı elektrolitte bulunan bazı bileşikler, dendritler olarak bilinen kristal yapıların büyümesine izin vermektedir. Dendritler, ayırıcıyı delebilecek ve kısa devreye sebep olabilecek, bundan dolayı tehlikeli patlamalara yol açabilecek uzun, keskin yapılar üretir. Adından da anlaşılacağı gibi, katı hal piller, bu zararlı dendritlerin büyümesini engelleyen katı bir elektrolite sahiptir (URL-17; URL-18).

Katı hal pillerinin sıvı elektrolit pillere göre avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Daha yüksek enerji yoğunluğu: Sıvı elektrolit hücrelere nazaran daha yüksek enerji yoğunluğu sunmaktadır. Enerji depolama kapasitesinin artmasına imkan sağlamaktadır.
- Artırılmış güvenlik: Yanıcı sıvı elektrolit içermemesi nedeniyle sıvı elektrolit hücrelere göre daha güvenli olduğu kabul edilmektedir. Bu teknoloji, sızıntı ve yanıcılık riskini azaltmaktadır.
- Sıvı elektrolit yokluğu: Katı hal pillerdeki sıvı elektrolitlerin ortadan kaldırılması, elektrolit sızıntısı ve toksisite riskini azaltmaktadır. Böylece çevresel iyileşmeye katkıda bulunmaktadır.
- Daha düşük üretim maliyeti: Bu piller sıvı elektrolit hücrelere kıyasla üretim maliyetlerini düşürme potansiyeline sahiptir. Bu da onları daha uygun maliyetli bir enerji depolama çözümü haline getirmektedir.

- Mükemmel raf ömrü: Katı hal pillerin raf ömrü, sıvı elektrolit hücrelere kıyasla daha uzundur. Diğer bir deyişle daha uzun ömürlü enerji depolama çözümleri sunmaktadırlar (Itani ve De Bernardinis, 2023).

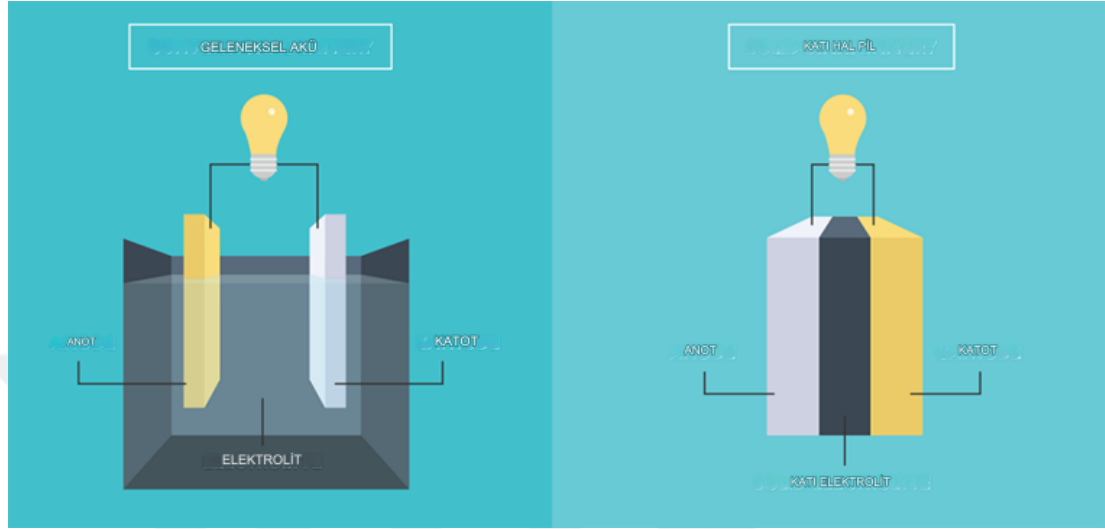


Şekil 1.16. Pillerin CO₂ ayak izi (Minviro, 2022; URL-19).

Katı hal piller, lityum iyon pillere kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu, daha uzun ömür ve gelişmiş güvenlik (yangın riski az) ve Şekil 1.16'da yer aldığı gibi azaltılmış karbon ayak izi vaat etmektedir. Bu pillerin tahminen öncelikli olarak elektrikli araçlar için, daha sonra da enerji depolama sistemleri ve akıllı telefonlar, dizüstü bilgisayarlar ve tabletler gibi elektronik cihazlar için piyasaya sürüleceği tahmin edilmektedir (URL-20). Şekil 1.17'de geleneksel pil ile katı hal pilleri arasındaki farkın şeması gösterilmektedir.

Örneğin Toyota tarafından, 2027 ya da 2028 yılına kadar katı hal pillerinin seri üretime geçirilmesi planlanmaktadır. Eğer bu üretimde başarılı bir yol kat edebilirlerse, katı hal pilleriyle çalışan elektrikli otomobillerin menzillerinin 1.200 kilometreye çıkacağı ve şarj süresinin 10 dakika ya da daha az bir süreye çekileceği ön görülmektedir. Fakat

aynı zamanda geleneksel pil teknolojilerine göre çok daha yüksek maliyete sahip olmasının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Goldman Sachs, gelecek 10 yıl içinde bu pillerin ölçeklendirmesinin zorlu bir yolculuk olacağını düşünmektedir (URL-21).



Şekil 1.17. Geleneksel pil ile geleceğin katı pili arasındaki fark (URL-17).

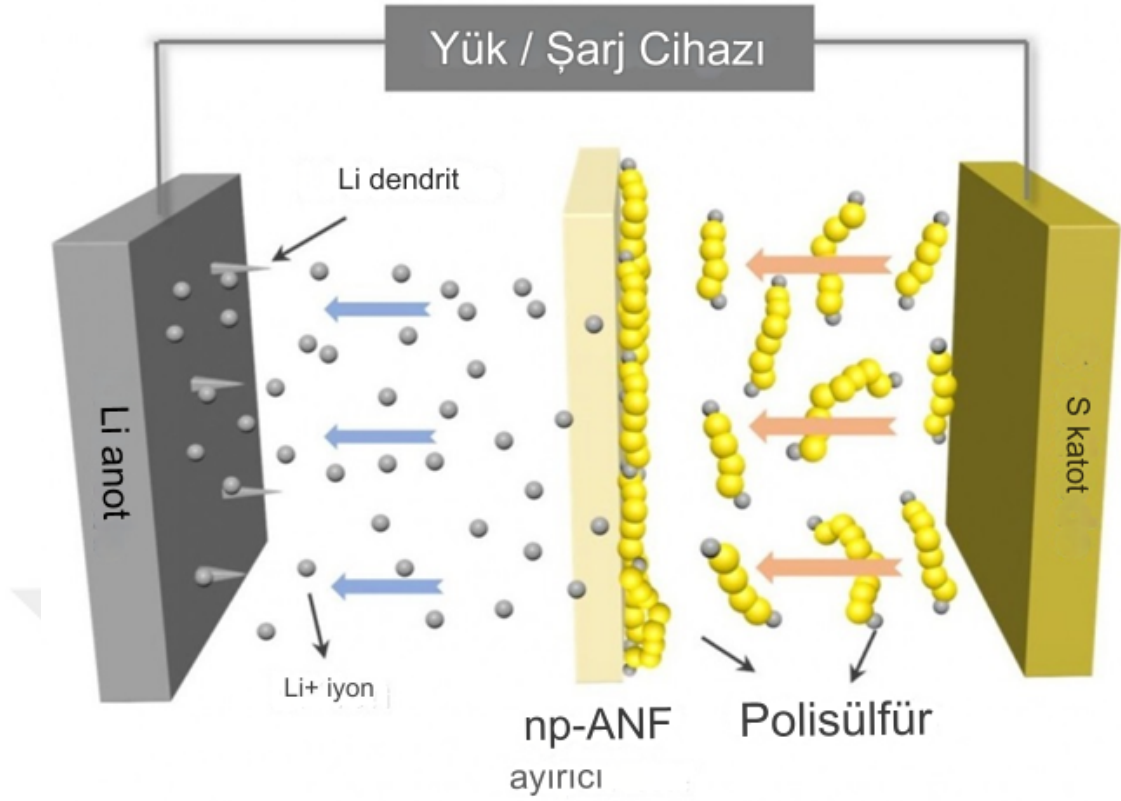
1.13.2 Lityum sülfür (kükürt) (li-s) piller

Li-S pilleri, 1960'larda Herbert ve Ullmann'ın anodik malzeme olarak lityum veya lityum alaşımları, katodik malzeme olarak kükürt ve alifatik doymuş aminlerden oluşan bir elektrolit kullanan birincil pilin patentini aldığı dönemde icat edilmiştir. Birkaç yıl sonra teknoloji, PC, DMSO (Dimetil Sülfoksit) ve DMF (Dimetil Formamid) gibi organik çözücülerin, piyasaya sürülmesiyle geliştirilerek 2.35-2.5 V'luk bir pil üretmeyi başarmıştır. 1980'lerin sonunda şarj edilebilir bir Li-S pili sunulmuştur. 2020'de Manthiram tarafından, ticari kabulün sağlanması amacıyla gereken kritik parametreler belirlenmiştir. Özellikle, Li-S pillerin şu özelliklere sahip olması gerekmektedir: sülfür yüklemesi $>5 \text{ mg cm}^{-2}$, karbon içeriği $<5\%$, elektrolit-sülfür oranı $<5 \text{ } \mu\text{L mg}^{-1}$, elektrolit-kapasite oranı $<5 \text{ } \mu\text{L (mA h)}^{-1}$, ve negatiften pozitif keke tipi hücrelerde kapasite oranı <5 . Lityum-sülfür piller (LiSB'ler), lityum metalini anot, sülfür kompozitini katot ve organik sıvıyı elektrolit olarak kullanmaktadır ve lityum iyon pillere kıyasla daha yüksek teorik enerji yoğunluğu sunmaktadır. Bu piller, yüksek teorik gravimetrik kapasite (1675 mAh g^{-1}) ve yüksek teorik özgül enerji

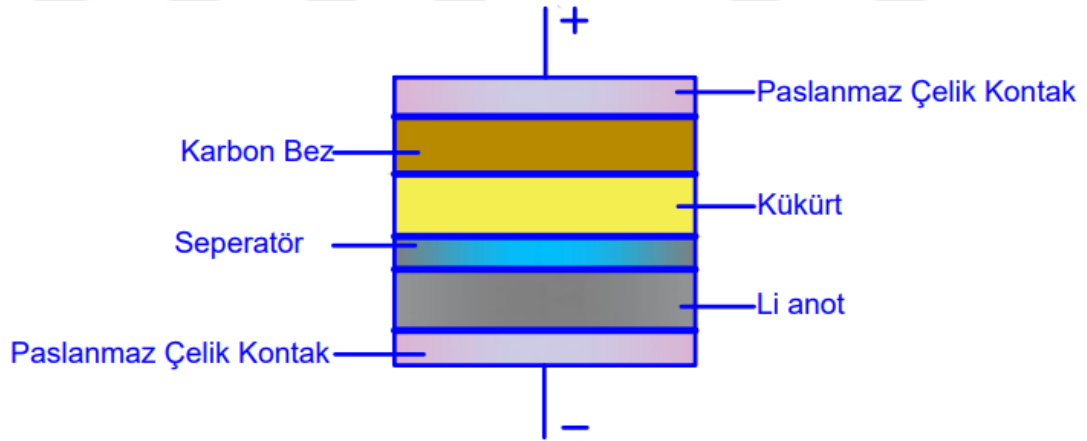
(2600 Wh·kg⁻¹) sergilemektedir (Manthiram vd., 2020). Şekil 1.18 ve şekil 1.19`de şeması gösterilmektedir.

Avantajları arasında kükürt kolaylıkla bulunabildiği için katot malzemesi olarak kullanılmasının düşük maliyetli olması, daha sürdürülebilir ve çevre dostu olması, lityum iyon pillere göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması yer almaktadır. Dezavantajları arasında ise lityum iyon pillere kıyasla düşük çevrim ömrü, kükürtün elektrik iletkenliğinin düşük olması, pil güvenliği araştırmalarının hala devam ediyor olması, kükürt katotlarının stabilitesi, elektrolit uyumluluğu ve piin genel performansla ilgili teknik zorluklara sahip olması yer almaktadır (URL-22).

Bu piller, yüksek enerji depolama kapasitesine sahip olmaları nedeniyle tamamen şarj edildiğinde elektrotların fiziksel boyutlarının iki katına kadar büyüdüğü gözlenmiştir. Ancak, büyüme ve küçülme sürecinde partikül kaybı ve karbon taban ile polimer yapıştırıcıda kalıcı hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarlar, pilin hızla verimliliğini kaybetmesine ve kullanılamaz hale gelmesine yol açmaktadır. Bu tür problemlerden dolayı şimdiye kadar Lityum sülfür pillerin kullanımı yaygın olamamıştır. Daha sonra araştırmacılar, polimer bağlayıcıyı farklı bir işlemle üreterek, partiküllere nefes alma imkanı sağlayan bir yapı oluşturmuştur. Sonuç olarak ortaya çıkan örümcek ağı benzeri yapı, partikülleri bir arada tutacak kadar sağlam olmasının yanı sıra genişlediklerinde baskı oluşturmalarını engelleyecek kadar boşluk sahibi olmuştur. Çalışmalar devam ederken, bu yeni teknolojinin ilk olarak endüstriyel düzeyde enerji santralleri ve elektrikli araçlarda kullanılması beklenmektedir. Küçük cihazlarda kullanımı için henüz oldukça erken olduğu düşünülmektedir. İlk üretimin, lityum madenciliğinde lider ülkelerden biri olan Avustralya'da gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Yeni tasarımın ticari olarak kullanıma hazır hale gelmesi için tahmini süre 2 ila 4 yıl arasındadır (URL-23).



Şekil 1.18. Lityum Sülfür pil şeması (URL-24).



Şekil 1.19. Lityum Sülfür pil şeması (Efe ve Güngör, 2021).

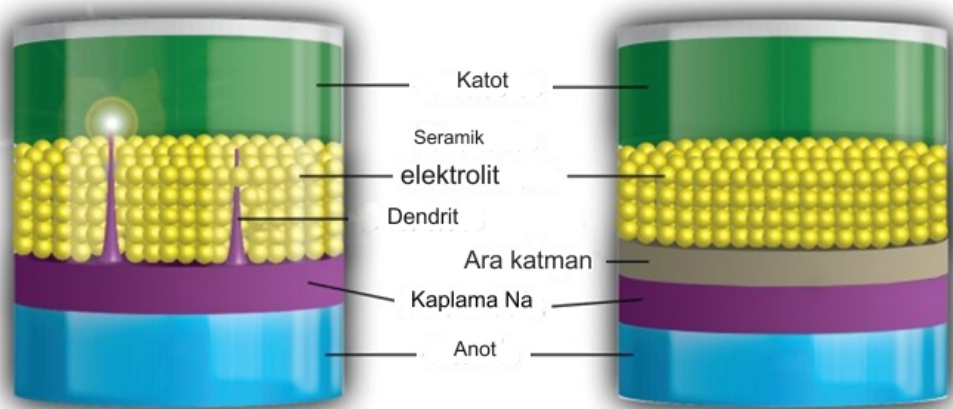
1.13.3 Sodyum iyon piller

Sodyum iyon piller 1970'ler ve 1980'lerin başında gelişmeye başlamıştır. 1990'lara gelindiğinde, lityum iyon piller, sodyum iyon pillere olan ilginin azalmasına neden olabilecek bazı ticari vaatlerde bulunmuştur. 2010'ların başlarında ise lityum iyon pillerin hammaddelerinin artan maliyeti sebebiyle yeniden sodyum iyon piller

gündeme gelmiştir. Hücreler, içinde sodyum bulunan bir katot, bir anot ve polar protik veya aprotik çözücülerde ayrılmış sodyum tuzlarını içeren bir sıvı elektrolitten oluşmaktadır. Şarj edilme sırasında, elektronlar dış devre boyunca hareket ederken, sodyum iyonları katottan anoda doğru hareket etmektedir. Deşarj anında ise, bu işlem tersine dönmektedir. Şekil 1.20'de şeması gösterilmektedir. Sodyum iyon piller, enerji depolamak için lityum iyonları yerine sodyum iyonlarını kullanan ve şarj edilebilen bir pildir (URL-25).

Avantajları arasında sodyum bazlı hammaddenin bol miktarda bulunması ve düşük maliyeti, demir-mangan-nikel bazlı katot malzemeleri kullanılması, ternary katot malzemelere sahip lityum iyon pillerine göre daha ucuz olması, sodyum tuzlarının özelliklerinden dolayı daha düşük elektrolit konsantrasyonları kullanılabilmesi ve dolayısıyla yine maliyeti düşürmesi, sodyum iyon pillerinin aşırı deşarj özellikleri olmadığı için sıfır volta deşarj etmelerine izin vermesi yer almaktadır (URL-26).

Dezavantajları arasında ise tedarikinin henüz gelişmemiş olması nedeniyle lityum iyon pillerine kıyasla genellikle daha pahalı olması, ortalama enerji yoğunluğunun (90-150Wh/kg) lityum iyon pillerine (250-300Wh/kg) kıyasla daha düşük olması yer almaktadır. Yani, aynı enerji kapasitesi için daha yüksek bir ağırlığa ihtiyaç duyulacağı anlamına gelmektedir. Bu da bizlere, özellikle elektrikli araçlar gibi yüksek performans gerektiren uygulamalar için henüz uygun olmadığını göstermektedir. Ancak düşük hızlı araçlar veya belirli enerji depolama senaryolarında kullanılmaları mümkündür (URL-26).



Şekil 1.20. Sodyum iyon pil şeması (URL-27).

1.13.4 Metal İyon (Me-ion)-Metal Sülfür (Me-S)-Metal Hava (Me-Air) Pili

1960'ların ve 1970'lerin başında, metal/hava pilleri çeşitli uygulamalar için önemli bir odak noktasıydı ve üzerinde ciddi çalışmalar yapılmıştır. Ancak, bu dönemden sonra, hava elektrotundaki malzeme sorunları, termal yönetim zorlukları ve çeşitli anot seçeneklerinde yaşanan teknik sorunlar nedeniyle genel çaba önemli ölçüde azalmıştır. Son zamanlarda, yeni ve geliştirilmiş aday anotlarla birlikte hava katotlarının performansı ve kararlılığı konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir, bu da metal/hava pillerinin şu anda yeniden değerlendirilmesini uygun hale getirmiştir. Metal-hava piller anot olarak metali (Zn, Al, Li, Mg, Ca, vb.), katot olarak ise havadaki oksijeni kullanır. Bu piller, metalin havadan alınan oksijenle reaksiyona girerek elektrik enerjisi üretmesi prensibine dayanır. Metal, anot (negatif elektrot) olarak hareket ederken, havadan alınan oksijen katot (pozitif elektrot) olarak görev yapar. Metal-hava pilleri temel olarak elektrolitlerine göre iki tipe ayrılabilir. Birincisi, nemle duyarlı olmayan sulu elektrolit kullanan bir hücre sistemidir. İkincisi ise nemle kirlenen ve aprotik çözücüler içeren bir elektrolit kullanan suya duyarlı bir sistemdir. Örneğin, Cd, Al, Ca, Fe ve Zn gibi metaller sulu bir elektrolitik sistem için en doğru seçim olacaktır. Sonuç olarak, araştırmacılar metal-hava pilleri konusuna büyük ilgi göstermiştir, hala bu alanda devam eden çalışmalar da bulunmaktadır (Md Rahman vd., 2013).

Metal-hava (Me-air) pilleri, bir metal elektrot (örneğin, lityum veya çinko), bir elektrolit ve gaz difüzyon elektrodu (GDE) içerir ve aktif oksijen bileşenini çevredeki havadan veya oksijen tankından alır. Elektrik enerjisi, metal ve oksijen arasındaki kimyasal reaksiyondan elde edilir. Dolayısıyla, hücre kapasitesi genellikle kullanılan metal ile ilişkilidir. Şekil 1.21'de şeması gösterilmektedir. Li ve Zn gibi malzemeler, Me-hava pilleri için kritik öneme sahiptir ve Ar-Ge çalışmalarında öne çıkar. Li-metal, su ile reaktif olmasına rağmen, teorik olarak çok yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, bu nedenle Li-hava pilleri sulu olmayan elektrolit sistemleri için idealdir. Zn-hava pilleri ise Zn'nin diğer metallerle karşılaştırıldığında birçok avantajı olduğu için sulu elektrolit sistemleri için uygundur. Ayrıca, Ar-Ge, deniz suyu elektrolitine dayalı Me-hava pilleri gibi ileri seçenekleri de araştırmaktadır ve bu, deniz üstü rüzgâr

sistemleriyle entegre edilebilir. Ancak, hücrenin istikrarlı çalışması için tüm hücre tasarım spektrumunda çeşitli teknolojik zorluklar mevcuttur ve bunların hala aşılması gerekmektedir, bu da pillerin önemli dezavantajlarından biridir (Stephan vd., 2023).

Avantajları arasında yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, raf ömrünün uzun olması, daha ekonomik olması, metal şeridi değiştirilerek veya akım yönü tersine çevrilerek yeniden şarj edilebilir olması, toksik kimyasal ve ağır metal içermemeleri dolayısıyla çevre dostu olmaları yer almaktadır. Enerji yoğunluğunun önemli bir özellik olduğu elektrikli araçlarda ve şebeke ölçeğinde enerji depolama (sabit enerji depolama) sistemlerinde tercih edilebilir (Mohan Babu ve Bhanu, 2023). Bazı hava-metal hücreleri, işitme cihazları, saatler ve gizli dinleme ekipmanı gibi uygulamalarda da kullanılmaktadır (Hsu vd., 2024).

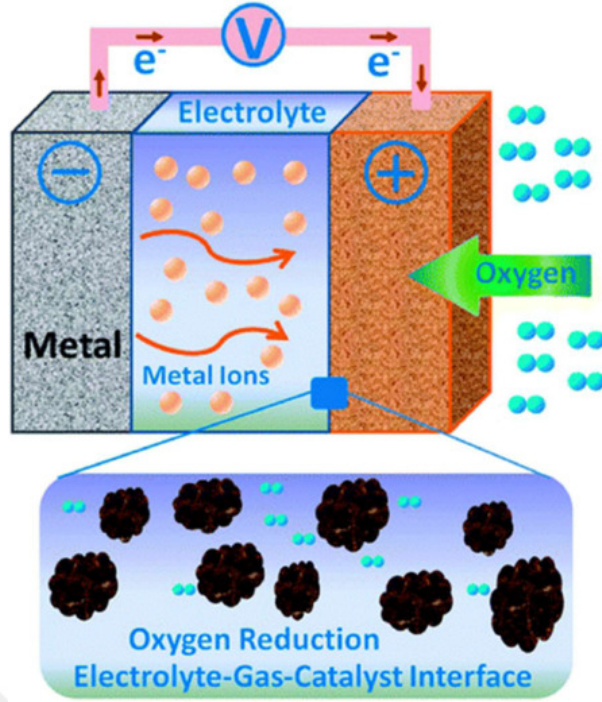
Dezavantajları arasında ise sınırlı çevrim ömrü, metallerin yüksek reaktivitesi nedeniyle güvenlik sorunları, katodun havaya erişim ihtiyacı, verimliliğini ve dayanıklılığını artırmak için metal anodun korozyonunu önlemek ve katodun havaya geçirgenliğini artırmak gibi problemler yer almaktadır (Mohan Babu ve Bhanu, 2023). Ancak, performanslarını iyileştirmek ve güvenlik endişelerini gidermek için araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Me-ion piller, boşaltma ve şarj sırasında iyonların negatif ve pozitif elektrotlar arasında gidip gelmesiyle elektrokimyasal enerji depolama sistemleridir. Genellikle belirli bir katot malzemesi ve bir anot malzemesinden oluşur, her biri tipik olarak bir metalik akım taşıyıcı folyoya yerleştirilmiştir. İki elektrot mikroporöz bir ayırıcı ile ayrılırken, iyon taşınması genellikle sıvı bir elektrolit tarafından sağlanır. Me-ion piller, birçok uygulamada kullanılan mevcut teknolojidir ve en iyi bilinen temsilcisi LIB'lerdir, ancak tek bilinen temsilci değildir. Diğer Me-ion piller, lityum yerine sodyum, alüminyum, çinko veya magnezyum gibi metaller kullanarak LIB'lerle aynı yolculuk prensibini izler. Farklı metaller kullanıldığında bir hücrenin inşa edilme şekli oldukça benzer olmasına rağmen, elde edilen pil sistemleri KPI'ları açısından farklılık gösterir ve dolayısıyla farklı belirli uygulamalarda kullanılabilir. Tamamen organik olan Me-iyon piller gibi diğer umut vaat eden yaklaşımlar olsa da, düşük elektronik iletkenlik ve organik elektrot malzemelerinin elektrolitte yüksek çözünürlüğü gibi zorluklar şu anda pratik uygulamalarını sınırlamaktadır. Bu nedenle, mevcut

teknolojilerin olgunluğu ve pratik uygulamalar için potansiyeli nedeniyle odaklanma bu Me-iyon pil teknolojileri üzerindedir (Stephan vd., 2023).

Me-S piller yüksek bulunabilirlik, düşük maliyet ve hafiflik gibi özelliklerinden dolayı yoğun araştırma ve geliştirme çalışmalarına konu olmaktadır. Genellikle metalik anotlar (erimiş veya katı halde) ve sıvı elektrolitler (oda sıcaklığında Me-sülfür pilleri) veya katı elektrolitler (yüksek sıcaklıkta Me-sülfür pilleri) kullanır. Sülfür, Li, Na, Mg ve diğer metallerle reaksiyona girerek metal-sülfür bileşikleri oluşturabilir, bu da onu umut verici, düşük maliyetli ve bol bulunan bir katot aktif malzeme haline getirir. Yüksek sıcaklık (HT) Me-S pillerinin yanı sıra, gelecekte oda sıcaklığında (RT) Me-S pillerinin de mümkün olabileceği düşünülebilir. Sülfürün düşük elektronik iletkenliği nedeniyle, malzeme oda sıcaklığı konseptlerinde işlevsellik gerektirir, örneğin, iletken bir karbon matrise gömülmesi gibi. Metalik Li veya Na anotlu pil hücreleri yüksek gravimetrik enerji yoğunlukları vaat eder, ancak bu tür sistemlerin kararlılığı ve güç performansı ciddi zorluklar doğurabilir. Gelecekte ticarileştirme için uygun hücre bileşenlerinin geliştirilmesi, elektrolitler, membranlar ve özel karbonlar gibi, bir ön koşuldur. Erime ve sodyum kullanarak yüksek sıcaklık konseptlerinin ticarileştirilmesine yönelik çalışmalar zaten başlamış olup, ancak harici ısıtma ve seramik bileşenler gerektirebilir (Stephan vd., 2023).

Me-S pillerin dezavantajları arasında pillerinde sülfürün metal-sülfürlere dönüşümü sırasında büyük hacim genişlemesi meydana gelmesi sebebiyle hücrelerin düşük döngü ömrüne sahip olma olasılığı, anot ve katot arasındaki katı elektrolit ara yüzeylerinde ve "şarj transferi"(polisülfidlerin çözünürlüğünden kaynaklanan hücrelerin kendiliğinden deşarj olması ve aktif malzemelerin kaybı) olarak adlandırılan diğer zorlukların Me-S pillerinin istikrarını etkileme olasılığı, alkali metallerin (örneğin, Li, Na, K) yüksek reaktivitesi nedeniyle anot yüzeyinde dendrit oluşması sonucu hücre performansı ve güvenliğini olumsuz etkilemesi, HT Me-S pilleri, sıcaklık gereksinimlerini karşılamak için erimiş sodyum ve katı seramik elektrolitler kullanması sonucu, hücrelerin işletme maliyetini arttırması ve e uygulama alanını sınırlaması yer almaktadır (Stephan vd., 2023).



Şekil 1.21. Metal hava pili (Hsu vd., 2024).

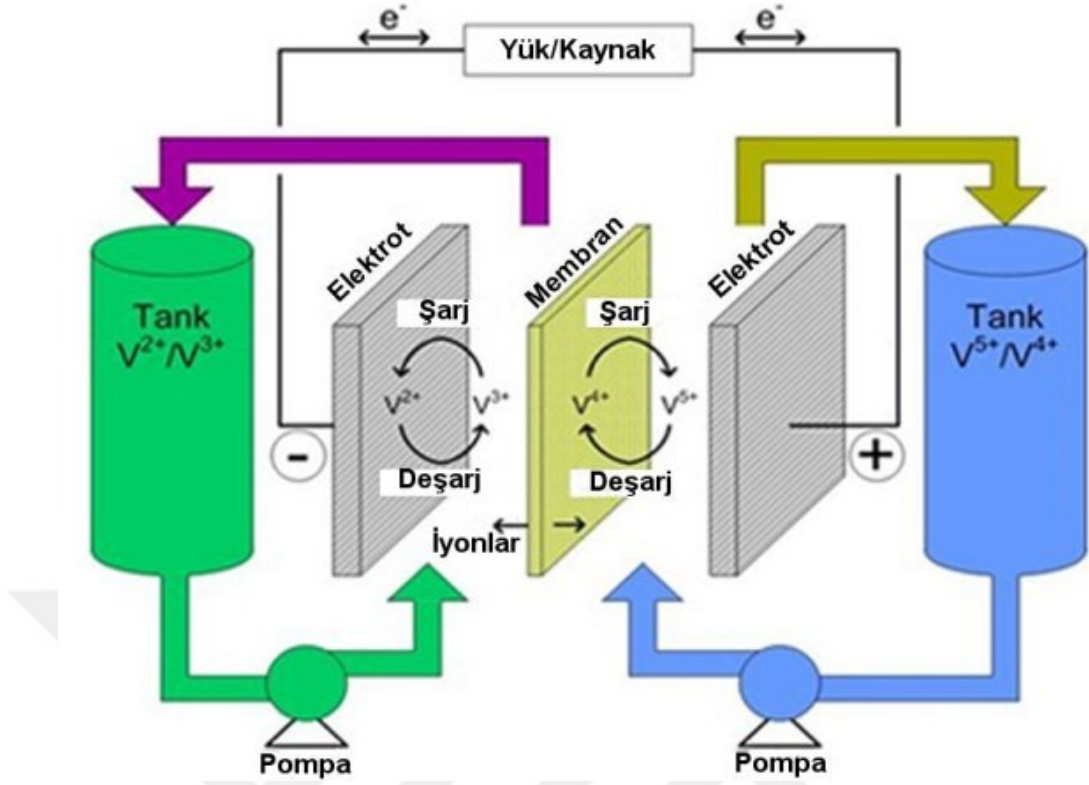
Çizelge 1.3. Pil teknolojisinin gelişiminin tahmini (Itani ve De Bernardinis, 2023).

Pil Üretimi	Teknoloji/Elektrot Aktif Malzemeleri	Hücre Kimyası/Türü	Uygulama Tarihi/Tahmini Pazar Dağıtımı
1. Nesil	Katot: NFP, NCA, LCO Anot: Karbon/Grafit	Lityum-İyon	1991
Nesil 2a	Katot: NMC111, LMO Anot: Karbon/Grafit		1994
Nesil 2b	Katot: NMC532, NMC622 Anot: Karbon/Grafit		2005
Nesil 3a	Katot: NMC622, NMC 811 Anot: Grafit + %5/10 Si		2020
Nesil 3b	Katot: Yüksek Enerjili NMC, Yüksek Gerilim Spinel—5 V Anot: Silikon/Karbon	Optimize Edilmiş Lityum İyon	2025
Nesil 4a	Katot: NMC Anot: Silikon/Karbon Katı Elektrolit	Katı Hal Lityum-İyon	2025
Nesil 4b	Katot: NMC Anot: Lityum metal Katı Elektrolit	Katı Hal Lityum-Metal	>2025
Nesil 4c	Katot: Yüksek Enerji NMC, Yüksek Gerilim Spinel Anot: Lityum metal Katı Elektrolit	Gelişmiş Katı Hal	2030
5. Nesil	LiO ₂ Li-Hava/Metal-Hava Li-Kükürt	Metal-Hava LiS	>2030
	Yeni iyon bazlı sistemler (Na, Mg, Zn veya Al)	Yeni iyon bazlı ekleme kimyaları	

1.13.5 Redoks akış pilleri

İlk patent, Temmuz 1954'te titanyum klorür akışlı pil için verildi. Günümüzdeki vanadyum redoks pili ise 1986'da Avustralya'daki New South Wales Üniversitesi tarafından patentlendi. "Redoks" terimi, indirgeme ve oksidasyon arasındaki elektron transferini ifade eder. Akış pilleri, elektrolitleri depolama tanklarına pompalayarak ve daha sonra gerektiğinde enerjiyi geri alarak enerji depolayan, şarj edilebilir bir pil türüdür. Bu teknoloji özellikle yenilenebilir kaynaklardan enerji depolamak ve esnek bir enerji depolama çözümünün gerekli olduğu uygulamalar için çok uygundur. Akış pilleri ölçeklenebilirlik, uzun çevrim ömrü ve güç ile enerji kapasitesini ayırma yeteneği gibi avantajlar sunmaktadır. Güç sistemlerini istikrara kavuşturmaya ve dalgalanan elektrik talebini yönetmeye yardımcı olabilecekleri şebeke ölçeğinde enerji depolamada yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ek olarak, akış pillerinin şebekeden bağımsız uygulamaları destekleme ve kesintiler sırasında yedek güç sağlama potansiyelleri araştırılmaktadır. Şekil 1.22'de şeması gösterilmektedir. Bu teknoloji, özellikle sürdürülebilir ve verimli enerji çözümlerine geçiş bağlamında, enerji depolama sistemlerinde devam eden gelişmelerin önemli bir parçası olmaktadır (Itani ve De Bernardinis, 2023).

Ticari akış pillerinin çoğu, vanadyum tuzu ile sülfürik asit içeren bir elektrolit kullanmaktadır. Elektrotlar genellikle grafit bipolar plakalardan oluşmaktadır. Vanadyum, korozyonu kontrol altında tutmak için kullanılan birkaç aktif maddeden biridir. Vanadyumun çeliği güçlendirmek için (%90 oranında) kullanımının yanı sıra, yenilenebilir enerji teknolojileriyle ilgili olarak da önemli bir role sahip olması, vanadyumun stratejik bir metal olarak değerini artırmıştır. Batarya bilimciler, madencilik şirketleri ve politikacılar, yeşil enerji dönüşümü sürecinde vanadyumun önem kazanmasından dolayı heyecan duymaktadır. Bu durum bizlere, vanadyumun enerji depolama teknolojilerindeki (örneğin redoks akümülatörlerinde) kullanımının giderek daha önemli hale geldiğini göstermektedir (Şenocak, 2022).



Şekil 1.22. Akış pili (Şenocak, 2022).

1.13.6 Esnek ince film piller

Giyilebilir elektronikler, çip kartları, “Internet of things” için küçük sensörler, kompakt tıbbi cihazlar gibi cihazların artan kullanımı, elektrikli araçlar ve şebeke depolama sistemleri için mevcut pillerden farklı özelliklere sahip pillere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu cihazların, düşük güç sağlayan ancak uzun süre dayanan, ultra hafif kompakt pillere ihtiyacı vardır. Yenilikçi materyaller, kimyasallar ve üretim teknikleri pil teknolojilerinde büyük dönüşümlere yol açmakta ve birçok ince ve esnek pil çeşidinin gelişimine olanak tanımaktadır. İnce film piller, katı hal pilleri ailesinden bir türdür ve her biri birkaç mikrometre kalınlığında filmlerden oluşan pil bileşenlerinin üst üste konmasıyla yapılmaktadır. Bu pillerin tamamlanmış hücreleri genellikle birkaç yüz mikrometre kalınlığındadır, böylece esneklikleri sağlanmaktadır. Genellikle, katmanlar sıratma teknikleri kullanılarak bir araya getirilmektedir. Ancak bunlar aynı zamanda baskı veya püskürtme yöntemleriyle de uygulanmaktadır. Bu durum, pillerin düşük maliyetli rulo üzerine rulo teknikleri kullanılarak üretilbilmesine olanak tanımaktadır. İnce film piller şu anda ticari olarak bulunmaktadır. Ticarileştirme için yaygın bir yaklaşım, katı polimer elektrolitler

kullanan geleneksel katı hal lityum iyon kimyasını uyarlamaktır. STMicroelectronics, EnFilm adı verilen ve lityum metal anot, lityum kobalt oksit katot ve lityum fosfor oksinitrid seramik elektrolite sahip bir pil üretmektedir. Bu pil, sadece 0.25 mm kalınlığında olan kâğıt inceliğinde bir yapıya sahiptir. Diğer yandan, BrightVolt, 0.5 mm'den daha ince ve son derece hafif bir hücre oluşturmak için polimer elektroliti doğrudan elektrotların üzerine kaplayarak benzersiz bir pil tasarımı sunmaktadır. Bu polimer elektrolit aynı zamanda pil bileşenlerini bir arada tutarak yapıştırıcı işlevi görmektedir. Bu teknolojiler, ince film pillerinin esneklik, hafiflik ve dayanıklılık gibi avantajlarını vurgulamaktadır. İnce film pillerinde lityum yerine çinko kullanan bazı şirketler bulunmaktadır. Bunlardan biri olan Imprint Energy, lityumu çinko ile değiştirerek ince film çinko-karbon piller üretmektedir. Bu piller, yeni ve stabil bir elektrolit kimyası kullanmaktadır. Serigrafi baskı yöntemiyle, tişört tasarımlarını basmak için kullanılan aynı ekipman ve teknikler kullanılarak üretilmektedir. Şirket, bu pillerin bükülebilir ve maliyeti düşük bir cihaz olduğunu ifade etmiştir. Birçok araştırmacı, ince film şarj edilebilir pil elektrotlarında 3D mimarileri araştırmaktadır. Pürüzlü veya çıkıntılı elektrotlar, birim alan başına daha fazla hacim sağlayarak enerji yoğunluğunu artırabilir. Son çalışmalardan birinde, araştırmacılar, yaygın silikon işleme tekniklerini kullanarak kolayca üretilen yeni bir silikon bazlı 3D ince film pilini rapor etmiştir. Araştırmacılar, bir anot oluşturmak için silikon bir yonga üzerine silikon sütunlarını kazıyarak başlamıştır. Bu sütunlar, ince bir polimer elektrolit ile kaplanır ve ardından sütunlar arasındaki boşluklar geleneksel nikel bazlı katot malzemesi ile doldurulmuştur. Sonuç olarak, elektrolit tarafından ayrılan Lego benzeri elektrotlarla ayrılan bir pil elde edilmiştir. Başka bir grup ise benzer bir yaklaşımı benimsemiştir: Silikon yongaların içine kazılmış derin gözenekler dizisine tüm pil katmanlarını birer birer yerleştirmişlerdir. 3D baskı, yani katman katman üretim, ince pillerin üretim sürecini devrimleştirebilir. Bu teknoloji sayesinde, her bir katmanın plastik, metal veya başka bir malzeme olabileceği farklı mürekkepler kullanılarak 2D veya 3D piller basılabilir. Şu anda maliyetli olsa da, 3D baskıyla ilgili maliyetler düşüyor ve bu da gelecekte büyük ölçekte pil üretimini çok düşük maliyetle mümkün kılabilir. Bu gelişme, pil üretimini daha erişilebilir ve maliyet-etkin hale getirme potansiyeline sahiptir, bu da pil teknolojisine dayalı çeşitli endüstrilerde devrim yaratabilir (American Chemical Society, 2019) (URL-71).

1.13.7 Grafen pilleri

Grafen, altıgen bir düzen de düzenlenmiş tek bir karbon atomu katmanından oluşan dikkat çekici bir malzemedir. Grafenin yüksek iletkenliği, dayanıklılığı ve enerji yoğunluğu gibi özellikleri, pil teknolojisinin birçok yönünde önemli gelişmeler sağlamaktadır. Grafen piller, lityum iyon pillere göre birçok avantaj sunmaktadır. Öncelikle, grafen piller daha hızlı şarj edilebilir. Grafenin yüksek iletkenliği, elektrotlar arasında hızlı elektron transferine olanak tanımakta, kısa şarj süreleri sağlamaktadır. Ayrıca, grafen piller daha uzun ömürlüdür. Grafenin dayanıklılığı ve diğer pil malzemelerinden daha az bozulma eğilimi göstermesi, uzun kullanım ömrü sunmaktadır. Grafen piller aynı alanda daha fazla enerji depolayabilir, bu da taşınabilir cihazlar ve elektrikli araçlar için daha uzun kullanım süreleri sağlamaktadır. Grafenin yüksek iletkenliği ve termal yönden daha verimli olması, aşırı ısınma ve termal kaçak riskini azaltmakta, bu da yangın ve patlama riskine karşı pili daha güvenli kılmaktadır. Grafen pillerinin potansiyel avantajlarına rağmen, pahalı olması, henüz seri üretime geçebilecek teknoloji olgunluğuna sahip olmaması dikkate alınması gereken dezavantajlar arasındadır. Bazı şirketler, Appeal Inc gibi, grafen piller geliştirdiklerini duyurmuş ve bunları piyasaya sürmüş olsa da ölçeklenebilirlik ve üretim maliyeti önemli zorluklar olarak kalmaktadır. Bu nedenle, grafen pillerinin potansiyelini gerçekleştirip ana akım bir teknoloji haline gelip gelmeyeceği henüz belirsizdir. Ancak, teknolojinin potansiyel faydaları o kadar büyüktür ki, mevcut zorlukları aşmak için araştırma ve geliştirmeye yatırım yapmaya devam etmek önemlidir (Feng, 2023).

1.14 Pil Endüstrisinde Sürdürülebilirlik

Teknolojinin ilerlemesi ve yaygınlaşmasıyla birlikte, sürdürülebilirlik zorlukları artık daha belirgin hale gelmekte ve merkezi bir konuma oturmaktadır. Bu zorluklar, hammaddelerin kullanılabilirliği ve işleme maliyeti ile pil üretimiyle ilişkili ekonomi ve atık yönetimi gibi alanları kapsamaktadır. Ayrıca, kullanım ömrü sona eren cihazlar ve bileşenlerinin etkili bir şekilde yönetilmesi de bu zorlukların arasındadır.

Pil endüstrisi, ulaşım, yenilenebilir enerji depolama ve tüketici elektroniği dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde önemli bir rol oynamaktadır. Pillere olan talep artmaya devam ettikçe, pil endüstrisinde sürdürülebilirlik zorlukları artık daha belirgin hale gelmekte ve merkezi bir konuma oturmaktadır. Bu, pillerin verimli kullanımı, geri

dönüştürülmesi ve kullanım ömrü sonunda pillerin sorumlu bir şekilde imha edilmesine yönelik stratejilerin uygulanmasını içermektedir.

Pil endüstrisinde sürdürülebilir uygulamaları benimseyerek, çevresel etkiyi en aza indirebilir, kaynakları koruyabilir ve hammadde çıkarmaya olan bağımlılığı azaltabiliriz. Ayrıca pil endüstrisindeki sürdürülebilirlik, enerji verimliliğini sağlamak ve atık oluşumunu en aza indirmek için üretim süreçlerinin optimize edilmesini de içermektedir. Pil endüstrisi, geri dönüşüm ve sorumlu imha gibi sürdürülebilir uygulamaları birleştirerek çevresel ayak izini azaltabilir ve döngüsel ekonomiye katkıda bulunabiliriz. Pil endüstrisinde verimli pil kullanımı ve geri dönüşüm gibi sürdürülebilir uygulamaları hayata geçirerek çevresel etkiyi en aza indirebilir ve kaynakları koruyabiliriz. Ek olarak, pil üretiminde kullanılan hammaddelerin şeffaflığını ve etik şekilde tedarik edilmesini teşvik etmek, madencilik faaliyetleriyle ilgili sosyal ve çevresel kaygıların giderilmesine yardımcı olmaktadır. İndirmek, kaynakları korumak ve döngüsel ekonomiyi teşvik etmek için çok önemlidir. Geri dönüşüm, sektörün genel sürdürülebilirliğine katkıda bulunduğundan pil sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir bileşen olarak düşünülmelidir (Zhan vd., 2018). Gelecekte, yeni nesil pil teknolojileri kritik unsurlardan ucuz ve bol miktarda malzemeye doğru bir geçişin işaretçisi olabilir; bu da tedarik zinciri sürdürülebilirliğini artırabilir, ikincil piller (SLB) için yeni uygulamaların önünü açabilir ve enerji depolama bilimini küresel politikalardan ayırabilir (Newton vd., 2021).

1.15 Sürdürülebilir Pil Teknolojilerinde Gelişmeler

Sürdürülebilir pil teknolojilerindeki ilerlemeler, daha verimli ve çevre dostu enerji depolama çözümlerine olan ihtiyaçtan kaynaklanmaktadır. Bu teknolojiler, pil üretimi ve imhasının çevresel etkisini azaltmayı, enerji verimliliğini artırmayı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Sürdürülebilir pil teknolojilerindeki önemli gelişmelerden bazıları şunlardır:

1.15.1 Şarj edilebilir pillerin geliştirilmesi

Şarj edilebilir pillerin geliştirilmesi, çevreyi korumak ve ekonomik faydalar sağlamak için önemlidir. Bu piller, tek kullanımlık pillere göre çevre dostudur, çünkü tekrar

tekrar kullanılmaktadırlar, bu da atık miktarını azaltır ve toksinlerin çevreye zarar vermesini önlemektedir. Aynı zamanda, şarj edilebilir piller uzun vadede maliyet tasarrufu sağlamaktadırlar, çünkü sürekli olarak yeni piller satın almak yerine aynı piller tekrar tekrar kullanılabilir. Bu da daha az atık oluşturmada ve çöp yönetimini kolaylaştırmaktadır. Daha uzun ömürlü oldukları için pil ömründen daha fazla faydalanmanızı sağlamaktadırlar.

Bunların yanı sıra, dezavantajları arasında ise başlangıç maliyetinin tek kullanımlık pillere kıyasla genellikle daha yüksek olması, şarj etme sürelerinin acil durumlarda kullanıcılar için dezavantaj oluşturmaları, zamanla kapasitelerini kaybetmeleri, şarj imkanlarının sınırlı olması, şarj edilebilir pil teknolojisinin henüz yeterince gelişmemiş olması yer almaktadır.

Şarj edilebilen (tekrar kullanılabilen) piller: Bu tür pillerde elektrik üretiminin pil içinde sebep olduğu kimyasal reaksiyonun ters yönde elektrik verildiğinde ters yönde kimyasal reaksiyon olarak gerçekleştirilmeye müsait olanlardan seçildiği pillerdir.

- Kurşun-asit pil – Araçlar, alarm sistemleri ve kesintisiz güç ihtiyacı olan yerlerde kullanılmaktadır.
- Lityum-iyon pil – Oldukça yaygın olan türdür. Yüksek şarj yoğunluğu vardır. Dizüstü bilgisayar, cep telefonları, müzik çalarlar ve daha birçok taşınabilir elektronik cihazda kullanılır.
- Lityum-iyon polimer pil – Lityum iyon pilin temel karakteristiklerini taşır, farkı daha az şarj yoğunluğu olmasıdır. Bu pilin kimyası üreticinin ihtiyacına göre kullanım yeri avantajı yaratabilmesidir. (Örneğin; ultra –ince pil)
- Sodyum-sülfür (NaS) pil
- Nikel-demir pil
- Nikel metal hidrür (Ni-MH) pil
- Nikel-kadmiyum pil - Li-Ion ve Ni-MH pil tiplerinin tüm uygulamalarında kullanılabilir. Bu pil, uzun şarj adedine sahiptir (1500 defanın üzerinde). Fakat diğer tiplere göre daha az enerji yoğunluğuna sahiptir. Ni-Cd piller eski teknolojiye kullanılmakta olup, hafıza sorunlarına yol açmalarından dolayı yerini modern pillere bırakmaktadır. Ayrıca içerdiği kadmiyum dolayısı ile kullanımı sınırlandırılmaktadır.

- Sodyum-metal klorür pil
- Nikel-çinko pil
- Erimiş tuz pili: Bu pilin avantajı elektriği üreten ve depolayan kısımlarının tuzlu sıvının hareket edebilmesiyle birbirinden bağımsız olabilmesidir (URL-28).

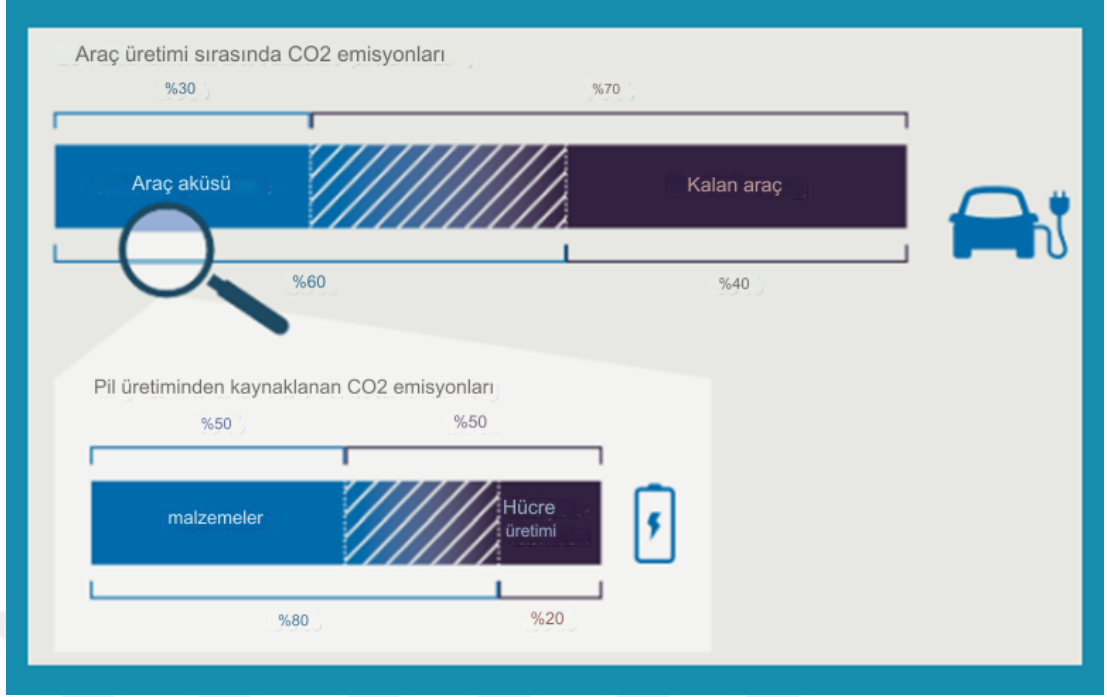
Şarj edilemeyen pillerde elektrik üretiminin pil içinde sebep olduğu kimyasal reaksiyonun ters yönde elektrik verildiğinde ters yönde kimyasal reaksiyon olarak gerçekleştirilmeye müsait olmadığı pillerdir.

- Çinko-karbon pil - Düşük maliyetli - az enerji gerektiren uygulamalar için.
- Çinko-klorür – Çinko-karbon pilden biraz daha uzun ömürlüdür.
- Alkalın pil - Alkaline/manganez "uzun ömürlü" pillerdir, daha fazla güç ihtiyacı gerektiren uygulamalarda da kullanılabilir.
- Gümüş oksit pil – Genelde işitme cihazlarında kullanılır.
- Lityum pil – Genelde dijital kameralarda kullanılır. Saat ve bilgisayar saatlerinde de kullanıldığı görülür. Çok uzun ömürlüdür, fakat pahalıdır.
- Cıva pil – Genelde dijital saatlerde kullanılır.
- Çinko-hava pili – Genel olarak işitme cihazlarında kullanılır.
- Isıl (Termal) pil – Yüksek sıcaklık depolar. Askeri uygulamalarda önem taşır (URL 28).

1.15.2 Karbon ayak izi azaltılması

Hammaddelerin Çıkarılması ve İmalat sırasında: Emisyonların neredeyse yarıdan çoğu madencilikten ve gerekli malzemelerin tedarikinden kaynaklanmaktadır.

Üretim: Pilin üretimi sırasında fazla miktarda emisyon ortaya çıkmaktadır. Şekil 1.23. de araç üretimi sırasında ve batarya üretimi sırasında çıkan emisyonlar gösterilmektedir.

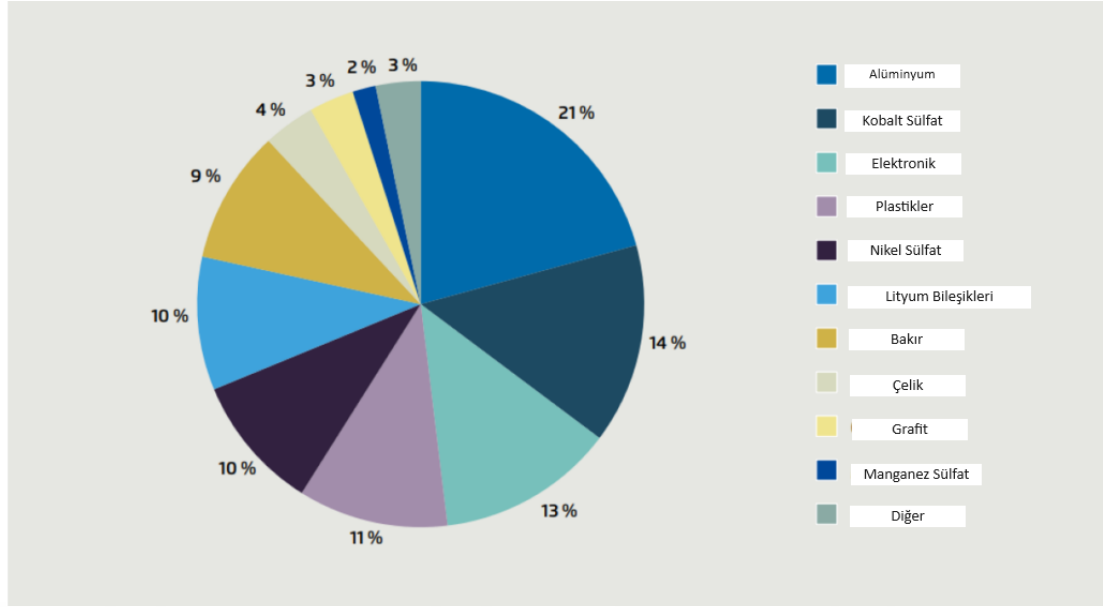


Şekil 1.23. Araç üretimi sırasında ve batarya üretimi sırasında çıkan emisyonlar (URL-29).

Kullanım sırasında: Pillerin kullanımı esnasında, içerdikleri kimyasalların reaksiyonları ve enerji dönüşümleri sera gazı emisyonlarına yol açabilmektedir.

Atılma ve Geri Dönüşüm: Kullanılmış pillerin imhası veya geri dönüşümü sırasında, malzeme işleme ve atık yönetimi süreçlerinden kaynaklanan emisyonlar açığa çıkar. Atık pillerin yakılması veya depolanması işlemleri esnasında da yine sera gazı emisyonları oluşabilmektedir.

Şekil 1.22 farklı pil malzemelerinin sera gazına olan katkılarını yüzdelik dilimler halinde göstermektedir. Bu şekil, pil üretiminde kullanılan malzemelerin çevresel etkileri hakkında fikir sahibi olabilmek ve çevresel yeniliklerin gerekliliğini vurgulamak amacıyla kullanılmıştır. Daha sürdürülebilir malzeme kullanımı, geri dönüşüm teknolojileri ve enerji verimliliği artırıcı yaklaşımlar, pil üretiminde karbon ayak izini önemli ölçüde azaltabilir.



Şekil 1.24. Farklı pil malzemelerinin sera gazına etkileri (Alman Federal Meclisi Bilimsel Hizmet Raporu, 2019) (URL-30).

Avrupa’da Pil pasaportu projesi, karbon ayak izi kontrolünü sağlama atılan güzel bir adımdır. Pil pasaportu, dijital bir altyapı aracılığıyla temel bilgi ve teknik verilerin belgelenmesi ve paylaşılmasını sağlar. Bu sayede, tedarik zincirinin sürdürülebilirliği ve sorumluluğuyla ilgili kapsamlı veriler kaydedilir. Bu veriler arasında sera gazı emisyonları, hammadde çıkarımı koşulları, pil durumunun belirlenmesi ve yenileme/onarım gibi adımların uygulanmasıyla ilgili bilgiler bulunur. Şekil 1.24’de farklı pil malzemelerinin sera gazına etkileri gösterilmektedir. Pasaport, düşük karbonlu mobilite ve enerji depolamaya sürdürülebilir bir geçişin yanı sıra, kullanım ömrünün uzatılması, kalıntı değerin belirlenmesi ve sonraki kullanım ve geri dönüşüm için veri lojistiği desteği aracılığıyla hammaddelere olan bağımlılığın azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır. Geliştirilen standartlar ve bulgular, uluslararası alanda kullanılacak olan pil pasaportunda yer almalıdır. Bu projenin amacı, yaklaşan AB düzenlemesinin gerekliliklerini karşılamak üzere geliştirilen pil pasaportunun, yani 2026’dan itibaren Almanya ve Avrupa’da araçlar, sabit depolama sistemleri ve daha büyük endüstriyel piller için yeni satın alınan tüm piller için zorunlu hale gelmesidir. Bu, sürdürülebilir ve uzun ömürlü piller üreten üreticileri korur ve kullanım ömürlerinin sonuna kadar çevre dostu yönetimini sağlar (URL-31).

Küçük bir iklim ayak izine sahip, sosyal açıdan sürdürülebilir elektrikli araçlar üretmenin anahtarı şeffaflıktır. Bu, pil pasaportu ile sağlanır.

Pasaportun içeriği;

- CO₂ Ayak izi (CO₂ g cinsinden)
- Sosyal sürdürülebilirlik
- Pil türü ve bileşimi
- Kapasite
- Kullanılan riskli maddelerin türü ve oranı
- Pilin sağlık durumu
- Geri dönüştürülmüş/geri dönüştürülebilir malzemelerin oranı (% cinsinden)
- İkinci kullanım veya geri dönüşüm için bilgi
- Üretici (URL-31)

1.15.3 Değerli malzemelerin geri kazanılması

Pillerde hem yeniden değerlendirilebilir metaller (örneğin nikel) hem de toksik metaller (örneğin kadmiyum) bulunmaktadır. Geri dönüşüm/kazanım süreçlerinde her iki tür metal de hesaba katılmak zorundadır. Pil geri dönüşümü ve kazanımı için çeşitli basamaklardan oluşan sistemler kullanılmaktadır. Bu süreçlerde pillerin öncelikle yükleri boşaltılmakta, ardından parçalanmakta ve eritilerek içindeki metaller ortaya çıkarılmaktadır. Geri kazanılan metal örnekleri şunlardır:

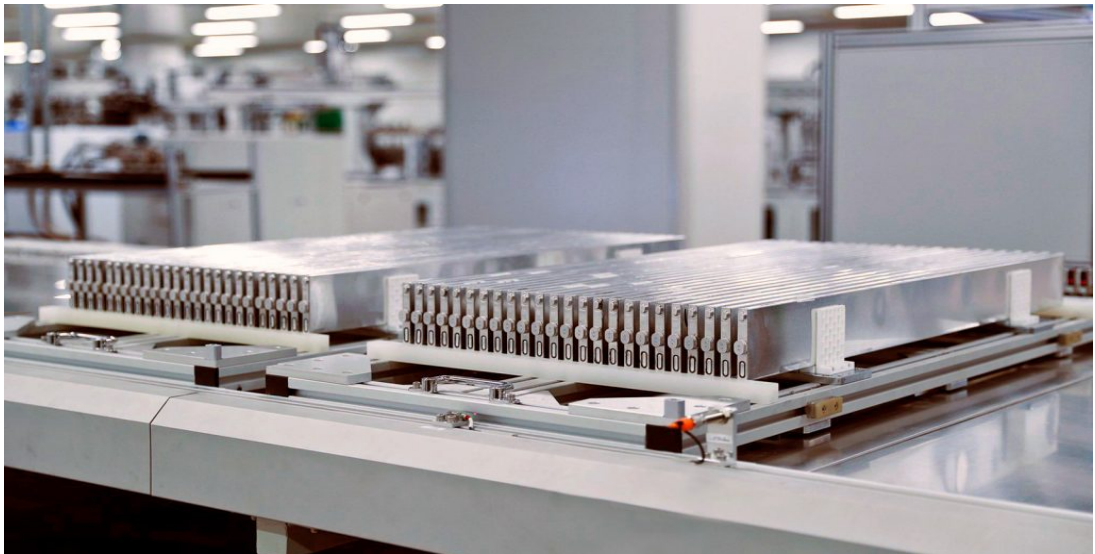
- Kobalt, nikel ve kadmiyum içeren pillerden bu üç metal de geri kazanılabilmektedir.
- Kurşun pillerdeki maddeler ayrıştırılma ile elde edilebilmektedir.
- Cıvalı pillerdeki cıva, kapalı sistemler ile ayrıştırılabilmektedir.
- Nikel metal hidrit pillerden plastik, hidrojen ve nikel ayrıştırılabilmektedir.,
- Çinko karbon veya çinko hava pillerinden çinko geri kazanılabilmektedir (Güler, 2012).

1.15.4 Daha sürdürülebilir malzemeler kullanılması

Bu tür teknolojilerin geliştirilmesi, atık yönetimi sorunlarını azaltabilir ve pil üretiminde kullanılan hammaddelerin sürdürülebilirliğini artırmaktadır. Ayrıca, daha dayanıklı ve uzun ömürlü piller, tüketiciye maliyet tasarrufu sağlayabilir ve pil atıklarının azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Bu nedenle, pil endüstrisinde daha

sürdürülebilir malzemelerin kullanılması ve pil değişim sıklığının azaltılması, çevresel ve ekonomik açıdan önemli bir ilerleme kat etmemizi sağlamaktadır. Lityum iyon şu anda en yaygın pil çeşididir. Yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip olması nedeniyle elektromobilité, elektrikli el aletleri ve sabit uygulamalar gibi ceasitli alanlarda kullanılmaktadır. Talep artışı nedeniyle, lityum üretimi artmaktadır. Dolayısıyla yeni lityum kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Tuzlu sudan veya hidrojeolojik kaynaklardan lityum ekstraksiyonu, geleneksel hammadde ekstraksiyonuna çevre dostu bir alternatif olmaktadır. Ek olarak, doğrudan geri dönüşüm ve (proses) suyun işlenmesi sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Elektrokimyasal "iyon pompalama" işlemi aracılığıyla lityum iyonları sulu çözeltilerden ekstrakte edilebilmektedir (Fraunhofer IFAM, Nachhaltige batterien, 2024) (URL-32).

Bunların yanında, şekil 1.25`de BYD firması tarafında kullanılmaya başlanan bıçak pil bu konuya verilebilecek güzel bir örnektir. Markanın 2020`de piyasaya sürdüğü en yeni "Blade Battery", 27 yıllık araştırma ve ürün geliştirmenin ürünü olarak, pil teknolojisindeki en yenilikçi tasarımlardan biridir. Blade Pil, Lityum Demir Fosfat (LFP) veya katot kimyasına sahiptir. Geleneksel pil hücrelerinden farklı olarak, ince ve bıçak benzeri bir yapıya sahip olan bu pil, daha güçlüdür. LFP pilleri, pahalı ve sınırlı kaynaklara sahip olan kobalt veya nikel içermemektedir. Blade bataryanın bir diğer önemli avantajı, yapısındaki bıçakların daha geniş bir yüzey alanına sahip olmasıdır. Bu, daha iyi bir ısı dağılımı sağlamakta ve pilin aşırı ısınmasını önlemektedir. Çünkü aşırı ısınma, pilin ömrünü kısaltan ana faktörlerden biridir (URL-33).



Şekil 1.26. BYD'den bıçak pil (URL-34).

1.15.5 Yenilenebilir enerji ile şarj edilebilir piller

Akülü elektrikli araçlar ve akıllı şebekeler gibi gelişmiş teknolojiler, sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan talebi artırmıştır. Ancak, elektrikli araçların genellikle fosil yakıtlı şebeke elektriği ile şarj edilmesi, sürdürülebilirlik açısından bazı endişeleri beraberinde getirir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarından gelen elektrikle şarj edilmeleri önem kazanmaktadır. Güneş enerjisi veya fotovoltaik (PV) teknolojisi, açık havada güneş ışığında 100 mW cm^{-2} 'lik yüksek kullanılabilir güç yoğunluğu sayesinde, pil şarjı için kolaylık sağlamaktadır (Gurung ve Qiao, 2018).

Güneş enerjisi, sınırsız ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Fosil yakıtlar gibi depolanmış güneş enerjisi kaynaklarının yerine geçebilecek olan güneş enerjisi, çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Güneş panellerinin çalışma prensibi ve teknolojisi, bu enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilme kapasitesi ile modern enerji ihtiyaçlarına uygun bir çözümdür. Ancak, bu potansiyelin tam olarak gerçekleştirilebilmesi için, güneş enerjisi teknolojilerinin daha da geliştirilmesi ve maliyetlerin düşürülmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, güneş enerjisi araştırmaları ve yatırımları kritik öneme sahiptir. Solar şarj cihazları, taşınabilirlik ve bağımsızlık açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Elektriğe erişimin sınırlı olduğu kamp yapma, yürüyüş veya seyahat gibi açık hava etkinliklerinde, bu cihazlar enerji ihtiyaçlarını karşılamak için ideal bir çözüm olabilir. Harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymadan cihazları şarj edebilmek, kullanıcıların daha özgür hareket etmelerini sağlamaktadır. Bu tür şarj cihazları, çevre dostu enerji çözümleri sunarak hem çevre bilincini artırır hem de enerji maliyetlerini düşürmektedir. Ancak, güneş ışığının yeterli olmadığı durumlarda veya kapalı alanlarda bu cihazların verimliliği azalabilir, bu yüzden kullanıcıların bu durumu göz önünde bulundurması önemlidir. Örneğin fazla enerjiyi depolayacak bir yedek güç kaynağı ile kombine edilmesi mantıklıdır. Bu, güneş ışığı olmadığında da sistemin çalışmasını sağlayabilir (Mane vd., 2022).

1.16 Çevresel Yeniliğin Tanımı ve Önemi

Çevresel yenilik, doğal kaynakların korunması, atık azaltımı ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi gibi hedefler doğrultusunda yapılan inovasyonlardır. Bu yenilikler, daha sürdürülebilir bir gelecek için çözümler sunmakta ve doğal kaynakların tükenmesini önlemektedir.

Günümüzde piller, hayatımızın birçok alanında yer almaktadır. Cep telefonlarından elektrikli araçlara, dizüstü bilgisayarlardan kablosuz kulaklıklara kadar her yerde karşımıza çıkmaktadır. Ancak, pil üretimi ve kullanımı çevresel olarak oldukça etkili olabilmektedir. Pil üretimi sırasında kullanılan minerallerin çıkarılması, doğal yaşamı ve ekosistemleri olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, kullanılmış pillerin atılması içerdikleri toksik maddeler nedeniyle ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır.

Ancak, birtakım yenilikler sayesinde bu sorunlara çözümler bulunabilir. Örneğin, geri dönüşümlü malzemelerden yapılmış piller geliştirilebilir. Bu, doğal kaynakların daha az kullanılmasını sağlar ve atık miktarını azaltabilir. Ayrıca, pil teknolojisinde yapılan ilerlemeler sayesinde daha verimli ve dayanıklı piller üretilir. Bu da pil kullanımının çevresel etkilerini azaltabilir.

Bununla birlikte, pil teknolojisinin yanı sıra, enerji depolama ve dağıtım alanındaki yenilikler de çevresel etkileri azaltabilir. Örneğin, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin depolanması için geliştirilen akıllı batarya sistemleri, enerjiyi daha etkin bir şekilde kullanmamıza olanak tanır ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır.

Pil teknolojisi ve enerji depolama sistemlerindeki çevresel yenilikler, sürdürülebilir bir gelecek için kritik öneme sahiptir. Bu yenilikler, doğal kaynakları korumak, atık miktarını azaltmak ve çevresel etkileri en aza indirmek için önemli adımlar atmamızı sağlar. Bu nedenle, çevresel yeniliklere yatırım yapmak ve bu alanda araştırma ve geliştirmeye devam etmek, gelecek nesillere daha yaşanabilir bir dünya bırakmak için hayati öneme sahiptir.

Çevresel inovasyon, öncelikle geleneksel pil teknolojileriyle ilişkili çevresel zorluklar ve sürdürülebilir enerji çözümlerine yönelik artan talep nedeniyle pil endüstrisinde çok

önemli bir rol oynamaktadır. Çevresel inovasyonun pil endüstrisini nasıl şekillendirdiğinin bazı önemli yönleri kısaca şunlardır:

Geri dönüşüm ve döngüsel ekonomi;

Pil endüstrisindeki çevresel inovasyon, pil malzemelerinin verimli bir şekilde geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılmasına yönelik süreç ve teknolojilerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu, ham maddelerin çıkarılmasını en aza indirerek ve depolama atıklarını azaltarak pil üretimi ve imhasının çevresel etkisinin azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Şirketler kapalı döngü geri dönüşüm sistemlerine yatırım yapıyor ve tükenmiş pillerden lityum, kobalt ve nikel gibi değerli malzemeleri geri kazanmak için yeni yöntemler geliştirilmektedir.

Yenilenebilir enerji kullanımı;

Pil üretim tesislerinin enerji ihtiyacını karşılamak için güneş, rüzgar veya hidroelektrik enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, elektrik tüketiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olur. Pil üreticileri yenilenebilir enerji kaynaklarına geçerek karbon ayak izlerini önemli ölçüde azaltabilirler. Güneş panelleri, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek pillerin şarj edilmesini sağlar. Fotovoltaik (PV) hücreler, güneş ışığını emerek elektrik üretir ve bu elektrik, pillerde depolanabilir. Benzer şekilde, rüzgâr türbinleri rüzgarın kinetik enerjisini yakalayıp elektrik enerjisine dönüştürür. Türbinlerin dönen kanatları, bir jeneratörü çalıştırarak elektrik üretir ve bu enerji de pillerde depolanabilir. Bu yöntemler, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak pillerin şarj edilmesine olanak tanır ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır.

Verimli kaynak yönetimi;

Malzeme israfının azaltılması ve malzeme kullanımının optimize edilmesi de dahil olmak üzere verimli kaynak yönetimi uygulamalarının uygulanması, doğal kaynakların korunmasına ve çevresel etkinin en aza indirilmesine yardımcı olur. Bu, malzeme kayıplarını azaltmak için üretim süreçlerinin iyileştirilmesini, malzemelerin geri kazanılması ve yeniden kullanılması için kapalı döngü geri dönüşüm sistemlerinin uygulanmasını ve malzemelerin sürdürülebilir ve etik tedarikçilerden tedarik edilmesini içerebilir.

Su tasarrufu;

Akümülatör ve pil üretim tesislerinde su tüketimi, kimyasal besleme sistemleri, akü yıkama makineleri ve akü şarj havuzlarında görülmektedir. Üretim süreçlerinde suyun geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması gibi su tasarrufu önlemlerinin uygulanması, su tüketimini azaltır ve atık suyun çevreye deşarjını en aza indirir. Kapalı devre soğutma sistemleri ve suyu verimli kullanan temizleme işlemleri gibi su tasarrufu sağlayan teknolojiler, pil üretiminin çevresel etkisinin azaltılmasına yardımcı olur. Bu teknolojilere aktif karbon filtre, iyon değıştirici reçine ve ters osmoz gibi teknolojiler de eklenebilir.

Emisyon azaltma teknolojileri;

Temizleyiciler ve filtreler gibi emisyon kontrol teknolojilerinin kurulması, pil üretim süreçleri sırasında yayılan hava kirleticilerin azaltılmasına yardımcı olur. Bu teknolojiler, uçucu organik bileşikler (VOC'ler) ve partikül madde gibi kirleticileri atmosfere salınmadan önce yakalayıp tedavi ederek hava kalitesini iyileştirir ve çevreye verilen zararı en aza indirir.

Yeşil kimya;

Pil üretiminde yeşil kimya ilkelerini benimsemek, tehlikeli maddelerin kullanımını en aza indiren ve toksik atık oluşumunu azaltan çevre dostu malzeme ve süreçlerin kullanılmasını içerir. Bu, toksik solventlerin çevre dostu alternatiflerle değıştirilmesi ve pil bileşenlerinde biyo bazlı veya geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması gibi geleneksel pil malzemelerine daha güvenli alternatifler geliştirmeyi içerir.

Yaşam döngüsü değıerlendirmesi ve optimizasyonu;

Pil üretim süreçlerinin kapsamlı yaşam döngüsü değıerlendirmelerinin yapılması, iyileştirme alanlarının belirlenmesine ve tüm değıer zinciri boyunca çevresel performansın optimize edilmesine yardımcı olur. Pil üreticileri, ham madde çıkarma, üretim, taşıma, kullanım ve kullanım ömrü sonunda elden çıkarmanın çevresel etkilerini analiz ederek çevresel etkileri en aza indirecek ve sürdürülebilirliği en üst düzeye çıkaracak stratejiler uygulayabilir.

Çevre düzenlemelerine uymak ve ISO 14001 (Çevre Yönetim Sistemleri) gibi sertifikaları almak, çevresel sorumluluğa bağlılığı gösterir ve yasal gerekliliklere uyumu sağlar. Bu, atık ve zararlı kimyasalların kontrol altında tutulmasını sağlar. Sorumlu Pil Koalisyonu'nun Pil Yönetim Sertifikasyonu gibi pil endüstrisine özel sertifika programları, sürdürülebilir pil üretimi ve yönetimi için yönergeler ve en iyi uygulamaları sağlar.

1.17.1 Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA)

Şekil 1.27. Araç ve sabit akülerin başlıca yaşam döngüsü aşamaları
(Porzio ve Scown, 2021).

LCA, belirli bir ürün veya hizmetin çevresel etkilerini anlamak ve karşılaştırmak için dört ana aşamadan oluşmaktadır. Hedef ve kapsam tanımlama aşamasında, araştırmacılar cevaplamak istedikleri soruyu belirlemektedir. Bu soru, sistem sınırlarının, çevresel metriklerin ve bir veya daha fazla işlevsel birimin tanımlanmasına rehberlik etmektedir. Bataryalar bağlamında, LCA sonuçları, batarya Ar-Ge çalışmalarını çevresel etkileri azaltma yönünde bilgilendirmek, belirli bir kullanım durumu için rekabet eden batarya teknolojisi seçeneklerini karşılaştırmak veya şebeke veya araç uygulamalarında büyük ölçekli benimsemenin çevresel etkilerini tahmin etmek için kullanılabilir. Envanter analizinde belirli bir ürün veya hizmetle ilişkili tüm enerji ve malzeme girdileri ile çıktıların ayrıntılı bir envanteri oluşturulmaktadır. Batarya üretiminde kullanılan hammaddelerin çıkarılması, işlenmesi, bileşenlerin üretilmesi, hücrelerin üretilmesi ve modül montajı gibi süreçler dikkate alınmaktadır. Envanter analizi sonucunda elde edilen veriler, çeşitli çevresel etki kategorilerine (örneğin, küresel ısınma potansiyeli, su kullanımı, toprak kullanımı) göre değerlendirilmektedir. Bu aşama, hangi çevresel etkilerin en önemli olduğunu belirlemeye yardımcı olmaktadır. Son aşamada, elde edilen sonuçlar analiz edilmektedir. Bu, belirli bir ürünün veya hizmetin çevresel performansını iyileştirmek için önerilerde bulunmak amacıyla yapılmaktadır. Ayrıca, sonuçların belirsizlikleri ve sınırlamaları dikkate alınarak nihai sonuçlar yorumlanmaktadır (Porzio ve Scown, 2021).

Kullanım aşamasını ve kullanım ömrü sonunu hariç tutan çalışmalar genellikle "beşikten kapıya" olarak adlandırılmaktadır. Kullanım aşamasını ve kullanım ömrü sonunu içeren çalışmalar ise "beşikten mezara" olarak adlandırılmaktadır; bu, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve nihai bertarafı içerebilir. "Beşikten beşiğe" terimi, genellikle sıfır atık sürecini ifade etmek için kullanılır ve geri dönüşümü içerse bile pil yaşam döngülerine atıfta bulunmak için yaygın olarak kullanılmamaktadır (Quist, 2024).

1.17.2 Atık yönetim planları

Piller, atık yönetiminde özel bir öneme sahiptir çünkü içerdikleri kimyasal maddeler nedeniyle çevreye ciddi zararlar verebilirler. Pillerin içindeki zehirli ağır metaller çöp

alanlarına atılırsa toprağa sızabilir, toprağı ve suyu kirletebilir, insan sağılığını ve çevreyi etkileyebilir. Ağır metaller yakılırsa kül içinde yoğunlaşabilir veya baca emisyonları yoluyla atmosfere girebilir. Kül bertaraf edildiğinde zehirli metaller toprağa, yeraltı ve yüzey sularına sızabilir (Kuchhal ve Sharma, 2019). Bu nedenle, kullanılmış pillerin doğru bir şekilde toplanması ve bertaraf edilmesi son derece önemlidir.

Atık yönetim planları, pil atıklarının toplanması ve geri dönüşümü için belirlenmiş prosedürlerden oluşmaktadır. Bu prosedürler, kullanılmış pillerin toplanması için belirli konteynerlerin yerleştirilmesi, toplama noktalarının oluşturulması ve halkın bilinçlendirilmesi gibi temaları içermektedir. Daha sonra, toplanan piller geri dönüşüm tesislerine gönderilmektedir. Burada içerdikleri değerli metaller geri kazanılmakta ve zararlı maddeler güvenli bir şekilde bertaraf edilmektedir.

Pil atıklarının doğru bir şekilde yönetilmesi, çevreye ve insan sağılığına yönelik potansiyel riskleri en aza indirirken, aynı zamanda değerli kaynakların geri kazanılmasına da katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, atık yönetim planlarının pil atıklarını kapsamlı bir şekilde ele alması ve etkili uygulanması son derece önemlidir.

1.17.3 Çevresel risk değerlendirmesi (ÇED)

ERA raporları ile, pil üretim süreçlerinde kullanılan kimyasalların çevresel etkilerini değerlendirilmektedir. Potansiyel çevresel riskleri belirler ve bu riskleri en aza indirmek veya önlemek için öneriler sunulmaktadır. Çevresel etkiler; kanserojenler ve kanserojen olmayanlar, iyonlaştırıcı radyasyon, ozon tabakasının incelmesi, toprak işgali, yenilenemeyen enerji, su ve karasal ekotoksiste, solunum inorganikleri ve organikleri, mineral çıkarımı ve küresel ısınma gibi birçok gösterge altında değerlendirilmektedir. Bu etkilere bakılırken ayrıca insan sağılığı, ekosistem kalitesi, iklim değışikliğı ve kaynaklar gibi son nokta kategorileri de dahil edilmelidir.

Çevresel etkiyi değerlendirirken, pilin şarj edilmesinde kullanılan elektriğın kaynağına büyük ölçüde bağılı olduğunu vurgulamak önemlidir. Well to Wheels (WTW) analizi, nükleer enerji santrallerinden veya yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrikle çalışan akülü elektrikli araçların (BEV'ler), olumlu çevresel performans sergilediğini göstermektedir (Mierlo vd., 2017)

1.17.4 Sürdürülebilirlik raporları

Pil endüstrisindeki birçok şirket, çevresel performanslarını, enerji verimliliğini, atık yönetimini ve diğer sürdürülebilirlik ölçümlerini değerlendiren sürdürülebilirlik raporları yayınlamaktadır. Bu raporlar, sürdürülebilirlik çabalarının ilerlemesini izlemek, şeffaflık sağlamak, paydaşlarla iletişim kurmak ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma stratejilerini geliştirmek için kullanılmaktadır.

Örneğin Northvolt'un 2022'de yayınlamış olduğu sürdürülebilirlik analizi raporunda, hücre üretiminin karbon ayak izini koordineli eylemlerle bugün 33 kg'dan 2030 yılına kadar 10 kg CO₂ e/kWh'ye düşürmeyi amaçlayan Karbon Yol Haritası 2030'un ana hatlarını çizmektedir. Sürdürülebilir uygulamalara ve enerji verimliliğine odaklanarak şirketin karbon ayak izini azaltma konusundaki kararlılığını göstermiştir. Ayrıca şirketin pil hücreleri için kapsamlı LCA'lar yürütme ve iyileştirme alanlarını belirleme ve karbon ayak izinde daha fazla azalma elde etmek için geri dönüştürülmüş malzemelerden yararlanma amaçlı ESS çabalarını da vurgulamaktadır (URL-35).

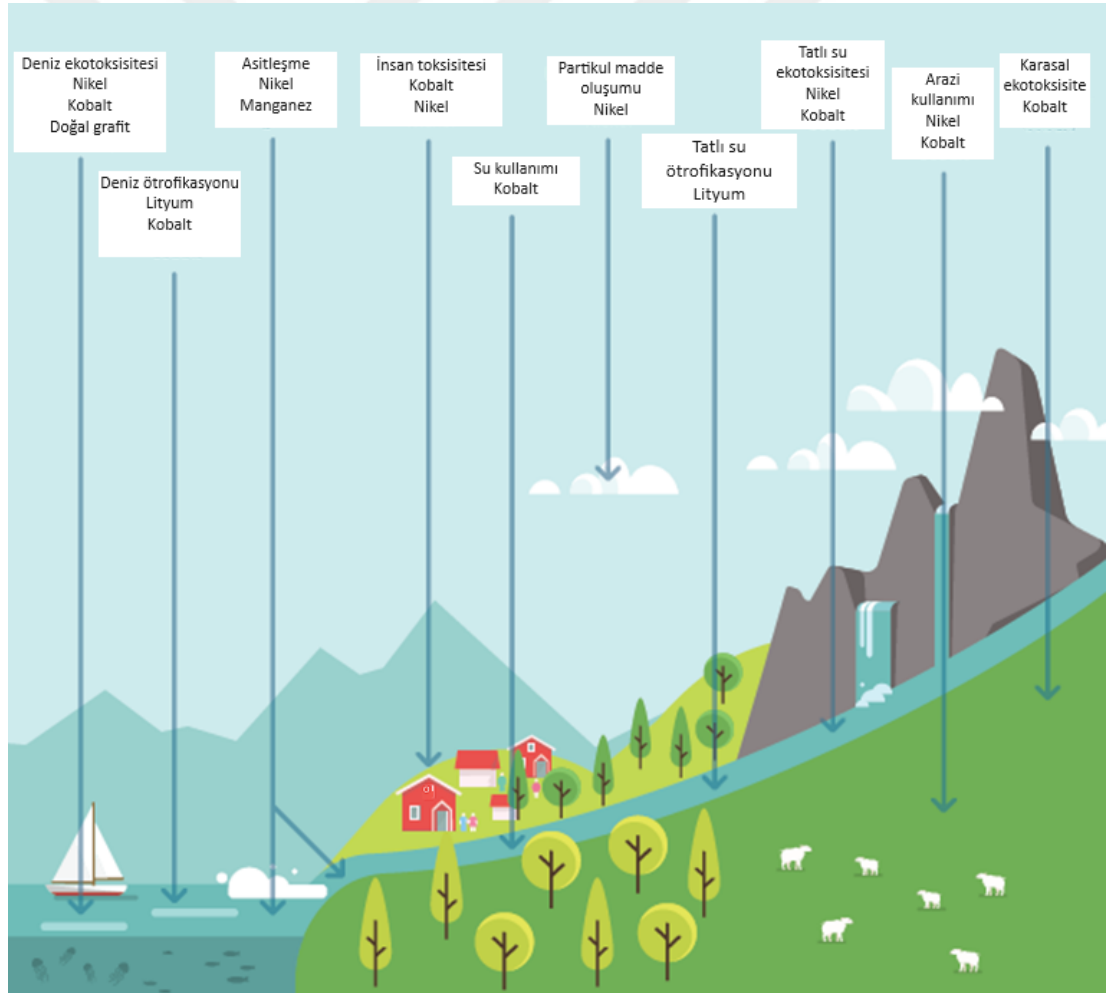
1.17.5 Yeşil pil üretim süreçleri

Yeşil pil üretim süreçleri, çevresel sürdürülebilirliği ön planda tutan ve çevreye olumsuz etkileri en aza indiren pillerin üretiminde kullanılan yöntem ve teknikleri ifade etmektedir. Bu süreçler, pil üretim yaşam döngüsü boyunca kaynak tüketimini, enerji kullanımını, emisyonları ve atık oluşumunu azaltmaya odaklanır. Şekil 1.28'de pil malzemelerinin çevresel etkileri gösterilmektedir. Araba aküsü üretimi, çevre dostu bir dönüşüm için kritik bir alandır. Üretim sürecinde su ve enerji tüketiminin azaltılması, sürdürülebilir malzemelerin kullanımı gibi çeşitli önlemler alınmalıdır. Örneğin, geleneksel lityum iyon pillerine kıyasla çevreye daha az zararlı olan lityum demir fosfat (LiFePO₄) tabanlı pillerin geliştirilmesine yönelik araştırmalar artmaktadır. Bunun yanı sıra, madencilik faaliyetlerinin ve buna bağlı çevresel sorunların azaltılması için geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı gibi yeni yaklaşımlar da değerlendirilmelidir (URL-36).

Kritik Hammadde Yasası (CRMA) ve Net Sıfır Endüstri Yasası (NZIA) tarafından belirlenen kriterlere ulaşmanın çevresel ve iklimsel etkileri büyük önem taşımaktadır. Bu eylemlerin temel amacı endüstriyel stratejiyi güçlendirmek, yeşil ve dijital

dönüşümleri başararak küresel ekonomide rekabetçi kalmak için kritik hammaddelerin tedarikini ve net sıfır teknolojilerin yerel üretimini sağlamaktır. Yapılan analiz, lityum, nikel, kobalt, manganez ve grafit gibi geçiş malzemelerine olan talebin artmasıyla birlikte pil üretimiyle ilişkili sera gazı (GHG) emisyonlarında artış yaşanacağını göstermektedir.

Pil üretimi için yenilenebilir enerji kullanımının artması, yeşil enerji satın alma anlaşmaları (green PPAs) ve AB elektrik şebekesinin daha fazla karbonsuzlaştırılmasına yönelik teşviklerle desteklenmelidir. Genel olarak, CRMA ve NZIA'nın hedeflerine ulaşılması, sıkı çevre düzenlemelerini gerektirecek ve yeşil enerjiye geçişin yerel ve küresel çevresel ve iklimsel etkilerini en aza indirecektir (URL-37).



Şekil 1.29. Pil malzemelerinin çevresel etkileri (URL-37).

1.18 Atık Pillerin Çevresel Etkileri

Çevresel sorunlar, ekonomik faktörler ve doğal kaynakların kullanımı gibi çeşitli etkenler, tükettiğimiz ve yaşamımızda kullandığımız birçok malzemenin geri dönüşüm açısından farklı özelliklerle değerlendirilmesini gerektirmektedir (Nogueria & Margarido, 2007). Piller, içerdikleri metaller ve diğer değerli materyaller nedeniyle doğal kaynakların önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Pillerden bu materyallerin geri kazanılması sağlanarak yeni piller için gerekli olan ham madde ihtiyacı azaltılmaktadır. Bu, doğal kaynakların korunması ve gelecek kuşaklar için sürdürülebilir bir çevrenin oluşturulması açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Atık piller, sahip oldukları kurşun, cıva, kadmiyum gibi toksik maddelerle çevre ve insan sağlığı için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Ağır metaller vücuda; ağız, solunum ve deri yolu ile girmektedir. Metabolizmadan dışarı atılımları çok yavaş gerçekleştiği için zamanla vücutta birikmekte ve tehlikeli doza ulaşmaktadırlar. Pil geri dönüşümü sayesinde, bu zararlı maddeler güvenli bir şekilde bertaraf edilerek çevre ve insan sağlığı açısından tehlikeleri önlenmektedir. Ayrıca, geri dönüşüm sayesinde atık miktarı azaltılmakta, çöp depolama alanlarına giden atık yükü hafifletilmekte ve daha temiz bir çevreye adım atılmaktadır (URL-38).

1.18.1 Nikel

Nikel, doğal olarak yayılmasının yanı sıra insan faaliyetleri sonucu da doğada bulunabilir. Organik formu, inorganik formundan daha zehirleyicidir. Nikel, sıkça alerjik cilt reaksiyonlarına neden olan yaygın bir metaldir ve alerjik kontakt dermatitin en yaygın nedenlerinden biridir (Cempel ve Nikel, 2006). İnsanlara içme suyu ve gıdalar aracılığıyla ulaşabilir. Deri hastalıklarına ve aşırı duyarlılık hissine neden olabilir. Ayrıca solunum yolları aracılığıyla vücuda alındığında, kalp-damar sistemi için çok zararlı ve kanserojen bir metaldir (Eröztürk, 2004).

1.18.2 Kadmiyum

Kadmiyum, diğer ağır metallerle kıyaslandığında su içinde çözünme özelliği daha yüksek olan bir elementtir. Bu özelliği nedeniyle doğada hızlı bir şekilde yayılabilir

(Kahvecioğlu vd., 2003). Kadmiyum, zehirli bir metaldir ve gıdalarla yüksek düzeyde alınması ani zehirlenmelere yol açabilir. Örneğin, içinde 16 mg/litre kadmiyum bulunan suların içilmesi, karın bölgesinde şiddetli ağrı, kusma ve bulantı gibi semptomlara neden olabilir. Düşük miktarlarda kadmiyum alınması ise kronik akciğer hastalıkları ve anfizeme sebep olabilir. Ayrıca, kardiyovasküler sistemde ve iskelet sisteminde bozukluklar görülebilir. İngiltere'de 1965'te pil üretiminde çalışan işçilerde prostat kanseri vakalarının artmasıyla yapılan araştırmalarda, kadmiyumun kanserojen etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Kadmiyumun çevreye ve insan sağlığına olan zararları dikkate alındığında, kullanımı ve maruziyeti mümkün olduğunca azaltılmalıdır (Eröztürk, 2004).

1.18.3 Bakır

Akut bakır zehirlenmesi genellikle yiyecek ve içeceklerde bulunan bakırın aşırı miktarda alınmasıyla meydana gelir. Akut bakır zehirlenmesinin belirtileri arasında tükürük salgısının artması, mide ağrıları, bulantı ve ishal gibi sindirim sistemi problemleri bulunur. Ayrıca, alınan doza bağlı olarak koma ve hatta ölüm gibi ciddi sonuçlar doğurabilir. Bakırın vücut için önemini ve zararlarını dengeli bir şekilde anlamak, sağlık açısından önemlidir (Eröztürk, 2004).

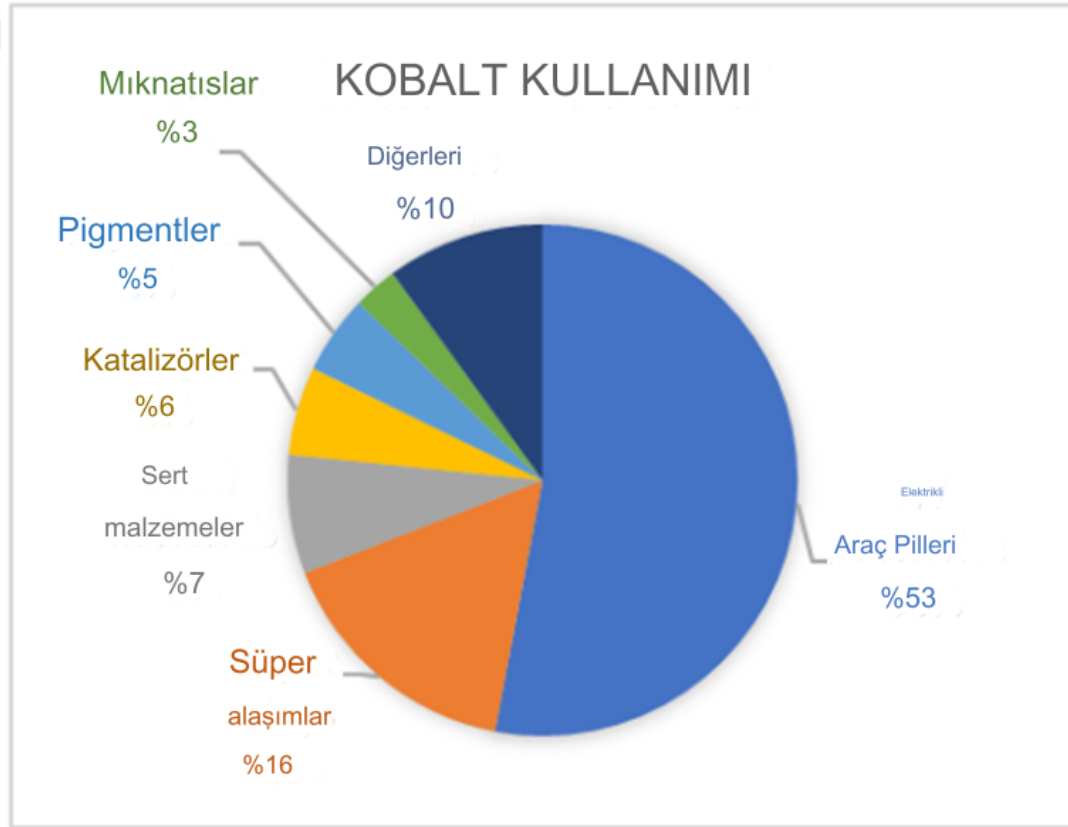
1.18.4 Çinko

Çinko, diğer ağır metallerle karşılaştırıldığında düşük zehirlilik etkisi gösterir. Çinko ve çinko tuzlarından zehirlenme nadir görülse de, çinko içeren kaplardan kaynaklanan kirlenme veya mesleki maruziyet sonucunda çinko veya çinko oksit tozlarının solunmasıyla zehirlenme meydana gelebilir. Özellikle uzun süre çinko oksit buharı soluyanlarda "Çinko-Ateşi" olarak adlandırılan rahatsızlıklar görülebilir. Semptomlar genellikle birkaç gün içinde kendiliğinden kaybolur. Akut zehirlenme semptomları sindirim sistemi rahatsızlıkları, ishal, mide bulantısı ve karın ağrısı şeklinde ortaya çıkabilir. Aşırı çinko alımı durumunda ise uyuşukluk, kas fonksiyonlarında düzensizlik ve yazma güçlüğü gibi semptomlar gözlenebilir (Eröztürk, 2004).

1.18.5 Kobalt

Kobalt, toz halinde solunması veya kobalt tuzlarına deri teması sonucunda zehirlenmeye yol açabilir. Solunan kobalt tozu akciğerlerde çözünerek kana ve idrara

karışabilir. Kobalt oksit (Co_3O_4) gibi suda çözünmeyen bileşikler solunum yoluyla alındığında hücrelerde çözünerek kana karışır. Suda çözünür kobalt bileşikleri ağız yoluyla alındığında büyük bir kısmı atılırken, geri kalan kısım vücutta birikir, özellikle kan, karaciğer, akciğer, böbrek, testisler ve bağırsaklarda toplanır. Uzun süre kobalt tozuna maruz kalındığında alerjik reaksiyonlar ve kronik bronşite yol açabilir, ancak kobalt kaynaklı deri tahrişleri ve hastalıklar nadir görülür. Kobalt ve kobalt bileşiklerinin insanlar üzerinde kansere neden olup olmadığına dair kesin bulgular henüz yoktur, ancak bu bileşikler risk teşkil eder ve kanserojen olarak değerlendirilirler (Eröztürk, 2004). Şekil 1.28’de kobalt kullanımının dünya çapında dağılımı yer almaktadır.



Şekil 1.30. Kobalt kullanımının dünya çapında dağılımı (Fu vd., 2020).

1.18.6 Kurşun

Kurşun, insan faaliyetleri sonucu ekosisteme en fazla zarar veren metallerden biridir. Hem metal formunda hem de bileşikleri şeklinde atmosfere yayılabilir ve her iki durumda da toksiktir. Çalışma ortamında izin verilen sınırın $0,1 \text{ mg/m}^3$ olduğu kurşun, çevresel kirliliğe yol açan en önemli ağır metallerden biridir (Kahvecioğlu, Kartal,

Güven, & Timur, 2003). Kurşun, vücuda sindirim ve solunum yoluyla girebilir. Toksik etkisi, partikül boyutuna, vücuda giriş şekline ve çözünürlüğüne bağlıdır. Kurşun, solunum yoluyla sis, duman, buhar ve toz olarak, ağız yoluyla su, içecek ve yiyeceklerle veya deri yoluyla organik kurşun bileşikleri olarak alınabilir. Solunan kurşunun yaklaşık %40'ı emilir ve dokularda, özellikle kemiklerde birikir. Kurşunun en belirgin etkisi genellikle çocuklarda görülür. Erişkinlerde ise hemoglobin sentezini bozarak, bazı biyokimyasal reaksiyonları engelleyerek ve kanda bazı kimyasalların seviyelerini artırarak etki eder. Ayrıca böbreklere ve merkezi sinir sistemine zarar verebilir. Kronik zehirlenme genellikle uzun süreli ağızdan veya solunum yoluyla maruz kalma sonucunda meydana gelir. Belirtileri arasında yorgunluk, zayıflık, iştahsızlık, baş ağrısı, sürekli kabızlık, yağ ve kilo kaybı bulunabilir. Ek olarak kurşunun karsinogenik etkisi olduğu da tespit edilmiştir (Eröztürk, 2004).

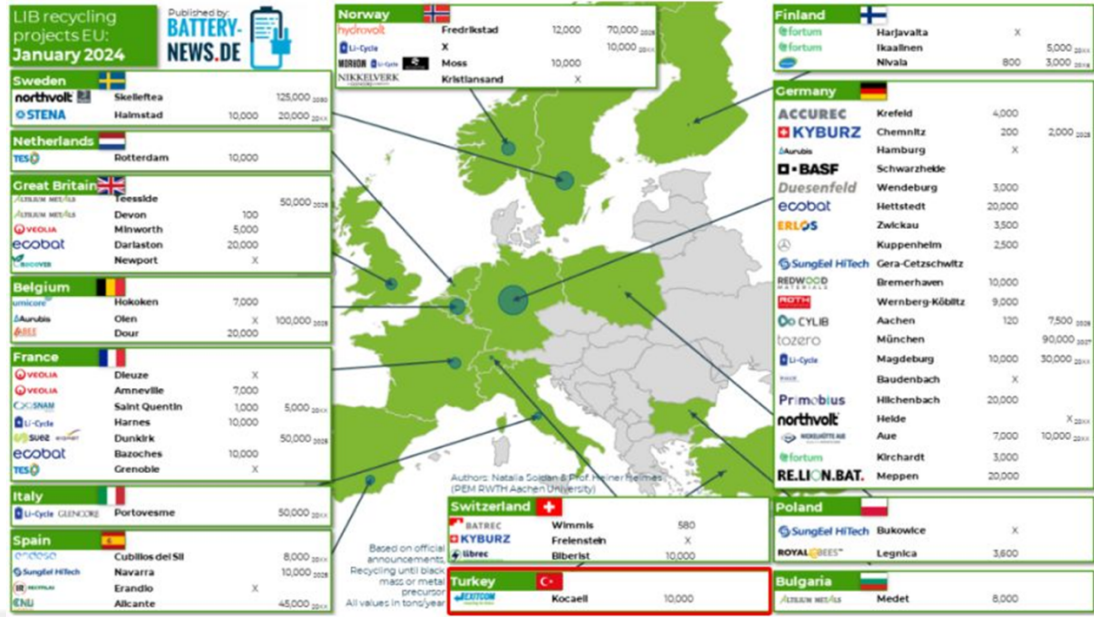
1.19 Pillerin Geri Dönüşümü

TÜBİTAK Kimya Enstitüsü'nün 2009'da başlattığı "Atık Pillerin Bertarafı ve Geri Kazanım Teknolojilerinin Geliştirilmesi" projesi, atık pillerin geri dönüşümü konusunda Türkiye'de önemli bir dönüm noktası olmuştur. Bu projeye birlikte, Exitcom Recycling A.Ş. atık pillerin geri dönüşümü ve teknolojiler geliştirilmesi gibi büyük ilerlemelere sektöre öncülük etmiştir. Aynı zamanda, TAP Derneği'nin atık pil toplama noktaları oluşturarak çevresel bilinci artırması ve vatandaşların katılımını teşvik etmesi, geri dönüşümün yaygınlaşmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu çabalar, atık pillerin çevreye verdiği zararları en aza indirmek ve doğal kaynakları korumak adına son derece önemlidir. Toplumun bu konuda bilinçlenmesi ve geri dönüşüme olan katkısının artmasıyla, daha sürdürülebilir bir gelecek için önemli adımlar atılmış olacaktır. Pil atıklarının sürdürülebilir yönetimi için geri dönüşüm, doğal mineral ve yakıt kaynaklarının korunmasının yanı sıra çevresel ve ekonomik faydalar sağlayarak büyük önem taşımaktadır. Şekil 1.31'de Avrupa batarya geri dönüşüm haritası yer almaktadır. Tükenmiş pillerin geri dönüştürülmesi şu avantajları beraberinde getirir:

- Çevresel Faydalar: Pil atıklarının azalması, depolama alanlarına gönderilme ve yakılma gibi çevresel olarak zararlı işlemlerden kaçınmamızı sağlamaktadır. Bu işlemler geri dönüşümden daha büyük kirlilik riski taşır ve kurşun, cıva, kadmiyum gibi tehlikeli maddelerin kontrolsüz bir şekilde çevreye sızmasına uzun vadeli bir

tehdit oluşturmaktadır. Geri dönüşüm süreci, bu tür toksik maddelerin etkilerini ortadan kaldırarak hem insan sağlığını hem de çevreyi korumaktadır. Ayrıca, geri dönüşümle elde edilen metallerin pil üretiminde kullanılması, doğal yaşam alanlarının ve vahşi yaşamın kaybına neden olan madencilik faaliyetlerinin azalmasına katkı sağlamaktadır.

- **Ekonomik Faydalar:** Malzemelerin geri dönüştürülmesi, ham malzemelerin üretim maliyetlerinden daha ekonomiktir; bu nedenle, pillerde kullanılan ham malzemelerin üretim maliyetleri, geri dönüştürülen malzemelerin kullanımıyla azalmaktadır. Ayrıca, geri dönüşüm, ithal malzemelere olan bağımlılığı azaltır, bu da ülkenin ithalat faturasında önemli bir tasarruf sağlamaktadır. Depolama ve yakma işlemleriyle ilişkili atık bertaraf maliyetleri, daha yüksek geri dönüşüm oranları sayesinde azaltılmaktadır. Yüksek toplama oranları ve ölçek ekonomileri, geri dönüşüm maliyetlerinin azalmasına yardımcı olmaktadır.
- **Doğal Kaynakların Korunması:** Doğal cevher yatakları sınırlıdır ve bir gün tükenecektir. Geri dönüşüm, bu yatakların ömrünü uzatır ve kaynaklar daha verimli kullanılmaktadır. Nikel, kadmiyum, kobalt ve gümüş gibi değerli metaller, geri kazanılarak ve yeniden kullanılarak kaynakların korunmasına katkı sağlanmaktadır. Özellikle, ham metal çıkarım işlemleri genellikle fosil yakıtlara bağımlı ve yüksek enerji tüketen süreçlerdir; geri dönüşüm süreçleri ise fosil yakıt kaynaklarının korunmasına yardımcı olmaktadır.
- **Enerji Tasarrufu:** Bir pilin yaşam döngüsü boyunca, enerjinin büyük bir kısmı pil üretimi ve ham madde üretimi için kullanılırken, daha az miktarı ise inceleme, toplama ve sıralama gibi süreçlerde harcanmaktadır. Geri dönüşüm süreçleri, atık pillerden metallerin geri kazanılmasını, ham metallerin çıkarılması ve rafine edilmesine nazaran daha az enerji kullanarak sağlamaktadır. Örneğin, geri dönüştürülen kadmiyum, çinko ve nikel, sırasıyla ham metallerin çıkarımından %46, %73 ve %75 daha az birincil enerji gerektirmektedir. Bu rakamlar, metalin birincil üretiminin küresel karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %10'unu oluşturduğu gerçeğiyle daha da önem kazanmaktadır (Kuchhal ve Sharma, 2019).



Şekil 1.32. Avrupa batarya geri dönüşüm haritası (Battery News) (URL-39).

Toplama;

Kullanılmış piller için etkin toplama sistemlerinin kurulması, geri dönüşüm sürecinin ilk adımıdır. Bu, üreticiler, perakendeciler, tüketiciler, atık yönetim şirketleri ve devlet kurumları dahil olmak üzere çeşitli paydaşları kapsayabilir. Toplama noktaları, belirlenmiş teslim yerleri, geri dönüşüm merkezleri, perakende mağazaları ve geri posta programlarını içerebilir. Bilinçli tüketiciler de kullanılmış pilleri bu toplama noktalarına teslim ederek geri dönüşüm sürecine katkı sağlayabilirler (URL-40).

Boşaltma;

Bu aşamada diğer işlemlere geçilmeden önce pillerin tüm enerjisi boşaltılarak geri dönüşümü güvenli hale getirilmektedir (URL-40).

Sökme ve ayırma;

Geri dönüşüm sürecinin bir sonraki adımında, paketlerden modüller çıkarılmaktadır. Modüllere ve hücrelere ulaşmak için vidalar sökülür, kesilmekte ve kaldırılmaktadır. Bunun için manuel ve otomatik işlemler kullanılmaktadır. Ayırma, farklı türdeki pillerin geri dönüşüm için uygun şekilde işlenmesini sağlamaktadır (URL 40).

Malzeme geri kazanımı (Kırma ve Ayırma);

Bu mekanik bir işlemdir. Pillerin ezilmesi ve parçalanmasıyla başlamaktadır. Malzemeler daha sonra metal (örn. lityum, kobalt, nikel, alüminyum, bakır) ve plastik olarak ayırmak için çeşitli teknikler kullanılarak işlenmektedir. Elektrolit de izole edilerek geri kazanılmaktadır. Geriye en değerli olan ve kara kütle (ince toz) olarak adlandırılan malzeme kalır. Geri kazanılan malzemeleri yeni pil üretiminde veya diğer uygulamalarda yeniden kullanmak üzere çıkarmak ve saflaştırmak için pirometalurjik, hidrometalurjik ve mekanik işlemler dahil olmak üzere çeşitli geri dönüşüm teknolojileri kullanılmaktadır (URL-40).

Parçalama süreci genellikle organik fraksiyonların (örneğin plastik) çıkarılması, elektrot aktif malzemesi ile akım toplayıcı folyonun ayrılması, ve değerli metallerin ayrılması gibi işlemleri içermektedir. Piller, ısı işlem öncesinde veya sonrasında kırılarak işlenmektedir. Hidrometalurjik işlemler, pil bileşenlerinin boyut, şekil, manyetizma, yoğunluk ve iletkenlik gibi fiziksel özelliklerinden yararlanarak optimize edilmiş verimlilik sağlamaktadır. Bu işlemler sonucunda, nikel, kobalt gibi değerli metaller içeren bir toz olan "kara kütle" denilen malzeme fraksiyonları elde edilir. Ayrıca, lityum ve grafit gibi bileşenler de bulunabilir. Alternatif olarak, mekanik ön işlem kullanılarak ısı kullanılmadan işlem gerçekleştirilebilir ve daha karmaşık bir siyah kütle bileşimi elde edilir. Siyah kütle oluşturulduktan sonra genellikle Hidrometalurjik ya da Pirometalurjik işlemlerinden biri kullanılır (Breiter vd., 2023).

1.19.1 Hidrometalurjik geri dönüşüm

Elektrikli pillerden ayrılan siyah kütle, içindeki metallerin asitlerle işlenmesi için kapsamlı bir şekilde işleme tabi tutulmaktadır. Hidrometalurjik işlemler, metalleri çözmek ve bunları diğer bileşenlerden ayırmak için pil malzemelerinin asitler veya diğer çözücülerle süzülmesini içermektedir. Bunu yapmak için hidrometalurjik bir 'hidromet' işlemi kullanılmaktadır. "Solvent ekstraksiyonu", "kristalizasyon" ve "çöktürme" gibi adımlar, farklı metal iyonlarını ayırarak, sonrasında bunları nikel sülfat veya lityum karbonat gibi bataryaya hazır malzemeler üretmek için kullanılabilir hale getirmektedir. Termal işlem görmüş siyah kütle, organik maddeleri (çözücüler, bağlayıcılar gibi) içermediğinden, bu işlem için tercih edilen besleme stoğudur. Hidrometalurjik işlemlerle birleştirilmiş mekanik ön arıtma, yüksek malzeme geri

kazanım oranları ve pil düzeyinde kaliteli ürünler elde etmek için daha fazla reaktif gerektiren karmaşık ancak uygulanabilir bir süreç sunmaktadır (Breiter vd., 2023). Bu yöntem, lityum iyon pillerden lityum, kobalt ve nikel gibi değerli metallerin geri kazanılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Geri kazanılan metaller rafine edilebilmekte ve yeni piller veya başka ürünler üretmek için kullanılabilir (URL-40).

1.19.2 Pirometalurjik geri dönüşüm

Bu geri dönüşüm seçeneğinde piller doğrudan bir fırında eritilir, bu süreçte kobalt, nikel ve bakır gibi metaller alaşım formunda geri kazanılırken, diğer bileşenler (örneğin lityum, alüminyum ve silikon) cürufu birikebilir. Daha sonra elde edilen alaşım, basit bir hidrometalurjik rafinasyon yöntemiyle işlenerek ham maddelerden arındırılır ve pil öncüsü üretimine hazır pil metal tuzları üretilmektedir. Pirometalurjik işlem, yüksek nikel, kobalt ve bakır geri kazanım oranlarına sahip sağlam bir işlem olabilir, ancak hidrometalurjik işleme ile kıyaslandığında, birçok malzemenin yanabileceği veya cürufu kaybolabileceği için toplam malzeme geri kazanımı genellikle daha düşüktür. Ayrıca, bu işlem gelişmiş gaz temizleme sistemleri gerektirebilir (Breiter vd., 2023). Primer pil geri dönüşümünde pirometalurjik işlemler daha yaygındır. Bunu sebebi pirometalurjik işlemlerin ön hazırlığa ihtiyaç duymaması, uygulama açısından daha basit ve hızlı uygulanabilir olmasıdır (Yeşiltepe ve Şeşen, 2016).

1.19.3 Geliştirilmeye devam edilen yöntemler

Araştırmacılar, pillerin daha etkin, ekonomik ve çevre dostu bir şekilde geri dönüştürülmesini sağlamak için çeşitli yeni yöntemler geliştiriyorlar. Ultrason dalgalarının kullanılmasıyla pillerden değerli maddelerin ayrılması, bakterilerin metalleri çıkarmak için kullanılması ve lityumu geri kazanmak için elektrokimyanın kullanılması bu yenilikçi yaklaşımlara örnek olarak verilebilir. Pillerin geri dönüşümü için ultrason dalgalarının kullanılması yönteminde, yüksek frekanslı ses dalgaları ile pil bileşenleri parçalanmaktadır. Böylece değerli malzemelerin çıkarılması daha kolay hale gelmektedir. Geleneksel yöntemler ile kıyaslandığında enerji tasarrufu fazladır ve zararlı kimyasalların kullanılmasını gerektirmemektedir. Bakterilerin kullanılmasıyla metallerin çıkarılması, batarya bileşenlerini parçalamak için bakterilerin kullanıldığı

ve değerli malzemelerin çıkarılmasında kolaylık sağlayan yeni bir yöntemdir. Bu yöntem çevre dostu olduğu gibi zararlı kimyasalların kullanılmasını da gerektirmemektedir. Elektrokimyanın kullanılmasıyla lityumun geri kazanılması, kullanılmış pillerden lityumu geri almak için elektrik kullanımını içermektedir. Bu yöntem verimlidir, uygun maliyetlidir ve bataryadaki lityumun %99'unun geri kazanılmasını sağlayabilmektedir (URL-41).

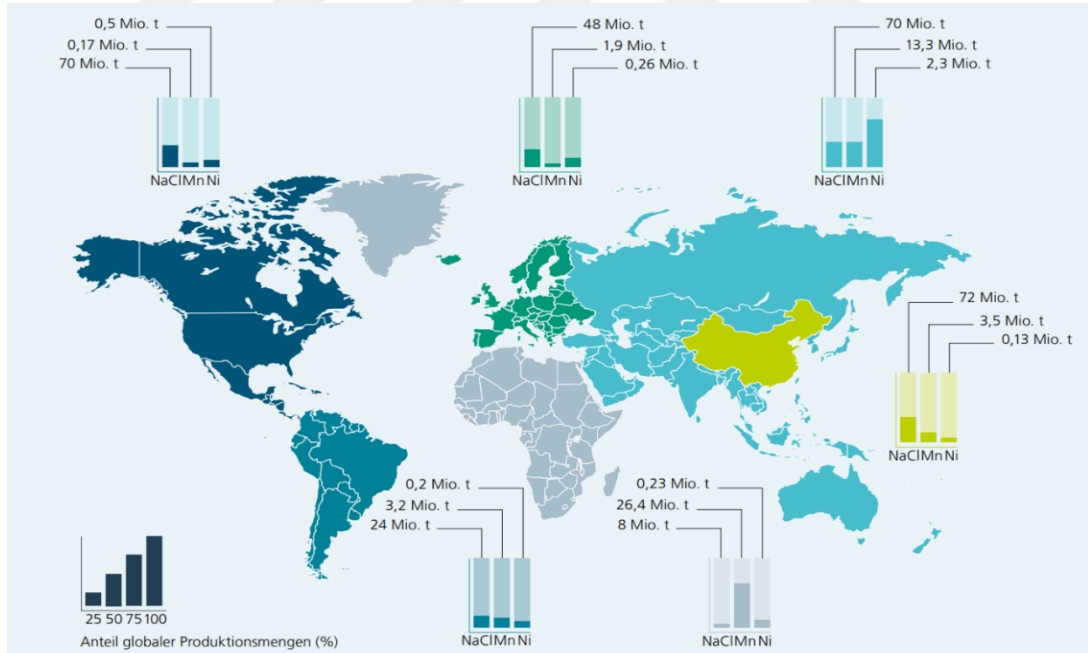
Çeşitli geri dönüşüm yöntemleri, şu anda araştırma, geliştirme ve ticarileştirme aşamalarında. Bu yeni geri dönüşüm yöntemleri, malzeme geri kazanım oranlarını artırmayı, enerji ve reaktif tüketimini azaltmayı, emisyonları ve atık su miktarını azaltmayı hedeflemektedir. Örneğin, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde yürütülen araştırma projeleri, geri dönüşüm süreci sırasında veya sonrasında halihazırda yakılan veya çöp sahasına gönderilen grafitin geri kazanılması için etkili bir yöntem olarak, genellikle madencilik endüstrisinde kullanılan bir metal konsantrasyon yöntemi olan köpük yüzdürmeyi önermektedir. Bir pilin ağırlığının yaklaşık yüzde 15 ila 25'ini temsil eden grafitin geri kazanılması, AB yönetmeliği kapsamında yakın zamanda önerilen ve 2025 ve 2030'a kadar sırasıyla yüzde 65 ve yüzde 70 malzeme geri kazanımını zorunlu kılan gereklilikler arasında yer alabilir (Breiter vd., 2023).

Çizelge 1.4. Üç tip pil geri dönüşüm prosesinde avantaj, dezavantaj ve zorluk (Zhou vd., 2020).

Proses	Avantaj	Dezavantaj	Zorluklar
Hidrometalurjik Proses	-Yüksek iyileşme oranı -Ürün yüksek saflıkta -Düşük enerji tüketimi -Daha az atık gaz Yüksek seçicilik	-Daha fazla atık su -Diğerlerine göre uzun süreç	-Üretilen atık su nasıl arıtılır ? -Bu süreç nasıl optimize edilebilir?
Pirometalurjik Proses	-Basit operasyon -Kısa akış -Kategorilere ve girdilerin boyutuna gerek yok	-Ürün düşük saflıkta -Lityum ve Manganez geri kazanılmaz -Yüksek enerji tüketimi -Düşük kurtarma verimliliği -Daha fazla atık gaz ve dolayısıyla atık gaz arıtma maliyetlerinde artış	-Enerji tüketimi ve kirletici emisyonlar nasıl azaltılır ? -Çevresel tehlikeler nasıl azaltılır ? -Geri kazanılan metallerin daha fazla saflaştırılması için hidrometalurji ile nasıl birleştirilir ?
Doğrudan Fiziksel Geri Dönüşüm Süreci	-Kısa kurtarma rotası -Düşük enerji tüketimi -Çevre dostu -Yüksek iyileşme oranı	-Yüksek operasyonel ve ekipman gereksinimleri -Eksik kurtarma -Yalnızca katot formülasyonunun aynı kalması durumunda uygulanabilir	-Kurtarma maliyetleri nasıl azaltılır ? -Kategori gereksinimleri nasıl düşürülür ? -Ürün performansının nasıl daha da optimize edilir ?

1.20 Dünya’da Şarjlı Pil Teknolojileri

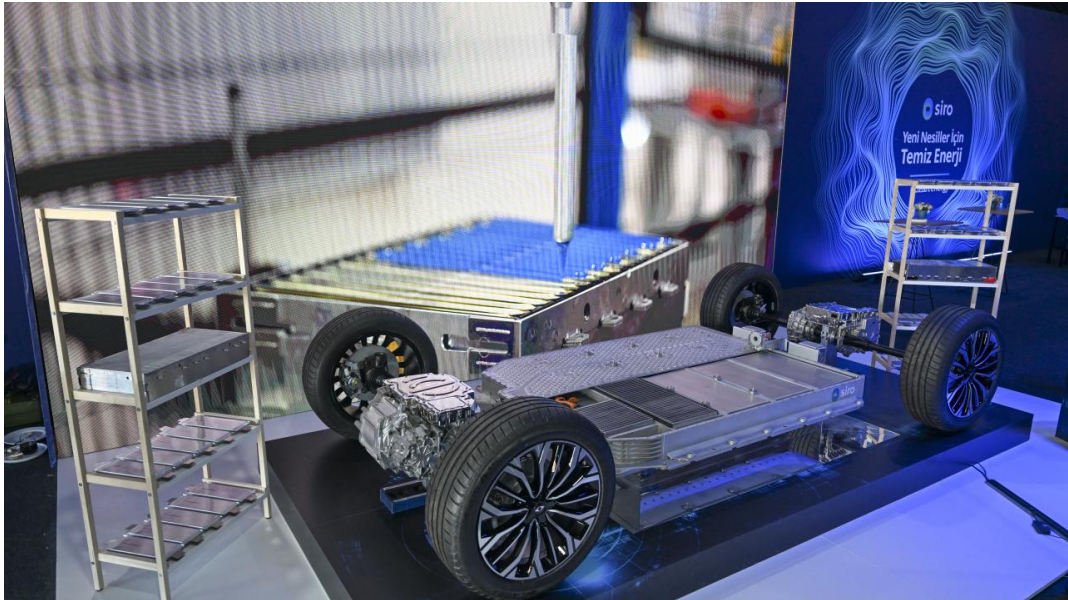
Günümüz dünyasında enerji depolama ve mobilite alanlarında devrim yaratan şarjlı pil teknolojileri, her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. Elektrikli araçlardan taşınabilir elektronik cihazlara, yenilenebilir enerji kaynaklarından akıllı şehirlere kadar birçok alanda kritik bir rol oynayan bu teknolojiler, enerji verimliliğini ve sürdürülebilirliği artırmaktadır. Şarjlı pil teknolojilerinin başarısı ve yaygınlığı, kullanılan malzemelerin çeşitliliği ve verimliliği ile doğrudan ilişkilidir. Lityum iyon piller gibi yüksek performanslı çözümler, lityum, kobalt, nikel ve manganez gibi çeşitli metal ve bileşiklerin kullanımını gerektirirken, son yıllarda sodyum iyon piller gibi yeni alternatifler de geliştirilmiştir. Bu noktada, sodyum klorür, nikel ve manganez gibi hammaddelerin üretim hacimleri büyük bir önem taşımaktadır. Şarjlı pil teknolojilerinde kullanılan hammaddelerin üretim hacimleri, bu teknolojilerin sürdürülebilirliği ve maliyetleri üzerinde doğrudan etkilidir. Şekil 1.30’da sodyum klorür, nikel ve manganez gibi kritik hammaddelerin dünya çapındaki üretim hacimlerini görebilirsiniz.



Şekil 1.33. Sodyumklorür, nikel ve manganez için üretim hacimleri (Degen vd., 2023).

1.20.1 TOGG pili

Türkiye'deki pil teknolojilerindeki ilerlemeler, yerli üretim ve teknoloji transferiyle büyük bir ivme kazanmaktadır. 24 Nisan 2023 tarihinde, batarya hücresi de geliştireceğimiz 20 GWs kapasiteli Siro Batarya Geliştirme ve Üretim Kampüsü'nün inşasına başlanmıştır. Farasis tarafından üretilen ve Türkiye'ye ithal edilen lityum iyon piller, Siro Energy tesisinde üretimine başlandığında yerlileşecek ve Togg marka araçların parça tedariki için yerli imkanlarla karşılanacaktır. Siro, şekil 1.31'de örneği yer alan bataryalarında Farasis'in 20 yıllık deneyimiyle geliştirilen NMC katot kimyasını kullanmaktadır, bu da yüksek enerji yoğunluğuyla kullanıcılara uzun menzil sunmaktadır. Ayrıca, uzun deneyimlere dayanan anot kimyasının düşük şarj süreleri garanti ettiği iddia edilmektedir. Şirket, uluslararası standartlar ve güvenlik normlarına uygun olarak geliştirdiği batarya paketinde farklı kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayacak bir yazılım altyapısı sağlamaktadır. Tasarlanan batarya paketi, kablosuz olarak güncellenebilen BMS yazılımını içermektedir. Siro, bundan sonra bölgedeki elektrikli araç üreticilerinin ihtiyaçları doğrultusunda yeni batarya modül ve paketleri geliştirmeyi hedefleyerek batarya pazarındaki etkinliğini artırmayı planlamaktadır. Bu gelişmeler, elektrikli araçların mesafe kapasitelerinin artmasını ve güçlü pil teknolojilerinin gelişmesini sağlayacaktır (URL-42).



Şekil 1.34. Togg otomobili bataryası (URL-43).

Siro'nun açıklamasına göre, Gemlik'teki Togg Teknoloji Kampüsü'nün yanındaki 607 bin metrekarelik arazi üzerinde kurulacak tesis, 20 GW kapasite hedefiyle batarya hücresi üretimine başlayacak. Bölgedeki potansiyel olanaklarla birlikte, 2035'e kadar bu kapasiteyi 50 GW'ye çıkarmayı planlamaktalar. Siro ayrıca, Türkiye'nin yanı sıra 120 ülkeye de otomotiv ve otomotiv dışı alanlarda ihracat gerçekleştirecektir. Siro'nun Batarya Geliştirme ve Üretim Kampüsü'nün inşaatı töreninde TOGG CEO'su M. Gürcan Karakaş konuyla ilgili açıklamalarında şunlara yer vermiştir: Avrupa'da batarya arzı talebin çok gerisinde ve bu durum 2030 yılına kadar devam edecek. Günümüzün çip krizinin yerini önümüzdeki dönemlerde batarya krizi alacak. Doğru zamanda hayata geçirdiğimiz Siro yatırımıyla batarya arz güvenliğini sağladığımız gibi bölgedeki fırsat penceresini yakalayarak sadece ülkemizde değil, 120 ülkeyi kapsayan bir bölgede etkin olacağız. Siro, kuruluşuna öncülük edeceği Türk batarya ekosistemiyle batarya değer zincirinde yaratacağı katma değer yanında ihracat potansiyeli, ithalatı azaltma gücü, sahip olacağı fikri mülkiyet hakları ve nitelikli istihdamı sayesinde çok ciddi bir ekonomik değer ortaya koyacak.” (URL-44).

1.20.2 Northvolt sodyum iyon pil teknolojisi

Northvolt, günümüzde yaygın olarak kullanılanlardan daha uygun maliyetli ve sürdürülebilir olduğu söylenen bir sodyum pilini duyurmuştu. Bu hücre kimyasıyla önceki gelişmelere kıyasla üstün enerji yoğunluğu sunmaktadır. İsveç'in Västerås kentindeki Northvolt Labs'a göre kilogram başına 160 watt saatin üzerinde bir değere ulaşmaktadır. Bu teknolojinin ilk amacı yenilenebilir enerji üretiminin daha ucuz hale getirilmesine yardımcı olmaktır (URL-45).



Şekil 1.35. Northvolt sodyum kesesi (URL-45).

Şekil 1.36`de yer alan northvolt sodyum kesesinde, Anot sert karbondan yapılmıştır, katot ise Prusya beyazına dayanmaktadır Northvolt'un sodyum iyon pilleri, kritik metallerin kullanımını ortadan kaldırmakta ve kWh başına 10-20 kg CO₂ gibi düşük karbon ayak izi ile çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamaktadır. Bu, diğer pillerin kWh başına 100-150 kg CO₂'lik karbon ayak izine kıyasla oldukça önemli bir azalmayı temsil etmektedir. Sodyum kaynaklarının madenciliği ve işlenmesinin lityumdan daha az çevresel etki yaratması, enerji depolama çözümlerin daha sürdürülebilir ve ekonomik açıdan kapsayıcı hale getirmekte, ticari ve büyük araçlar için de uygun bir alternatif sunmaktadır. Sodyum iyon pillerin yaygın kullanımı, pil tedarik zincirinin çeşitlendirilmesine ve belirli bölgelere olan kaynak bağımlılığının azaltılmasına yardımcı olabilir, bu da enerji depolama teknolojisini sosyal ve jeopolitik endişelerle başa çıkmak için daha dengeli ve adil hale getirir. Çevre dostu profilleri, sodyum iyon pillerinin çevresel etkilerini azaltarak sürdürülebilirlik hedeflerine daha iyi uyum sağlamasını sağlarken, enerji depolama teknolojisinin daha geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşmasını ve toplumun her kesimine ekonomik fayda sağlama potansiyelini artırır (URL-46).

1.20.3 Volkswagen katı hal pil testi



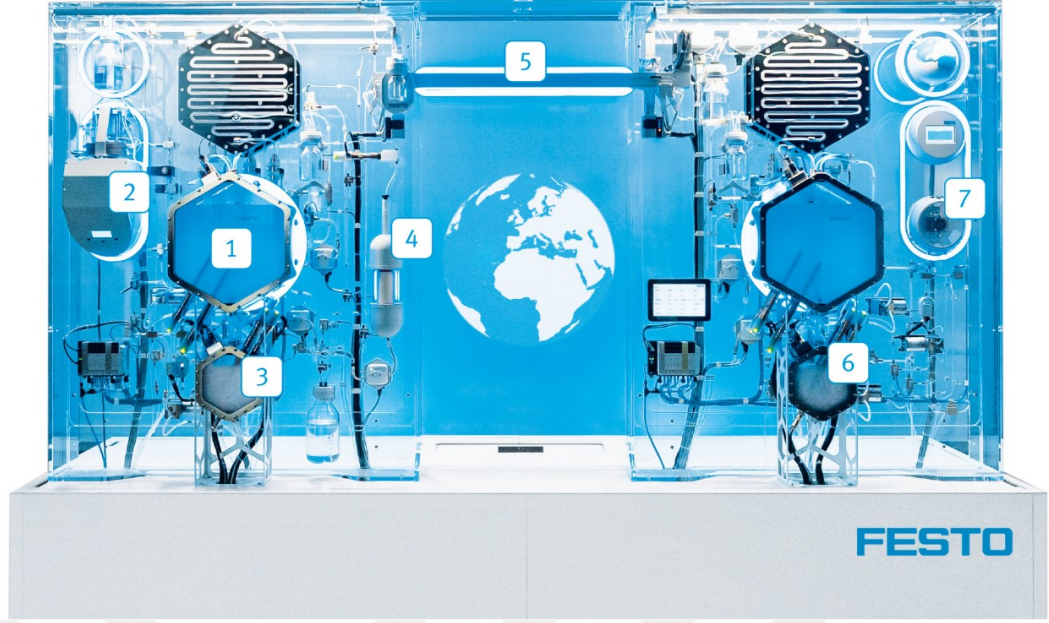
Şekil 1.37. Zwickau'daki VW fabrikasında elektrikli otomobillerin montajı (URL-47).

Katı hal bataryaların sürüş menzili henüz açıklanmasa da VW ve QuantumScape, bataryanın 500.000 kilometre simüle edilmiş sürüşte 1.000 kez boşaltılıp yeniden şarj edildiğini iddia etti. Tahminler veya en iyi tahminler, pilin şarj başına yaklaşık 500 kilometrelik bir sürüş menzili sağlayacağı, yani değiştirilmesi gerekmeden yeterince uzun süre dayanacağı yönündedir. Aslında çoğu araba 500.000 kilometreye veya 310.000 mil ulaşmadan çok önce son dinlenme noktasına ulaşmaktadır. Katı hal piller, elektrikli araçlarla ilgili tüm sorunları çözebilir. Bunun nedeni, aynı depolama kapasitesine sahip lityum iyon pillerinden daha hafif olmaları ve çok daha uzun ömürlü olmalarıdır. Ayrıca, lityum iyon pillerine göre yangına daha az eğilimlidirler, hızlı şarj olma özelliğine sahiptirler, aşırı soğuk hava koşullarında da iyi performans gösterirler ve lityum iyon piller kadar yıpranmazlar. Şekil 1.38'de örnek yer almaktadır. Tüm bu avantajlara rağmen, katı hal piller eski bir teknoloji olmasına rağmen, yakın zamanda sadece işitme cihazları ve giyilebilir cihazlar gibi küçük cihazlarda kullanılmışlardır. Bunları büyük ölçekli uygulamalara entegre etme girişimleri başarılı olmamıştır, bu nedenle yüksek güçlü cihazlarda kullanımları çok keşfedilmemiştir. Ancak, 300.000 mil boyunca hiçbir bozulma belirtisi gösteren bir batarya için gelen haberler umut verici olmaya devam ediyor (URL-48).

1.20.4 Festo biyonik-hidrojen pili

Almanya'nın Hannover şehrinde ki fuar (Hannover Messe 2024) ziyaretim sırasında denk gelmiş olduğum bu teknoloji ilgimi çekmiştir. Thermoanaerobacter kivui (T. kivui) bakterisi, bu biyolojik sürecin merkezindedir. Bu bakteri, ışıksız ve oksijensiz ortamlarda, özellikle de Orta Afrika'daki Kivu Gölü'nün derinliklerinde yaşamaktadır. Özel bir enzime sahip olan T. kivui, hidrojeni (H_2) ve karbon dioksiti (CO_2) formik asit (CH_2O_2) ve formiat iyonuna ($HCOO^-$) doğal olarak dönüştürme yeteneğine sahiptir. Bu özellik temel olarak, Festo'nun yakın işbirliği içinde olduğu Goethe Üniversitesi Frankfurt'taki "Moleküler Mikrobiyoloji ve Biyoenerjetik" bölümü başkanı Prof. Dr. Volker Müller'ın liderliğindeki ekibince araştırılmıştır. Bu biyoteknolojik sistem, hidrojenin güvenli depolanması ve taşınması için çığır açan bir çözüm sunarak, geleneksel depolama yöntemlerinin getirdiği zorlukları aşmaktadır. T. kivui bakterileri, oksijensiz ortamlarda yaşayarak güvenli bir süreç sağlar ve hidrojenin formik aside dönüştürülmesini ılımlı şartlarda gerçekleştirmektedir (URL-49).

Şekil 1.39'de detayları görülen bu sistem, sürdürülebilir ve ekolojik çözümlerin geliştirilmesinde biyolojikleşme kavramını vurgulayarak doğadan öğrenmenin ötesine geçmektedir. Festo ve Goethe Üniversitesi Frankfurt arasındaki işbirliği, BionicHydrogenBattery sistemine entegre edilen çeşitli bileşenlerin teknik detaylarını içermektedir. Toplam 117 farklı ürün tipi, sıvı elleçleme, kontrol, gaz elleçleme ve taşıma gibi çeşitli bileşenleri kapsar, bu da sistemin kapsamlı ve karmaşık yapısını gözler önüne sermektedir. Sonuç olarak, BionicHydrogenBattery, enerji depolama ve taşıma alanında önemli bir ilerleme sağlar. Bakterilerin hidrojeni formik asite dönüştürmesiyle güvenli, sürdürülebilir ve verimli bir çözüm sunmaktadır. Otomasyon teknolojisinin entegrasyonu ve akademik işbirliği, bu yenilikçi sistemin sürdürülebilir enerji çözümlerinde gelecekte kritik bir rol oynamasına olanak tanımaktadır. T. kivui bakterisi anaerobiktir, yani yalnızca oksijensiz ortamda geliştiği anlamına gelmektedir. Sistemde bir sızıntı olduğu takdirde bakteriler anında ölmektedir ve bu nedenle insanlar için herhangi bir risk oluşturmamaktadır. Oksijenin bulunmaması, hidrojenin yanıcı bir karışım oluşturmamasını önlemektedir. Ayrıca, sistem herhangi bir zamanda sadece çok küçük miktarlarda bu maddeyi içermektedir (URL-49).



Şekil 1.40. Hidrojenden formik asite (URL-50).

1: T. kivui bakterisinin bir biyoreaktörde optimize edilmiş koşullar altında çoğaltılır.

2: Hidrojen sudan elektroliz yoluyla üretilir.

3: Bakteriler CO_2 ve hidrojeni formik asite dönüştürür.

4: Asit ekstrakte edilir ve bir kaba konur.

5: Formik asit yeniden dönüşüm yerine güvenli bir şekilde taşınır.

6: Aynı bakteriler formik asidi tekrar hidrojen ve CO_2 bileşenlerine parçalar.

7: Hidrojen, yakıt hücresinde tekrar elektrik enerjisine dönüştürülür.

Festo'nun "Biyonik Hidrojen Pili" iki kısma ayrılmaktadır: Bir tarafta bakteriler hidrojeni formik asite dönüştürürken, diğer tarafta bunun tersi bir süreç gerçekleşmektedir. Sistem tamamen otomatik olarak düzenlenmektedir. Müller, hidrojen pilini Festo ile birlikte daha da geliştirmenin yollarını aramaktadır (URL-49).

1.20.5 Lightyear 0 güneş enerjisi teknolojisi



Şekil 1.41. Ligtyear (URL-51).

Araştırmalarıma göre, Şekil 1.42`de gösterilen Lightyear 0 adlı aracınızı park edip, iki saat sonra geri döndüğünüzde, güneşin aracınızın menzilinizi 20 kilometre artırdığını görebiliyorsunuz. Bu oldukça etkileyici. Güneş enerjisiyle çalışan aracınız, sizi uzakta olsanız bile güneşin enerjisiyle besleniyor ve menzilinizi artırıyor. Ayrıca, bu aracın iklim koşullarına bağlı olarak her yıl 6.000 ila 11.000 kilometre arasında ücretsiz, zahmetsiz ve temiz menzil sağladığı iddia ediliyor. Bunun, gerçekten de çevreci ve sürdürülebilir bir çözüm olduğu söylenebilir. Güneş enerjisiyle çalışan araçlar, sadece kullanıcılara daha fazla menzil sunmakla kalmamakta, aynı zamanda çevreye de zarar vermemektedir. Sürdürülebilir tasarım, Lightyear 0'ın her detayında öne çıkarılmış. Araç, yüksek kaliteli iç mekanıyla dikkat çekmektedir; bitki bazlı deriler, geri dönüştürülmüş PET şişelerinden yapılan kumaşlar ve sürdürülebilir şekilde yeniden yapılandırılmış rattan palmye gibi doğal ve yeniden kullanılabilir malzemelerden üretilmiştir. Bu koleksiyon, tamamen doğal unsurlarla yeni bir perspektif sunarak sürdürülebilirliği ön plana çıkarmaktadır (URL-52).

1.21 Örnek Olay: Bir Pil Üreticisi

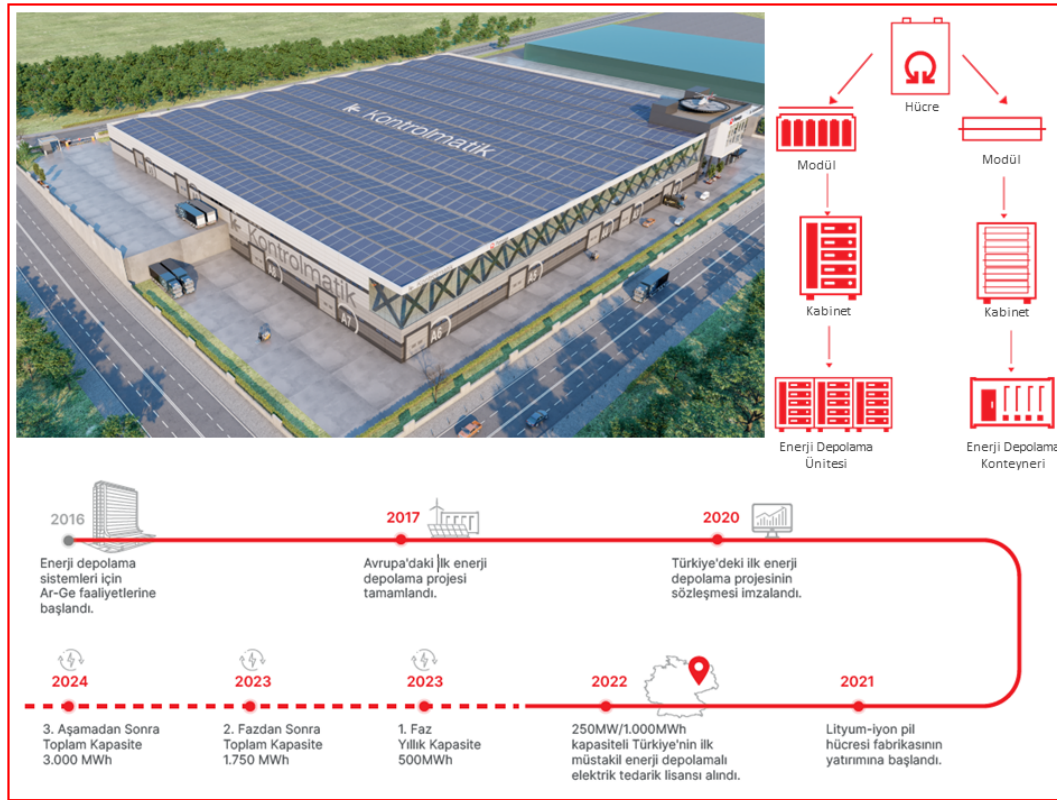
Bu bölümdeki veriler, Pomega Enerji Depolama Teknolojileri'nden Sertaç Yaşar Bey ile gerçekleştirdiğim kişisel bir görüşmeye dayanmaktadır. Yaşar, kıdemli planlama ve tedarik zinciri mühendisi olarak değerli bilgiler sağlamıştır. Tezde bu bilgilerin paylaşılma izni, Sertaç Yaşar Bey tarafından verilmiştir.

1.21.1 Şirket profili ve faaliyetleri

Şekil 1.36'da tarihçesi yer alan Pomega Enerji Depolama Teknolojileri A.Ş., 2021 yılından itibaren Kontrolmatik Teknoloji'nin bir iştiraki olarak faaliyet göstermektedir. Şirket, Türkiye'nin ilk özel sektör yatırımı olan Lityum-İyon (LiFePO_4) Pil Hücresi ve Enerji Depolama Sistemleri Yatırımını başarıyla tamamlamıştır. Bu yatırım, Polatlı, Ankara'da bulunan tesislerinde gerçekleştirilmiş ve 2023 yılının ikinci yarısında 500 MWh kapasite ile faaliyete geçmiştir. Şirket, 2024 yılında yıllık 3 GWh kapasiteye ulaşmayı hedeflemektedir. Ankara Polatlı'daki bu yatırımın birinci aşamasıyla başlayarak dışa bağımlılığın azaltılmasına katkı sağlanacaktır. Toplamda 3.000 MWh kapasiteye ulaşacak olan yatırımın ilk aşaması 500 MWh olup, 3 fazda tamamlanacaktır. Fabrikanın ilk etabının açılmasıyla birlikte 250'den fazla istihdam sağlanması planlanırken, diğer etapların devreye girmesiyle 600 kişilik ek istihdam hedeflenmektedir.

Pomega Enerji Depolama Teknolojileri, Lityum Demir Fosfat (LiFePO_4) pil hücreleri, modüller ve enerji depolama sistemleri üreterek sektörün artan talebine yanıt verecektir. Bu ürünler enerji santralleri, ulusal şebekeler, fabrikalar, ev uygulamaları ve yüksek güç gerektiren alanlar için en uygun çözümleri sunmaktadır. Yatırımın ilk aşaması, Ankara'daki Polatlı Organize Sanayi Bölgesi'nde 100.000 metrekarelik bir alan üzerinde bir fabrikanın satın alınmasıyla başlamıştır. İnşaat çalışmaları 2021 yılı sonunda başlamış ve ilk 500 MWh kapasiteyle 2023'ün ikinci çeyreğinde tamamlanmıştır. Temel ürünler arasında Lityum Demir Fosfat (LFP) Prizmatik Hücre ve Pil Grubu bulunmaktadır. Aynı fabrika altında Pomega, bu temel ürünlerin yanı sıra başka katma değerli ürünler üretecektir. Bu katma değerli ürünler, enerji depolama sistemleri ve e-mobilite alanında çözüm sunan endüstriyel şirketlere satılacaktır (Yaşar, 2024).

Raf Tipi LFP Enerji Depolama, Konteyner Tipi LFP Enerji Depolama, Elektrikli ve Mobil Araç Şarj Sistemleri, Hibrit Yenilenebilir Depolama Konteynerleri ve Enerji Depolama ürünleri gibi çeşitli ürünler, şebeke operatörlerine, elektrik piyasası bileşenlerine, endüstriyel müşterilere ve e-şarj istasyonları işleten şirketlere B2B anahtar teslimi çözümler sunacaktır. Yassı ve SLI Otomobil Aküleri, Harici Enerji Depolama Sistemi ve Raf Tipi UPS Aküleri gibi ürünler ise ilgili pazarlar için B2C ürünleridir. Ayrıca, EV Şarj Teknolojileri, kamyon ve otobüs gibi ağır elektrikli araçlara B2B anahtar teslimi çözümler sunmayı hedeflemektedir (Sertaç Yaşar, Pomega Enerji). Son olarak, Çift Yönlü İnvertör Çözümleri gibi ürünler, tüm enerji depolama sistemleri için kullanılabilir. Pomega firmasının tarihçesi Şekil 1.35’de görülmektedir.



Şekil 1.43. Pomega enerji depolama teknolojileri tarihçesi (Yaşar, 2024).

1.21.2 Çevresel inovasyon ve sürdürülebilir çabalar

Pomega Enerji Depolama Teknolojileri A.Ş. (Pomega), LiFEPO₄ batarya üretim ve enerji depolama teknolojileri fabrikasını Polatlı bölgesi Organize Sanayi Bölgesi'nde bulundurmaktadır. Coğrafi olarak akut iklimsel veya doğal risklerden etkilenmeyen

bir konumda yer almaktadır. Üretim faaliyetleri ekosistem ve gezegen sağlığına zararlı, tehlikeli veya riskli değildir ve çevresel ve sosyal etkilere maruz kalmamaktadır. Üretim sürecinde su kullanılmadığı için oluşan sular evsel niteliktedir ve Organize Sanayi Bölgesi'nin arıtma sistemiyle uyumlu bir şekilde yönetilmektedir (Yaşar, 2024).

Şirketin Sürdürülebilirlik politikası aşağıda maddelerinde belirtildiği gibidir.

- Pomega, güvenli, sürdürülebilir ve yüksek kalitede hizmet sunmayı amaçlar. Kalite Politikası doğrultusunda çevre dostu teknoloji ve ürünler geliştirir. Tüm ürünleri, insan sağlığına ve çevreye zarar vermeyecek şekilde sorumlu bir üretim anlayışıyla üretilir. Şirket, suç teşvik etmeyen, bağımlılık yapıcı maddeleri teşvik etmeyen ve insanları çatışmaya yönlendirmeyen yenilikler geliştirme ve üretme taahhüdünde bulunur.
- İnşaat öncesi Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) olumlu belgesi bulunmaktadır. Fabrikanın kapasite artışıyla ilgili olarak Faz 2 için de ÇED olumlu belgesi alınmıştır. Çevresel izleme süreci, düzenli olarak yürütülmekte ve aylık raporlar halinde sunulmaktadır.
- OSB Atıksu Bağlantı izni mevcuttur. (08.04.2022 tarihli) Atık Yönetim Planı ÇED kapsamında hazırlanmıştır. Çevre İznini müteakip, atık yönetim planı revize edilecektir. Başvuru kapsamında atık toplama ekipmanları temin edilmiş olup, belge başvuru süreci çevre danışmanlık şirketi aracılığı ile devam etmektedir.
- Şirketin Çevre Yönetimi Politikası mevcuttur. Kaynakları verimli kullanmasını taahhüt eder (Yaşar, 2024).

Tesis İnşaat kategorisinde Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik (LEED-Leadership in Energy and Environmental Design) Gold sertifikası, idari bina kategorisinde Platinum sertifikası almaya hak kazanmıştır (resmi başvuru sürecindedir) ve inşaatın başlangıcından itibaren verimlilik, döngüsel ekonomi ve sıfır atık, düşük emisyonlu ekonomi çalışmaları yapmaktadır. Aynı zamanda ek olarak fabrika binası bünyesinde aşağıdaki yatırımlar desteklenecektir;

- 4,32 MW Çatı Üstü Güneş Enerji Santrali
- *Çatı Üstü Yağmur Suyu Hasadı (26.000 m²)
- *LEED Altın/Platin – Sürdürülebilir Bina

- *Enerji ve Aydınlatma Verimliliği
- *Sürdürülebilir Satın Alma: Düşük emisyonlu, yerel satın alma ve geri dönüştürülmüş malzeme içeriği

Enerji yönetimi kapsamında desteklenecek çalışmalar;

- Atık ısı geri kazanım
- Termal PİL Isı Transferi Yönetimi
- Rüzgar Enerjisi Santrali (5 KWh pilot devreye alındı, 250 KW'a kadar artırılacak)

Döngüsel ekonomi ve sıfır atık kapsamında desteklenecek yatırımlar;

- PİL ve Atık Geri Kazanım Projeleri
- Ambalaj geri dönüşümü ve azaltma
- Su ve Atıksu Yönetimi
- İçme Suyu Üretimi
- Tek ve çoklu kullanılan plastiğin transferinin ve kullanımının ortadan kaldırılması (karbon emisyonu)
- Hasarlı üretilen LiFePO₄ hücrelerimiz için geri dönüşüm tesisi (3-5 yıl içerisinde, üretimin son 3. aşamasına kadar)

Kurumsal düzeyde çalışmalar;

- Şirket araçlarımızı hibrit ve elektrikli araçlara dönüştürmeye başlanmıştır.
- İş ve toplantılar için daha fazla teknoloji ve çevrimiçi olanakları kullanılmaktadır.
- Genel Merkez ofisimiz şu anda ilgili uygulamalarla LEED sertifikasyon süreci uyarınca yenilenmektedir: yani ofis alanlarındaki mobilyalarımız FSC sertifikalıdır, çatı üstü güneş enerjisi santraline sahiptir, tek ve çoklu kullanımlı plastiğin transferini ve kullanımını ortadan kaldırmak için kendi kurulu içme suyu tesisine sahiptir (karbon salınımı).

İnşaat aşamasında çıkan atıklar LEED gerekliliklerine göre sahada ayrı toplanmıştır, geri dönüşüme gönderilmiş ve kayıt altına alınmıştır. Çıkan atık su evsel niteliktedir. Atıksu arıtma tesisi yoktur. (Üretimde su kullanılmadığı için ve endüstriyel atıksu çıkışı olmamaktadır. İşletmeden çıkan su evsel niteliktedir ve Polatlı OSB Evsel

Atıksular kanalizasyon sistemine verilmektedir). Çevre Emisyon İzni kapsamında izne esas ölçüm ile belge alındıktan sonra 2 yıllık periyotlarla emisyonlar izlenecektir (Uygunluk Başvurusu için Çevre Danışmanlık hizmeti alınmaktadır). Hava kalitesi izlenmesi amacıyla inşaat döneminde toz ölçümü (imisyon) yaptırılmıştır. İmisyon Raporu mevcuttur (Sertaç Yaşar, Pomega Enerji). Geçici atık sahası mevcuttur, resmi atık sahasının henüz yapımına başlanmamıştır, yapıldıktan sonra izin başvurusu gerçekleştirilecektir. İlgili projeye ait çizim dwg dosyaları mevcuttur. Atık çıkışı MOTAT üzerinden yapılmış ve yapılmaya devam edecektir. Kimyasallar ve tehlikeli atıklar sızdırmaz kaplarda depolanmaktadır. Kimyasal ve tehlikeli atıkların bulunduğu alanlarda kimyasal döküntü kitleri mevcuttur. Döküntü alanına kitler ile müdahale edildikten sonra oluşan kontamine atıklar diğer atıklardan ayrı toplanarak, atık sahasında 15 02 02 atık koduyla lisanslı atık bertaraf firmalarına gönderilene kadar geçici depolanmaktadır. Atık sahasında olası sızıntı/döküntü suyunun toprağa karışmaması için sızıntı suları, sızdırmazlığı sağlanmış ızgara sistemiyle kör kuyuda toplanmaktadır. MOTAT üzerinden lisanslı atık araçlarıyla lisanslı atık firmalarına gönderilmektedir (Yaşar, 2024).

Her yıl mart ayına kadar bir önceki yıla ait ilgili atık çıkışları Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı EÇBS sistemi üzerinden beyan edilir. Tehlikeli madde ve tehlikeli atıkların nakliyesinde ADR uygunluğu için Tehlikeli Madde Güvenlik Danışmanlığı hizmeti alınmaktadır. Oluşan atıklar Çevre Mevzuatı' na uygun olarak tasarlanmış atık sahasında geçici depolanmakta ve “Atık Yönetim Prosedürü” ne göre tehlikeli ve tehlikesiz olarak belirlenen atık kodları ile yönetilmektedir. Lisanslı atık geri dönüşüm/geri kazanım/bertaraf firmaları ile yapılmış olan anlaşmalar sonucu MOTAT online sistemi üzerinden beyanı gerçekleştirilerek, lisanslı araçlar ile gönderilmektedir (Yaşar, 2024).

1.21.3 Karşılaşılan zorluklar ve tavsiyeler

Lityum iyon piller, modern teknolojinin temel taşlarından biri haline gelmiştir ve taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Ancak, bu pillerin üreticileri, teknolojiyi pazara sunarken çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. İşte lityum iyon pil üretiminde karşılaşılan riskler,

Satın alınan hammaddelerin kalite standartlarını karşılamaması;

Satın alınan hammaddelerin istenilen kalite standartlarını karşılamaması, lityum iyon pil üreticileri için önemli bir zorluktur. Bu durum, pil performansını ve ürün kalitesini düşürmektedir. Bu riski azaltmak için, hammadde tedarikçileriyle yakın iş birliği yapılması tavsiye edilmektedir. Önceden belirlenen kalite standartlarına uygunluğu doğrulamak için ilave kalite kontrol testleri yapılmalıdır. Ayrıca, hammadde tedarikçileri arasında çeşitlilik sağlanarak, alternatif malzemelere ve tedarikçilere yönelme stratejisi benimsenebilir. Bu şekilde, hammaddelerin özelliklerinden kaynaklanan risklerin minimize edilebileceği düşünülmektedir (Yaşar, 2024).

Üretim işlemlerinin getirdiği zorluklar;

Lityum iyon pil üretimi sırasında, özellikle optimizasyon işlemleri ve üretim süreçlerinde hatalar meydana gelmektedir. Bu hatalar, ürün kalitesini düşürmektedir ve üretim verimliliğini azaltmaktadır. Üretim işlemlerindeki riskleri azaltmak için, önceden deneyimlerin dikkate alındığı detaylı bir planlama yapılmalıdır. Alanında uzman personellerin katılımıyla, problemlere çözüm odaklı bir yaklaşım benimsenmelidir. Riskin gerçekleşmesi durumunda ise, daha önce denenmiş ve üretimi kanıtlanmış yöntemlerin kullanılarak yeni bir plan tasarlanabilir (Yaşar, 2024).

Yurt dışından getirilen alt bileşenlerin transferindeki zorluklar;

Lityum iyon piller için gerekli olan alt bileşenlerin yurt dışından getirilmesi, lojistik ve tedarik zinciri açısından önemli bir risk taşımaktadır. Tedarik zincirinde yaşanabilecek aksaklıklar, üretim sürecini aksatabilir ve maliyetleri artırabilir. Bu riski azaltmak için, alternatif tedarikçiler önerilerek tedarikçi listesi çeşitlendirilmelidir. Herhangi bir tedarikçiden bir pil bileşeninin temininde problem yaşanması durumunda, farklı bir tedarikçiden benzer ve aynı kalibrede ürün temin edilebilir (Yaşar, 2024).

Formasyon ve güvenlik testlerindeki uygunsuzluklar;

Lityum iyon pil formasyon ve güvenlik testlerinde yaşanabilecek uygunsuzluklar, üreticiler için ciddi bir risk oluşturmaktadır. Formasyon işlemi sırasında özel kabinler kullanılarak güvenlik sağlanmalı ve formasyon işlemi voltaj aralığı belirlenmelidir.

Ancak, formasyon işleminin istenilen ölçekte SEI (Solid Electrolyte Interphase) yaratamaması veya pilin performans ve güvenlik testlerinde başarısız olması durumunda, üretim sisteminde çeşitli modifikasyonlar yapılmalıdır. Testlerin başarılı olmasıyla birlikte ilgili standartlar temin edilebilir (Yaşar, 2024).

Makine ve ekipmanların yurtdışından alınması durumundaki zorluklar;

Makine ve ekipmanların yurtdışından alınması durumunda, döviz kuru dalgalanmaları ve lojistik sorunlar gibi riskler olmaktadır. Bu riskleri azaltmak için, makine sözleşmeleri hazırlanırken sözleşme tutarlarının yerel para birimi üzerinden yapılması ve daha önce çalışılan güvenilir makine tedarikçileriyle iş birliği yapılması önerilmektedir. Ancak, fiyat artışları durumunda daha maliyet avantajlı alternatif ürünler talep edilebilir (Yaşar, 2024).

Enerji maliyetlerinin beklenenden yüksek olması;

Üretim sürecinde enerji maliyetlerinin beklenenden yüksek olması, lityum iyon pil üreticileri için önemli bir maliyet unsuru olmaktadır. Bunun içinde alternatif enerji kaynakları bir çözüm olarak sunulmaktadır (Yaşar, 2024).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, sürdürülebilir pil teknolojileri ve çevresel inovasyon konularında yapılan araştırmalar ve mevcut literatürde yer alan temel kavramlar ele alınmıştır.

Sürdürülebilir pil teknolojileri, çevreye zarar vermeyen ve doğal kaynakları etkin bir şekilde kullanan pil çözümlerini ifade eder. Bu teknolojiler, geleneksel pil üretim süreçlerinden farklı olarak, çevresel etkileri en aza indirmeyi hedefler. Sürdürülebilir pil teknolojileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, geri dönüşüm süreçlerinin geliştirilmesi ve toksik maddelerin kullanımının azaltılması konularında yoğunlaşmaktadır.

Emeksiz ve Kara (2022) enerji depolama teknolojilerinin karşılaştırmalı analizini yaparak, farklı pil teknolojilerinin avantajlarını ve dezavantajlarını değerlendirmişlerdir.

Barut (2019), katı hal lityum iyon pillerin üretimi ve elektrokimyasal karakterizasyonu üzerine yaptığı çalışmada, bu pillerin sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunduğunu vurgulamaktadır.

Wang ve arkadaşları (2019), yaptıkları sodyum-iyon bataryalar için katı hal elektrolit malzemelerindeki son gelişmelerin kapsamlı bir incelemesinde; katı hal elektrolitlerin sodyum-iyon bataryalarındaki kritik bileşenlerden biri olması gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca bol miktarda bulunan sodyum kaynakları sayesinde bu pil teknolojisi sürdürülebilirlik açısından önemli olduğu belirtilmektedir.

Çevresel inovasyon, ürünlerin ve süreçlerin çevresel etkilerini azaltmayı hedefleyen yenilikçi çözümleri ifade eder. Pil teknolojileri bağlamında, çevresel inovasyon geri dönüşüm ve atık yönetimi süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır.

Breiter ve arkadaşları (2023), batarya geri dönüşümünde önemli ilerlemeler kaydedildiğini ve bu süreçlerin çevresel sürdürülebilirliği artırmada kritik bir rol oynadığını belirtmektedir.

Mane ve arkadaşları (2022), elektrikli cihazlarımızın yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgâr) ile şarj edilmesi üzerinde durmuştur. Güneş enerjisinin çevre dostu ve temiz bir enerji kaynağı olduğu vurgulanmıştır.

Porzio ve Scown (2021), pillerin LCA değerlendirmesi üzerinde durmuş ve bu analizin batarya teknolojilerinin çevresel performansını iyileştirmek ve daha sürdürülebilir seçenekler geliştirmek için önemli bilgiler sağladığını belirtmiştir.



3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu araştırmada, sürdürülebilir pil teknolojileri ve çevresel inovasyon konularında literatür taraması yapılmış, yurtdışında düzenlenen enerji depolama ve pil teknolojileri fuarları ziyaret edilmiş, pil geri dönüşümü yapan firmalar ve pil üreticisi firmalardan bilgi toplanmıştır. Araştırmada izlenen yöntemler şu şekilde özetlenebilir:

Literatür taraması: Araştırmanın başlangıcında, sürdürülebilir pil teknolojileri, çevresel etkiler ve geri dönüşüm yöntemleri üzerine geniş kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, Google Scholar, Web of Science, Scopus gibi elektronik veri tabanları ve üniversite kütüphanelerinden yararlanılmıştır. Bilimsel makaleler, kitaplar, raporlar ve sektörel yayınlar incelenerek mevcut bilgiler derlenmiş ve analiz edilmiştir.

Fuar ziyaretleri: Araştırma kapsamında, yurtdışında gerçekleştirilen enerji depolama ve pil teknolojileri fuarları ziyaret edilmiştir. Bu fuarlar sırasında, çeşitli pil üreticileri ve geri dönüşüm firmaları ile görüşmeler yapılmış, yeni teknolojiler ve uygulamalar hakkında bilgi alınmıştır. Fuar ziyaretleri sırasında elde edilen veriler, literatürdeki bilgilerle karşılaştırılarak analiz edilmiştir.

Firmalardan bilgi toplanması: Araştırmanın bir diğer önemli aşaması, pil geri dönüşümü yapan firmalar ve pil üreticisi firmalarla yapılan görüşmeler ve bilgi alışverişidir. Bu firmalardan, mevcut pil geri dönüşüm yöntemleri, sürdürülebilir üretim teknikleri ve çevresel etkiler hakkında detaylı bilgiler toplanmıştır. Elde edilen veriler, araştırmanın bulgularının zenginleştirilmesi ve doğrulanması amacıyla kullanılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada, geleneksel piller ve potansiyel yeni nesil piller arasındaki farklar incelenmiş, her iki teknolojinin avantajları, dezavantajları ve çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Yeni pil teknolojileri; uzun ömürlü, şekil 4.1`de gösterildiği gibi yüksek enerji yoğunluğu sunan, üretimi kolay ve sürdürülebilir enerji depolama çözümlerine yönelik arayışta hızla gelişmektedir.

Çizelge 4.1. Pil Türlerinin avantajları, dezavantajları ve çevresel etkileri

	Avantaj	Dezavantaj	Çevresel Etkiler
Kurşun-Asit Piller	-Düşük maliyetlidir. -Kolay ve basit bakım gereksinimleri vardır. -%97sinden fazlası geri dönüştürülebilir (Reddy, 2011). -Geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilirler (Lach vd., 2019).	-Yüksek kurşun ağırlığından dolayı düşük C oranına sahiptir (Hsu vd., 2024). -Çevrim ömrü düşüktür (Nazghelichi vd., 2021). -Depolama esnasında kendi kendine deşarj olma hızı yüksektir (Nazghelichi vd., 2021). -Kurşun içermesinden dolayı çevre ile uyumsuzdur (Nazghelichi vd., 2021).	-Kurşun toksik ve ağır bir metaldir. - Elektrolit olarak kullanılan sülfirik asit, dökülme ve yanlış bertaraf sonucu toprağı ve suyu asidikleştirebilir. Korozyona sebep olabilir (Zhang vd., 2016). -Kurşun küçük çocuklarda beyin hasarına sebep olabilir. Ek olarak böbreklere zarar verir, duyma bozukluğu, baş ağrısı, öğrenme ve davranış sorunlarına neden olur (URL-53). -Yetişkinlerde sindirim sorunlarına, uyku sorunlarına, kas eklem ağrılarına sebep olur (URL-53).
Nikel Kadmiyum Piller	-Düşük maliyetlidir. -Hızlı şarj edilebilir. -Stoklama ve taşıma kolaylığı vardır. -Soğuk koşullarda çalışabilir (URL- 54).	-NiCd piller kıyaslama yapıldığında NiMH ve diğer şarj edilebilir piller kadar güçlü değildir. -Depolandıklarında kendi kendine deşarj olmaya eğilimlidirler -Diğer şarj edilebilir piller göz önüne alındığında bazı zehirli kimyasallar içerirler (ki bu da onları daha az çevre dostu yapar). - Hafıza etkisi vardır (URL-54).	-İçerdiği kadmiyumdan dolayı çevre dostu olarak kabul edilmemektedir. -Uygunsuz bertaraf veya yanlış kullanım, toprağı ve suyu kirleterek önemli ekolojik tehlikeler oluşturabilir (Beaudin vd., 2015), (Chen vd., 2009), (Reddy, 2011).
Nikel Metal Hidrit Piller	-Diğer şarj edilebilir pillerin aksine, kapasitesi daha yüksektir. -Aşırı şarj ve aşırı deşarj ile mücadele etme yeteneğı vardır ve hafiftir (URL-54).	-Bu piller NiCad ve diğer şarj edilebilir pillerden daha pahalıdır. -Akımı kademeli olarak kesmek yerine aniden kesme ihtimalleri çok yüksektir. -NiCd piller gibi kullanılmadan muhafaza edildiklerinde hızlı bir şekilde kendi kendine deşarj olma eğilimi gösterirler. -Bazıları yalnızca üreticinin kendi şarj cihazıyla uyumludur (URL-54).	-Zehirli toksik maddeler içermezler. -Geri dönüşümleri kolaydır (URL-55).

Çizelge 4.1. (devam) Pil Türlerinin avantajları, dezavantajları ve çevresel etkileri

Sodyum Sülfür	-Uzun süreli enerji depolaması gerektiren uygulamalar için uygundur (URL- 56). -Darbe gücü kapasitesi yüksektir (Fan vd., 2020).	-Yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle özel yalıtım ve soğutma sistemleri gerektirir, bu da önemli termal yönetim zorlukları oluşturur. -Sodyum ve kükürt bileşenleri hava ve nemle reaktiftir. Bu nedenle önleyici tedbirler gerektirir (URL-56). -Kısa döngü ömrüne sahiptir. -Dayanıklılığı beklentileri karşılayamadığı için benimsenememiştir (URL-57)	-Uzun süreli kullanım sağlar, sık değiştirme ihtiyacı olmadığı için atığı azaltır. -Eco-friendly enerji depolama çözümlerine artan odaklanma ile uyumludur. -Sodyum ve kükürt gibi temel bileşenler bol miktarda bulunur (URL- 56). -Ancak 300-350°C sıcaklık aralığında çalışır, bu da fazla enerji kaybı demektir (URL- 56).
Katı Hal Pilleri	-Daha dayanıklı ve daha güvenlidir (URL-58). -Deşarj döngülerinde performans ve kapasitesini korur. -Daha geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilir. -Daha küçük bir alana daha fazla enerji toplayabilir. -Enerji yoğunluğu yüksektir. -Termal kaçaktan kaynaklanan yangın risi azdır. (URL-59)	-Katı hal pillerin önemli bir dezavantajı, katı elektrolitin lityum dendritlerinin oluşumunu tam olarak engelleyememesidir. -Bu, şarj sırasında dendritlerin anoda ulaşması durumunda kısa devreye neden olabilir. -Pillerin deşarj edilmesi sırasında, arayüzeyde delaminasyonlar meydana gelebilir. Bu durum, anot üzerindeki noktaların elektrolitle temasını kaybetmesine yol açabilir (URL-63).	-Üretimlerinde daha az malzeme kullanırlar, bu da iklim etkilerini lityum-ion pillere kıyasla %39'a kadar azaltabilir. -Ek olarak, EV'lerdeki solid-state pillerin azaltılmış ağırlığı, lastik partiküllerinden daha düşük emisyonlara yol açabilir. -Katı hal piller, lityum iyon pillerine kıyasla daha az kritik mineral gerektirir böylece çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir elektrikli araç (EV) ekosistemi sağlayabilir (URL-60), (URL-61). -Yapılan LCA çalışmasında; SSB'lerin LIB'e göre GWP (küresel ısınma potansiyeli) açısından daha düşük çevresel etkiye sahipken, farklı kategorilerde değerlendirildiğinde LIB'e göre daha yüksek çevresel etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bunu düşürmek için döngü ömrünün 100 den 2800 e çıkarılması gerektiği sonucuna varılmıştır. İyileştirmeler yapılması gerektiği vurgulanmıştır (Smith, ve diğerleri, 2021).
Sodyum İyon Piller	-Daha bol bulunan ve uygun fiyatlı malzemeler içermektedir. -Lityum iyon göre üretim sürecinde termal kaçak ve yangın riski daha düşüktür (URL-59).	-Enerji yoğunluğu düşüktür (URL-62). -Şarj etme süresi uzundur (URL-59).	-Karmaşık bir kimyaya sahip olmaması nedeniyle geri dönüşümü basit ve uygun maliyetlidir (URL-62). -Sodyumun bolluğu onları daha sürdürülebilir pil teknolojisi olarak öner çıkarmaktadır (Wang vd., 2019).

Çizelge 4.1. (devam) Pil Türlerinin avantajları, dezavantajları ve çevresel etkileri

Lityum iyon piller	-Enerji yoğunluğu diğer pil teknolojilerine göre yüksektir. -Şarj etme süreleri kısadır (URL-59).	-Pil kimyası karmaşıklığı nedeniyle geri dönüşümü karmaşık ve maliyetlidir. -İç kısa devre ve termal kaçak riski vardır (URL 62). -Koruyucu devre gereksinimi vardır (Fan, ve diğerleri, 2020).	-Lityum madenciliği sonucu habitat tahribatı, toprak ve su kirliliği problemleri oluşur. -Yüksek sıcaklık kullanılırsa, lityum ekstraksiyonun enerji yoğun doğası ile sera gazı emisyonuna artabilir (URL-62).
Akış Pilleri	-Uzun bir döngü ömrüne ve zaman içinde minimum bozulmaya sahiptir (URL-59). -Akışlı pillerde şarj taşıyan elektrolitler ayrı depolandığı için uzun süre kullanılsa bile boşalmaz (URL- 64).	-Enerji yoğunlukları düşüktür. -Sistem, elektrolit akışını yönetmek için pompalar, sensörler ve kontrol üniteleri içerdiğinden, üretimi ve bakımı karmaşık ve pahalıdır (URL-59).	-Akış pillerin atıkları yeniden kullanılabilir ve elektrolitleri çok toksik değildir (URL-64).
Metal Hava Pili	-Yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. -Cn, Zn gibi yaygın malzemeler kullanarak kıt kaynaklara olan bağımlılığı azaltırlar (Salado ve Lizundia, 2022).	-Önemli zorluklardan birisi elektrolit stabilitedir. -Katot malzemeleri, oksijen azaltma ve evrim reaksiyonları (ORR/OER) sırasında yan ürünlerin oluşması nedeniyle zamanla bozunabilir. -Bazı metal-hava pillerin, özellikle de katı veya jel polimer elektrolitlere sahip olanların üretim süreci karmaşık ve maliyetli olabilir (Salado ve Lizundia, 2022).	- Lityum metal hava pilleri, tıpkı lityum iyon pilleri gibi, hammadde çıkarımı esnasında çevresel etkilere yol açabilir. -Daha az toksik madde kullanılarak üretilen metal hava pilleri çevresel faydalar sunabilir (Salado ve Lizundia, 2022).

Bu çalışmada, çeşitli pil teknolojilerinin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Pil türleri arasında kurşun-asit, nikel-kadmiyum (NiCd), nikel-metal hidrit (NiMH), sodyum sülfür, solid-state, sodyum iyon, lityum iyon ve akış pilleri yer almaktadır. Her bir pil teknolojisi, belirli avantajlar sunarken, çevresel ve sürdürülebilirlik açısından farklı zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır.

Kurşun-asit piller, düşük maliyet ve yüksek geri dönüştürülebilirlik oranı (%97) ile sürdürülebilirlik açısından bazı avantajlar sunmaktadır. Ancak, kurşun içeriklerinin toksik doğası, ciddi çevresel ve sağlık sorunlarına neden olmaktadır. Kurşun, toprağa ve suya sızarak ekosistemleri kirlitebilir ve insan sağlığı üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratabilir. Ayrıca, sülfürik asit elektrolitinin dökülmesi durumunda asidifikasyon sorunları ortaya çıkabilir. Bu pillerin geniş çapta kullanımı, sürdürülebilirlik açısından uzun vadede problemleri görünmektedir ve daha çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesi gerekmektedir.

NiCd piller, düşük maliyetli ve dayanıklı olmalarına rağmen, içerdği kadmiyum nedeniyle çevreye büyük zararlar verebilmektedir. Kadmiyum, toksik bir metal olup, uygun olmayan bertaraf yöntemleri sonucunda toprağı ve suyu kirleterek ciddi ekolojik tehlikeler oluşturur. Ayrıca, NiCd pillerin geri dönüştürülmesi zordur ve bu da sürdürülebilirlik açısından olumsuz bir durum yaratmaktadır. Bu pillerin kullanımı, çevresel riskler nedeniyle giderek daha fazla sorgulanmakta ve alternatif teknolojilerin geliştirilmesi teşvik edilmektedir.

NiMH piller, diğer birçok pil teknolojisine kıyasla daha yüksek kapasite ve güvenlik sunmaktadır. Toksik kadmiyum içermemeleri ve geri dönüştürülebilir olmaları, sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağlar. Ancak, NiMH pillerin üretim maliyetleri yüksek olup, kendi kendine deşarj oranı diğer pillere göre daha yüksektir. Bu durum, uzun vadeli depolama gerektiren uygulamalarda dezavantaj yaratabilir. Yine de, çevresel açıdan daha az zararlı olmaları, NiMH pilleri sürdürülebilir enerji depolama çözümleri arasında önemli bir seçenek haline getirmektedir.

Sodyum sülfür piller, uzun ömürlü enerji depolama ve yüksek darbe gücü kapasitesi ile dikkat çekmektedir. Sodyum ve sülfür gibi bol bulunan elementlerden yapılmaları, bu pillerin sürdürülebilirlik açısından potansiyelini artırmaktadır. Ancak, yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle özel yalıtım ve soğutma sistemleri gerektirmesi, enerji verimliliğini ve çevresel sürdürülebilirliği olumsuz etkileyebilir. Yüksek sıcaklık gereksinimi, bu pillerin geniş çapta benimsenmesini sınırlayan bir faktördür. Yine de, temel bileşenlerin bolluğı ve geri dönüşüm potansiyeli, sodyum sülfür pilleri sürdürülebilir enerji çözümleri arasında tutarlı bir seçenek yapmaktadır.

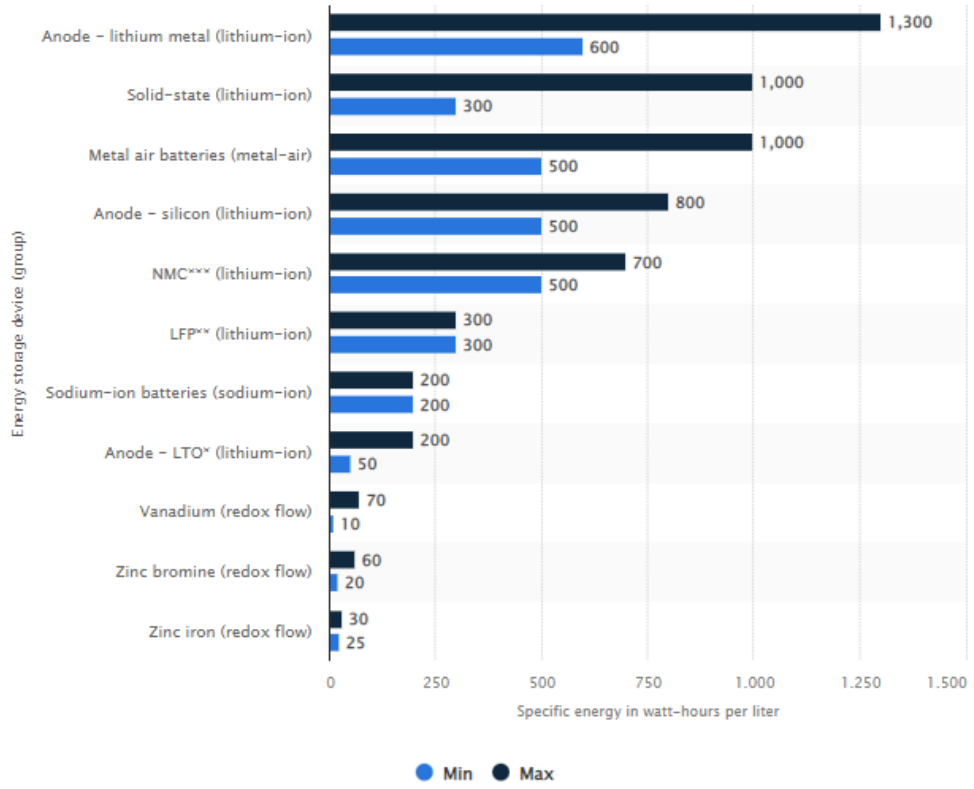
Katı hal pilleri, yüksek enerji yoğunluğu ve güvenlik avantajları ile öne çıkmaktadır. Termal kaçak riskinin düşük olması ve geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilmeleri, bu pillerin güvenli ve verimli bir enerji depolama çözümü sunmasını sağlar. Ayrıca, solid-state pillerin üretiminde daha az malzeme kullanılması ve daha az kritik minerale ihtiyaç duyulması, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak, lityum dendrit oluşumu ve deşarj sırasında arayüzeyde delaminasyon gibi teknik sorunlar, bu teknolojinin daha da geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Katı hal pillerin, gelecekte daha sürdürülebilir bir enerji depolama çözümü olarak önemli bir rol oynayabileceğı değerlendirilmektedir.

Sodyum iyon piller, bol bulunan ve uygun maliyetli malzemelerden yapılması nedeniyle sürdürülebilirlik açısından umut vaat etmektedir. Bu piller, lityum iyon pillere göre daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olsa da, geri dönüşüm süreçlerinin daha basit ve maliyet etkin olması önemli bir avantajdır. Sodyumun bol bulunması, bu pillerin sürdürülebilir enerji çözümleri arasında önemli bir yer edinmesine olanak tanır. Ancak, enerji yoğunluğu ve şarj süreleri gibi performans sorunları, bu pillerin geniş çapta benimsenmesini sınırlayabilir.

Lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunlukları ve kısa şarj süreleri ile modern enerji depolama sistemlerinin temelini oluşturmaktadır. Ancak, lityum madenciliği ve geri dönüşüm süreçleri ciddi çevresel ve sürdürülebilirlik sorunları barındırmaktadır. Lityum madenciliği, habitat tahribatı ve su kirliliği gibi olumsuz etkiler yaratabilir. Ayrıca, lityum iyon pillerin geri dönüşümü karmaşık ve maliyetlidir, bu da çevresel sürdürülebilirlik açısından olumsuz bir durum yaratır. Bu pillerin çevresel etkilerini minimize etmek için, daha verimli geri dönüşüm tekniklerinin geliştirilmesi ve madencilik süreçlerinin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Akış pilleri, uzun döngü ömrü ve zaman içinde minimum bozulma avantajı ile dikkat çekmektedir. Bu piller, şarj taşıyan elektrolitlerin ayrı depolanması nedeniyle uzun süre kullanılsa bile boşalmaz. Elektrolitlerinin toksik olmaması ve atıklarının yeniden kullanılabilir olması, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunar. Ancak, düşük enerji yoğunluğu ve karmaşık üretim ve bakım süreçleri, akış pillerin geniş çapta benimsenmesini zorlaştırmaktadır. Bu teknolojinin daha yaygın ve sürdürülebilir bir enerji depolama çözümü olarak kullanılabilmesi için, üretim süreçlerinin basitleştirilmesi ve enerji yoğunluğunun artırılması gerekmektedir.

Sonuç olarak, her bir pil teknolojisi belirli avantajlar ve dezavantajlar sunarken, çevresel ve sürdürülebilirlik açısından dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Pil teknolojilerinin çevresel etkilerini minimize etmek ve sürdürülebilir enerji depolama çözümleri geliştirmek için, teknolojik iyileştirmeler ve yenilikler sürekli olarak teşvik edilmelidir. Bu değerlendirmeler, enerji depolama sistemlerinin gelecekte daha çevre dostu ve verimli hale getirilmesi için önemli bir temel oluşturmaktadır.



Şekil 4.2. Pillerin enerji yoğunluklarının karşılaştırılması (Statista, 2024; URL-65).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Geleneksel pil teknolojilerinin çevresel etkileri, bu teknolojilerin sürdürülebilir enerji geçişi açısından genel anlamda yetersiz kaldığını göstermektedir. Özellikle üretim ve atık yönetimi süreçlerinde ciddi çevresel sorunlar bulunmaktadır. Yeni nesil pil teknolojileri, enerji yoğunluğu, uzun ömür, hızlı şarj/deşarj süreleri ve düşük maliyet gibi avantajlar sunarak sürdürülebilir enerji depolama çözümlerinde önemli bir potansiyele sahiptir. Sürdürülebilirlik ve Geri Dönüşüm: Pil endüstrisinde sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm süreçlerinin entegrasyonu, doğal kaynakların daha verimli kullanılması ve çevresel etkilerin azaltılması için kritik öneme sahiptir.

Öneriler;

Gelecek araştırmalar için yol haritası:

- Yeni pil teknolojilerinin geliştirilmesi için multidisipliner araştırma projeleri teşvik edilmelidir.
- Bu bağlamda, özellikle sodyum iyon, sodyum sülfür (kükürt) piller gibi çevresel açıdan zararsız ve bol bulunan malzemeler üzerine yoğunlaşılmalıdır.
- Üniversiteler, araştırma kurumları ve endüstri arasında işbirlikleri artırılmalıdır.

Pil geri dönüşüm sistemlerinin geliştirilmesi:

- Mevcut geri dönüşüm teknolojilerinin verimliliği artırılmalıdır. Bunun için yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve mevcut süreçlerin optimize edilmesi gerekmektedir.
- Atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçlerinde yenilikçi yöntemler kullanılarak ekonomik ve çevresel maliyetler azaltılmalıdır.

Sürdürülebilirlik raporlama ve politikalar:

- Pil üreticileri ve tedarik zinciri boyunca tüm paydaşlar, sürdürülebilirlik raporlaması yapmalı (şeffaf raporlama) ve çevresel etkilerini minimize etmek için sürekli iyileştirme çalışmaları yürütmelidir.
- Hükümetler ve uluslararası kuruluşlar, sürdürülebilir pil teknolojilerini teşvik edecek politikalar ve mali teşvikler geliştirmelidir.

Eğitim ve bilinçlendirme:

- Toplumun tüm kesimlerinde çevresel farkındalığı artırmak ve sürdürülebilir pil kullanımını konusunda bilinçlendirme kampanyaları düzenlenmelidir.
- Eğitim kurumlarında, sürdürülebilir enerji ve çevre teknolojileri konularında eğitim müfredatları oluşturulmalıdır.

Yenilikçi pil tasarımları ve uygulama alanları:

- Henüz yaygın olmayan ancak teorik olarak potansiyel taşıyan pil tasarımları için pilot projeler ve prototipler geliştirilmelidir.
- Bu yeni tasarımlar, özellikle yenilenebilir enerji sistemleri, elektrikli araçlar ve taşınabilir elektronikler gibi kritik uygulama alanlarında test edilmelidir.

Potansiyel piller;

Teorik çalışmalar ve simülasyonlar:

- Yeni batarya tasarımlarının teorik modelleri geliştirilerek simülasyonlarla test edilmelidir.
- Bu simülasyonlar, bataryaların performansı, enerji yoğunluğu, güvenlik ve maliyet gibi kriterler açısından değerlendirilmesine olanak tanır.

Malzeme bilimi araştırmaları:

- Yeni batarya tasarımları için uygun malzemelerin keşfi ve geliştirilmesi için malzeme bilimi araştırmaları yürütülmelidir.
- Özellikle çevresel açıdan zararsız, bol bulunan ve ekonomik malzemeler üzerinde yoğunlaşılmalıdır.

Prototip geliştirme ve testler:

- Teorik ve simülasyon çalışmalarının ardından, prototip bataryalar geliştirilerek laboratuvar ortamında test edilmelidir.
- Bu testler, bataryaların pratik uygulamalarda ne kadar başarılı olacağını belirlemeye yardımcı olur.

Pil teknolojileri seçerken dikkate alınması gereken çeşitli faktörler vardır. Bu faktörler, enerjinin verimli ve sürdürülebilir bir şekilde depolanmasını ve kullanılmasını sağlamaya yardımcı olur. İlk olarak, enerji yoğunluğu önemli bir kriterdir. Bu, pilin kilogram başına depolayabileceği enerji miktarını ifade eder (spesifik enerji, Wh/kg). Yüksek spesifik enerji, pilin daha hafif ve taşınabilir olmasını sağlar. Ayrıca, belirli bir hacim başına depolayabileceği enerji miktarı (enerji yoğunluğu, Wh/L) da önemlidir. Yüksek enerji yoğunluğu, daha küçük alanda daha fazla enerji depolanmasını sağlar. Güç yoğunluğu da dikkate alınmalıdır. Bu, pilin kilogram başına verebileceği maksimum güç miktarını ifade eder (W/kg). Yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj ve deşarj kapasitesini artırır, bu da özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalar için önemlidir. Çevresel etkiler, pil teknolojilerinin seçiminde büyük bir rol oynar. Kullanılan hammaddelerin nadirliği ve çıkarılmasının çevresel etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, lityum-iyon pillerde kullanılan kobalt ve lityumun çıkarılması çevresel zararlara neden olabilir. Ayrıca, pilin kullanım ömrü sonunda geri dönüştürülebilirliği ve atık yönetimi de önemlidir. Pil ömrü ve döngü sayısı da kritik faktörler arasındadır. Döngü sayısı, pilin şarj-deşarj döngüsünü kaç kez tamamlayabileceğini gösterir. Yüksek döngü sayısı, pilin daha uzun ömürlü olmasını sağlar. Ayrıca, pilin kullanım süresi boyunca kapasitesini ne kadar koruyabildiği (takvim ömrü) de değerlendirilmelidir. Zamanla kapasite kaybı düşük olan piller daha avantajlıdır. Güvenlik de önemli bir kriterdir. Isıl kararlılığı yüksek olan piller, aşırı ısınma ve yanma riskine karşı daha dayanıklıdır.

Dahili güvenlik mekanizmaları ise pilin aşırı şarj, aşırı deşarj ve kısa devre gibi durumlara karşı korunmasını sağlar. Maliyet faktörü de göz ardı edilmemelidir. Birincil maliyetler, pilin üretim ve satın alma maliyetini kapsar. Düşük maliyetli piller ekonomik açıdan daha avantajlıdır. Ayrıca, işletme ve bakım maliyetleri de dikkate alınmalıdır. Uzun ömürlü ve düşük bakım gerektiren piller tercih edilir. Pil teknolojilerinin şarj ve deşarj süreleri de önemlidir. Pilin tam şarj olma süresi kısa olmalıdır, bu kullanıcılara zaman kazandırır. Ayrıca, pilin kullanım süresi boyunca ne kadar enerji sağlayabileceği, yani deşarj süresi de dikkate alınmalıdır. Uzun deşarj süreleri, cihazların daha uzun süre çalışmasını sağlar. Son olarak, pil teknolojilerinin çalışma sıcaklığı aralığı da değerlendirilmelidir. Bu, pilin verimli çalışabileceği sıcaklık aralığını ifade eder. Geniş sıcaklık aralığında çalışabilen piller, çeşitli iklim koşullarında kullanılabilir.

Her uygulama ve kullanım senaryosu için öncelik verilen kriterler değişebilir, bu nedenle ihtiyaçlara en uygun pil teknolojisini seçmek önemlidir. Lityum iyon piller (LIB'ler) hala mevcut ve büyük ölçekte üretilebilen en güçlü teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Ancak, sodyum iyon piller (SIB'ler), lityum iyon pillerine alternatif olarak değerlendirilebilir. SIB'ler, sodyumun yaygın olarak bulunabilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle öne çıkmaktadır. Enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu açısından lityum iyon pillerine göre biraz daha düşük performansa sahip olsalar da, çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik açısından avantajlıdır. Fosil yakıtların sınırlamaları ve rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili olması nedeniyle, verimli elektrik enerjisi depolamaya yönelik artan bir ihtiyaç vardır. Günümüzde baskın olan LIB'lerin yüksek maliyet ve sınırlı lityum kaynakları gibi zorluklarla karşı karşıya olması, SIB'ler için motivasyon sağlamaktadır (Wang vd., 2019).

SIB ve LIB aynı yapıya sahiptir, ancak farklı malzemeler kullanılmaktadır. LIB'ler için yaygın katot malzemeleri LFP, NCM ve LCM'dir. SIB'ler için ise Geçiş metali oksitleri, Polianyonik bileşikler ve Prusya mavisi analogları gibi üç ana katot malzemesi bulunmaktadır. LIB'lerin anot malzemesi Grafitir. SIB'lerin anot malzemeleri ise gömme tipi, dönüşüm tipi ve alaşım tipi malzemelerdir (örneğin, sert karbon, yumuşak karbon, genişletilmiş grafit). LIB'ler akım toplayıcı olarak katotta Alüminyum folyo anotta Bakır folyo kullanılmaktadır. SIB'ler ise hem katot hem de anot için Alüminyum folyo kullanılır, bu da bataryaların maliyetini büyük ölçüde azaltır. SIB'ler, LIB'lere kıyasla daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen, daha güvenli, düşük sıcaklıklarda daha iyi performans, daha hızlı şarj süresi ve daha uzun çevrim ömrü sunmaktadır. CATL, HiNa Battery ve Natrium Energy gibi şirketlerin öncülüğünde, SIB'ler giderek pratik aşamaya geçmektedir. Önümüzdeki yıllarda, SIB'lerin pazar büyüklüğü artmaya devam edecek ve elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerindeki uygulamaları artacaktır. SIB'ler, şu anda özellikle güneş ve rüzgar enerjisi depolama gibi enerji depolama uygulamaları için daha uygundur ve daha düşük maliyetli, daha geniş hammadde bulunabilirliği ile dikkat çekmektedir. Sodyum iyon batarya teknolojisinin sürekli olgunlaşması ve gelişmesi ile birlikte, SIB'ler mevcut LIB'lerin bir kısmının pazar payını alacak ve önemli bir enerji depolama teknolojisi haline gelerek temiz enerji ve sürdürülebilir kalkınmaya daha büyük katkı sağlayacaktır (Hua, 2023)

SIB'lerin enerji yoğunluğu sorununu çözmek için yeni elektrot malzemeleri geliştirilmektedir. Örneğin, yüksek performanslı elektrot malzemeleri ve yüksek çalışma voltajına sahip katotlar kullanarak enerji yoğunluğu artırılabilir. Çevrim ömrü de genellikle lityum iyon pillerden daha düşüktür. Bu durumu iyileştirmek için, elektrot malzemelerinin yapısal stabilitesini artıran yeni bileşimler ve kaplamalar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca, elektrolitlerin optimize edilmesiyle de pilin uzun ömürlü olması sağlanabilir (Zhao vd., 2023).

Katı hal elektrolit teknolojilerinin gelişimi, Sodyum İyon Pillerin (SIB'ler) güvenliği ve döngü ömrü üzerinde önemli iyileştirmeler sağlayarak, bu iki pil teknolojisinin birleşiminin kullanım alanlarını genişletebilir. Katı hal elektrolitler, sıvı elektrolitlerde karşılaşılan sızıntı ve yanma risklerini ortadan kaldırarak daha güvenli bir pil kullanımı sağlar. Ayrıca, geri dönüştürülebilirlik ve atık yönetimi gibi çevresel faktörler, katı hal SIB'ler için olumlu özellikler arasında yer almaktadır. Katı hal elektrolitler, inorganik seramik/cam-seramik, organik polimer ve seramik-polimer kompozit elektrolitler olarak kategorize edilebilir. Her tip, mekanik dayanım, termal/kimyasal kararlılık ve üretim kolaylığı açısından farklı avantajlar sunmaktadır. İyonik iletkenlik, elektrolitler için pil performansını etkileyen kritik bir özelliktir. Katı hal elektrolitler, genellikle sıvı elektrolitlere kıyasla daha düşük iletkenliğe sahip olmakla birlikte, bu alanda önemli gelişmeler kaydedilmektedir. Gelişmiş güvenlikleri ve potansiyel olarak daha düşük üretim maliyetleri nedeniyle, katı hal SIB'lerinin taşınabilir elektronik cihazlar, elektrikli araçlar ve şebeke ölçeğinde enerji depolama gibi çeşitli sektörlerde uygulama bulması beklenmektedir. Bu özellikler, katı hal SIB'lerin gelecekte enerji depolama teknolojilerinde önemli bir rol oynamasına katkı sağlayacaktır (Wang vd., 2019).

Örneğin, Çin'in Dongfeng Motor şirketi, 2023 yılında Nammi 01 modelini tanıtarak elektrikli araçlar alanında önemli bir yeniliğe imza atmıştır. Bu model, hem sodyum iyon kimyasına hem de katı hal elektrolit teknolojisine sahip ilk otomobil olarak dikkat çekmektedir. Dongfeng'in, Ganfeng Lithium ile iş birliği yaparak 2018 yılından bu yana katı hal pilleri üzerinde çalıştığı ve Ganfeng'in lityum madenciliği ve işleme konusundaki uzmanlığından faydalandığı bilinmektedir. Nammi 01'in Guangzhou Otomobil Fuarı ile eş zamanlı olarak tanıtılması, bu modelin global pazarda ses getirmesi adına stratejik bir hamle olarak değerlendirilebilir. Nammi 01'in sodyum iyon bataryası, maliyet etkinliği ve performans açısından önemli avantajlar

sunmaktadır. Özellikle 8 dakikada 200 kilometre menzil sağlayacak hızlı şarj kapasitesi, kullanıcı deneyimini olumlu yönde etkileyebilir. Nammi 01'in lansmanı, elektrikli araç teknolojisinde yenilikçi bir adım olarak öne çıkmaktadır. Sodyum iyon kimyası ve katı hal elektrolit teknolojilerini bir araya getiren bu model, batarya maliyetlerini düşürme ve hızlı şarj olabilme yeteneği ile dikkat çekmektedir. Bu yeni pil teknolojisinin güvenlik ve performans testlerinin titizlikle yapılması gerekmektedir. Yeni malzeme kombinasyonlarının uzun süreli stabilitesi ve güvenliği sağlanmalı, pil ömrü boyunca performansın sürdürülebilirliği doğrulanmalıdır. Bu testler, laboratuvar ortamında ve gerçek dünya uygulamalarında gerçekleştirilerek, elde edilen veriler doğrultusunda gerekli iyileştirmeler yapılmalıdır. Bu titiz değerlendirme süreci, Nammi 01'in güvenlik ve performans açısından beklenen standartları karşılamasını ve bu alanda sürdürülebilir bir başarı sağlamasını temin edecektir (URL-66).

Örneğin, Alman Katı Hal Sodyum Sülfür pili çalışmalarında, Alman araştırma ekibinin iki yıl boyunca yürüttüğü araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda katı hal sodyum-sülfür pil üretim sürecinde elde edilen başarıları ve yenilikleri bulunmaktadır Ekip; yüksek vakum, otomasyon, nükleer fizik ve manyetik levitasyon konusundaki derin uzmanlığını birleştirerek çalışmıştır. Bu süreçte katı hal pil teknolojisindeki yanlış anlamaları düzelterek ve teknik eksiklikleri gidererek önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. İyon baskı ve gözenekli akım toplayıcıları uygulanması, sodyum-kükürt pillerin vakum ortamında tamamen otomatik olarak üretilmesini sağlamıştır. Bu yeniliklerin, pil performansını önemli ölçüde artırmış, üretim maliyetlerini düşürmüş ve üretim kapasitesini arttırdığı iddia edilmektedir. Katı hal sodyum-kükürt pillerin bol bulunan ve düşük maliyetli (lityuma kıyasla sodyum ekstraksiyon maliyetleri daha düşük) malzemeler kullanarak daha ekonomik bir enerji depolama çözümü sunduğunu ve bunun da temiz enerjiye geçişi hızlandırabileceğini belirtmişlerdir. Alman araştırma ekibi, Çin ve Almanya'daki üniversitelerle işbirliği yaparak ortak araştırma ve geliştirme merkezleri ve deneme üretim hatları kurmuşlardır. Bu yılın sonuna kadar ekipman prototipleri ve pil örneklerinin açıklanması, gelecek yılın sonuna kadar ise seri üretim kapasitesinin duyurulması beklenmektedir. Bu atılımın, insanlık için yeşil bir geleceğe doğru önemli bir adımı temsil edeceği öngörülmektedir (URL-67).

Diğer bir örnek Cerenergy pilleridir. Bu pil sodyum iyonlarını ileten ancak elektronları yalıtıran seramik bir tüp içeren bir katı hal pil teknolojisidir. Bu seramik tüp, lityum-iyon pillerdeki sıvı elektrolit yerine geçer ve hızlı sodyum iyon transferine izin veren mikro yapılara sahiptir. Tüp, sofr tuzu ve nikelden oluşan katot granülleri ile doldurulur ve sodyum alüminyum klorür ortamında bulunur. Seramik tüp, negatif terminal olarak görev yapan çelik bir teneke kutuya yerleştirilmiştir. Elektron transferi ve hücre bağlantıları için pozitif ve negatif terminal sekmeleri hücrenin üst kısmına monte edilmiştir. Her hücre 2.58V'de çalışır ve 40 hücreden oluşan bir modül 10 kWh ve 100 Ah kapasiteye sahiptir. Kobalt, grafit, bakır ve lityum kullanılmadığı için malzeme tedarik riski bulunmamaktadır. Bu pillerin, yüksek enerji yoğunluğu, zorlu çalışma koşullarında mükemmel performans ve uzun döngü ömrü sunduğu, ayrıca düşük çevresel etkiye sahip olduğu iddia edilmektedir (URL-68).

KAYNAKLAR

- Barut, N. G., 2019. Katı Hal Li İyon Pillerinin Üretimi Ve Elektrokimyasal Karakterizasyonu Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Bäuerlein, P., Antonius, C., Löffler, J. ve Kümpers, J., 2008. Progress in high-power nickel–metal hydride batteries. *Journal of Power Sources*, 176, 547-554.
- Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberg, A. ve Rosehart, W., 2014. Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources. *Energy Storage Smart Grids Plan. Oper. Renew. Var. Energy Resour*, 14, 1-33.
- Breeze, P., 2018. *Power system energy storage technologies*. New York: Academic Press.
- Breiter, A., Linder, M., Schuldt, T., Siccado, G. ve Vekić, N., 2023. Battery recycling takes the driver's seat. *McKinsey & Company*, 13.
- Cao, W., Zhang, J. ve Li, H., 2020. Batteries with high theoretical energy densities. *Energy Storage Mater.* 26, 46-55.
- Cempel, M. ve Nikel, G., 2006. Nickel: A Review of Its Sources and Environmental Toxicology. Department of Environmental Toxicology, Interfaculty Institute of Maritime and Tropical Medicine, Medical University of Gdańsk, Powstania Styczniowego 9B, 81-519 . Gdynia, Poland: Review Papier.
- Chen, H. S., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y. ve Ding, Y., 2009. Progress in electrical energy storage systems: a critical review. *Progress in Natural Science* 19, 291-312.
- Collin, R., Miao, Y., Yokochi, A. ve Enjeti, P., 2019. Von Jouanne, A. Advanced electric vehicle fast-charging technologies. *Energies*, 12, 1839.
- Degen, F., Diehl, M., Hettesheimer, T., Kampker, A., Krätzig, O., Lackner, N., Wicke, T., 2023. Umfeldbericht zu Natrium-Ionen-Batterien 2023: Status Quo und Perspektiven entlang einer zukünftigen Wertschöpfungskette. *Fraunhofer*.
- Efe, Ş., ve Güngör, Z., 2021. Geçmişten günümüze batarya teknolojisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 32, 947-955.
- Emeksiz, C. ve Kara, B., 2022. Enerji depolama teknolojilerinin incelenmesi ve karşılaştırmalı analizi. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 6, 134-142.
- Eröztürk, B., 2004. Cep telefonu pillerinin asidik ortamda çözündürülerek metal miktarlarının tespiti ve hidroksitleri şeklinde çöktürülmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Fan, X., Liu, B., Liu, J., Ding, J., Han, X., Deng, Y., Zhong, C., 2020. Battery technologies for grid-level large-scale electrical energy storage. *Transactions of Tianjin University*, 26, 92-103.
- Feng, B., 2023. Separating fact from fiction: The truth about graphene batteries. *Journal Of Advanced Energy Materials*, 29, 195-202.
- Fu, X., Beatty, D. N., Gaustad, G. G., Ceder, G., Roth, R., Kirchain, R. E., Olivetti, E. A., 2020. Perspectives on cobalt supply through 2030 in the face of changing demand. *Environmental Science & Technology*, 54, 45-52.
- Gifford, S., 2022. The Gigafactory Boom: The Demand for Battery Manufacturing in the UK; FARADAY INSIGHTS; The Faraday Institution: Cambridge, UK .
- Granholm, J., 2021. National Blueprint for Lithium Batteries 2021–2030; U.S. Department of Energy: Washington, DC, USA .
- Gua, X., Bai, H., Cui, X., Zhu, J., Zhuang, W., Li, Z. ve Song, Z., 2023. Challenges and opportunities for second-life batteries: A review of key technologies and economy. *Journal of Energy Storage*, 61, Article 106859
- Gurung, A. ve Qiao, Q., 2018. Solar charging batteries: advances, challenges, and opportunities. *Joule*, 2, 1217-1230.
- Güler, Ç., 2012. Atık Piller. Çevre sağlığı, çevre ve ekoloji bağlantılarıyla içinde (s. 645-660. Ankara: Yazıt Yayıncılık.
- Hsu, C., Ajaj, Y., Ghadir, G. K., Al Timimi, H. M., Alani, Z. K., Almulla, A. A., Kianfar, E., 2024. Rechargeable Batteries for Energy Storage: A review. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 100510.
- Hua, Z., 2023. Comparative study of commercialized sodium-ion batteries and lithium-ion batteries, School of Chemistry and Materials Science, Hubei Engineering University, Xiaogan, Hubei, 432000, China. *Applied and Computational Engineering*, 2, 233-239.
- Itani, K. ve De Bernardinis, A., 2023. Review on new-generation batteries technologies: trends and future directions. *Energies*, 16, 7530.
- Kahvecioğlu, Ö., Kartal, G., Güven, A. ve Timur, S., 2003. Metallerin çevresel etkileri. İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.
- Kuchhal, P. I. Y. U. S. H. ve Sharma, U. C., 2019. Battery waste management. *Environmental science and engineering*, 5, 141-155.
- Kul, B., 2020. Geçmişten günümüze piller. *Takvim-i Vekayi*, 8, 104-115.

- Kurtulmuş, Z. N. ve Karakaya, A., 2023. Review of lithium-ion, fuel cell, sodium-beta, nickel-based and metal-air battery technologies used in electric vehicles. *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 10, 103-113.
- Küçükdeveci, N., 2018. Şarj edilebilir nikel-metal hidrür (ni-mh) pillerinde kullanılan hidrojen depolama alaşımlarındaki son gelişmeler. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7, 454-472.
- Lach, J., Wróbel, K., Wróbel, J., Podsadni, P. ve Czerwinski, A., 2019. Applications of carbon in lead-acid batter. *Journal of Solid State Electrochemistry*, Volume 23, 693–705.
- Liu, P. J., Chen, T. F. ve Yang, H. S., 2021. A li-ion battery charger with variable charging current and automatic voltage-compensation controls for parallel charging. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10, 997-1006.
- Liu, W., Placke, T. ve Chau, K. T., 2022. Overview of batteries and battery management for electric vehicles. *Energy Reports*, 8, 4058-4084.
- Mane, P., Sharma, A., Trivedi, K., Kaustubh, P. ve Sanap, H., 2022. Solar battery charger. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 9, 45-52.
- Bhargav, A., He, J., Gupta, A. ve Manthiram, A., 2020. Lithium-sulfur batteries: attaining the critical metrics. *Joule*, 4, 285-291.
- Mathieu, C., 2019. The European Battery Alliance is Moving up a Gear; Edito de l'Ifri: Paris, France.
- Md Rahman, A., Wang, X. ve Wen, C., 2013. High Energy Density Metal-Air Batteries: A Review, Faculty of Engineering and Industrial Science, Swinburne University of Technology, Hawthorn.
- Mierlo, J. V., Messagie, M. ve Rangaraju, S., 2017, December. Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment . *Transportation Research Procedia* 25, 3439-3449.
- Mohan Babu, C. ve Bhanu, U. U., 2023. Metal air battery. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 5, 2119-2122
- Muralikrishna, I. V. ve Manickam, V., 2017. Environmental management: Science and engineering for industry. Butterworth-Heinemann.
- Nazghelichi, T., Torabi, F. ve Esfahanian, V., 2021. Reducing the charging time of a lead-acid cell in the sense of linear stability analysis. *Journal of Energy Storage*, 36, 102369.

- Newton, G. N., Johson, J., Walsh, D. A. ve Hwang, B. J., 2021. Sustainability of battery technologies: today and tomorrow. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 9, 19, 6507–6509.
- Nogueria, C. A. ve Margarido, F., 2007. Chemical and physical characterization of electrode materials of spent sealed ni–cd batteries, *Waste Manag*, 27, 1570–1579.
- Özcan, Ö. F., Karadağ, T., Altuğ, M. ve Özgüven, Ö., 2021. Elektrikli araçlarda kullanılan pil kimyasallarının özellikleri ve üstün yönlerinin kıyaslanması üzerine bir derleme çalışması. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8, 276-298.
- Porzio, J. ve Scown, C. D., 2021. Life-cycle assessment considerations for batteries and battery materials. *Advanced Energy Materials*, 11, 2100771.
- Quist, Z., 2024. Life cycle assessment (LCA) – Everything you need to know. *Ecochain*.
- Reddy, T. B., 2011. *Linden’s Handbook of Batteries*, New York: McGraw-Hill.
- Root, M., 2010. *The TAB Battery Book: An In-Depth Guide to Construction, Design, and Use*. New York: McGraw-Hill.
- Salado, M. ve Lizundia, E., 2022. Advances, challenges, and environmental impacts in metal–air battery electrolytes. *Materialstoday Energy*, 28, 101064.
- Schleussner, C., Rogelj, J., Schaeffer, M., Lissner, T., Licker, R., Fischer, E. and Hare, W., 2016. Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperatue goal. *Nat. Clim. Chang.*, 6, 827-835.
- Schumm, B., 2024. Battery, *Encyclopaedia Britannica*.
- Shepard, J., 2022. What are six key considerations when choosing a Li-ion battery chemistry?, *Battery Power Tips*.
- Sikora, A., 2021. European Green Deal—Legal and financial challenges of the climate change. In *Era Forum*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
- Smith, L., Ibn-Mohammed, T., Astudillo, D., Brown, S., Reaney, I. M. ve Koh, S. L., 2021. The role of cycle life on the environmental impact of $\text{Li}_{6.4}\text{La}_3\text{Zr}_{1.4}\text{Ta}_{0.6}\text{O}_{12}$ based solid-state batteries. *Advanced Sustainable Systems*, 5, 2000241.
- Stephan, A., Hettesheimer, T., Neef, C., Schmaltz, T., Link, S., Stephan, M. and Thielmann, A. 2023. *Alternative Battery Technologies Roadmap 2030+*, Fraunhofer ISI.
- Sun, X., Hao, H., Hartmann, P., Liu, Z. ve Zhao, F., 2019. Supply risks of lithium-ion battery materials: An entire supply chain estimation, 14, 100347.

Şenocak, N., 2022. Akış Pili (Flow Battery) nasıl çalışır ? Amatör Teknik, Piller-210b.

Tamyürek, B. ve Nichols, D. K., 2004. Performance analysis of sodium sulfur battery in energy storage and power quality applications. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17, 99-115.

URL_1<UK 2035 petrol and diesel ban: what is it and what cars are affected? <https://www.autoexpress.co.uk/tips-advice/108960/uk-2035-petrol-and-diesel-ban-what-it-and-what-cars-are-affected>>, Erişim Tarihi: 08.06.2023.

URL_2<Tackling the Climate Crisis at Home and Abroad. <https://www.federalregister.gov/documents/2021/02/01/2021-02177/tackling-the-climate-crisis-at-home-and-abroad>.>, Erişim Tarihi: 01.07.2023.

URL_3<<https://www.cleanenergyministerial.org/resource/3m-global-energy-management-implementation-case-study-copy/>>, Erişim Tarihi: 12.07.2023.

URL_4<BloombergNEF: Lithium-Ion Battery Cell Densities Have Almost Tripled Since 2010. <https://cleantechnica.com/2020/02/19/bloombergnef-lithium-ion-battery-cell-densities-have-almost-tripled-since-2010/>>, Erişim Tarihi: 12.07.2023

URL_5<Volumetric Energy Density of Lithium-ion Batteries Increased by More than Eight Times Between 2008 and 2020. <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1234-april-18-2022-volumetric-energy-density-lithium-ion-batteries>>, Erişim Tarihi: 12.07.2023.

URL_6<<https://www.esource.com/report/130221hvfd/battery-market-forecast-2030-pricing-capacity-and-supply-and-demand>>, Erişim Tarihi: 12.07.2023.

URL_7<<https://cicenergigune.com/en/blog/gigafactories-europe-commitment-economic-recovery-battery-factories>>, Erişim Tarihi: 12.07.2023.

URL_8<<https://bilgi.zone/batarya-teknolojisinin-tarihsel-gelisimi-elektrik-enerjisinin-yolculugu>>, Erişim Tarihi: 20.07.2023.

URL_9<https://tr.wikipedia.org/wiki/Kuru_pil>, Erişim Tarihi: 17.09.2023.

URL_10<<https://edison.media/verkehr/die-evolution-der-autobatterie-und-was-da-noch-kommt/25243196/>>, Erişim Tarihi: 31.12.2023.

URL_11<<https://www.egmdss.com/gmdsscourses/mod/page/view.php?id=976>>, Erişim Tarihi: 31.12.2023.

URL_12<<https://www.gray.com/insights/5-new-battery-technologies-that-will-change-the-future>>, Erişim tarihi: 05.01.2024.

URL_13<<https://greenauthority.com/10-alternatives-to-lithium-ion-batteries-79/>>, Erişim tarihi: 05.01.2024.

URL_14<<https://www.incitas.com.tr/bilgi-merkezi/blog/kursun-asitli-akunun-tarihi-ve%20dogusu#:~:text=Kur%C5%9Fun%20asit%20ak%C3%BC%20de%20kul lan%C4%B1ma,%C5%9Farjl%C4%B1%20bataryalar%20ticari%20hizmete%20sunulmu%C5%9Ftu>>, Erişim tarihi: 05.01.2024.

URL_15<<https://www.netscribes.com/ev-battery-technology-evolution>>, Erişim tarihi: 20.05.2024.

URL_16<https://tr.wikipedia.org/wiki/Lityum_ıyon_pil#cite_note-NAE-11>, Erişim Tarihi:15.02.2024.

URL_17<<https://dijitallevren.com/2021/06/17/dunyayi-degistirebilecek-pil-teknolojisi-lityum-metal-kati-hal-pilleri/>>, Erişim Tarihi: 13.07.2023.

URL_18<https://tr.wikipedia.org/wiki/Kat%C4%B1_hal_pili#:~:text=Kat%C4%B1%20hal%20pili%2C%20lityum%20ıyon,elektrolit%20kullanan%20bir%20pil%20teknolojisi>, Erişim Tarihi: 27.08.2023

URL_19<<https://www.greencarcongress.com/2022/07/20220721-minviro.html>>, Erişim Tarihi: 27.08.2023

URL_20<https://www.chip.com.tr/haber/samsungdan-pillerin-kaderini-degistirecek-adim-kati-hal-pilleri-geliyor_160763.html>, Erişim Tarihi: 15.12.2023.

URL_21<<https://futureflow.life/toyota-kati-hal-pilleri-seri-uretime-gececek/>>, Erişim Tarihi: 25.10.2023.

URL_22<<https://www.tycorun.com/blogs/news/lithium-sulfur-battery-vs-lithium-ion-battery>>, Erişim Tarihi: 19.05.2024.

URL_23<<https://tr.euronews.com/2020/01/28/birkac-yil-icerisinde-lityum-ıyon-bataryanın-yerini-lityum-sulfur-alabilir>>, Erişim Tarihi: 25.09.2023.

URL_24<<https://www.donanimhaber.com/yeni-lityum-kukurt-bataryalar-bes-kat-daha-fazla-kapasite-sunacak--170037>>, Erişim Tarihi: 27.11.2023.

URL_25<https://tr.wikipedia.org/wiki/Sodyum_ıyon_pil>, Erişim Tarihi: 08.01.2024.

URL_26<<https://www.linkedin.com/pulse/sodium-ion-batteries-advantages-challenges-ricky-luo-toqhc/>>, Erişim Tarihi: 12.05.2024.

URL_27<<https://kimyahaberleri.com/2017/02/sodyum-ıyon-pillerdeki-yeni-buluslar-onlari-yenilenebilir-enerji-de-on-plana-cikarabilir/>>, Erişim Tarihi: 08.08.2023.

URL_28<<https://tr.wikipedia.org/wiki/Pil>>, Erişim Tarihi: 19.04.2024.

URL_29<https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/Klimaneutrale_Batterieproduktion/59_klimaneutrale_Batterieproduktion.pdf>, Erişim Tarihi: 24.12.2023.

- URL_30<<https://captn.sh/batterien-lithium-ionen-und-alternative-akkus/>>, Erişim Tarihi: 24.01.2023.
- URL_31<<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/Batteriezellfertigung/batteriepass.html>> , Erişim Tarihi: 25.12.2023.
- URL_32<<https://www.ifam.fraunhofer.de/de/magazin/nachhaltige-batterien.html>>, Erişim Tarihi: 12.04.2023.
- URL_33<<https://www.electrifying.com/blog/article/how-byd-technology-delivers-battery-longevity>>, Erişim Tarihi: 17.12.2023.
- URL_34<<https://edison.media/verkehr/die-geheimnisse-der-blade-batterie-von-byd/25238847/>>, Erişim Tarihi: 25.12.2023.
- URL_35<<https://eepower.com/news/abb-northvolt-partnership-expands-to-battery-recycling/#:~:text=Emerging%20Industry%20for%20Battery%20Recycling&text=For%20Northvolt%2C%20the%20company's%20goal,from%20recycled%20materials%20by%202030>>, Erişim Tarihi: 12.12.2023.
- URL_36<<https://edison.media/verkehr/die-evolution-der-autobatterie-und-was-danoch-kommt/25243196/>>, Erişim Tarihi: 02.01.2024.
- URL_37<<https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Wald/wwf-study-green-responsible-batterie-production-eu.pdf>>, Erişim Tarihi: 12.01.2024.
- URL_38<<https://www.mkcmetal.com.tr/pil-geri-donusum>>, Erişim Tarihi: 08.02.2024.
- URL_39<<https://battery-news.de/en/2024/01/19/battery-recycling-in-europe-as-of-january-2023/>>, Erişim Tarihi: 08.02.2024.
- URL_40<<https://northvolt.com/recycling/> adresinden>, Erişim Tarihi: 08.02.2024.
- URL_41<<https://www.elektriklihaber.com/elektrikli-otomobillerin-gelecegi-ve-batarya-geri-donusumu.html#:~:text=Pil%20geri%20d%C3%B6n%C3%BC%C5%9F%C3%BCm%C3%BCndeki%20bir%20di%C4%9Fer,ve%20bertaraf%C4%B1nC4%B1n%20%C3%A7evresel%20etkisini%20azalt%C4%B1r>>, Erişim Tarihi: 08.02.2024.
- URL_42<<https://tr.motor1.com/news/663971/siro-silk-road-batarya-tesisi/>>, Erişim Tarihi: 17.12.2023.
- URL_43<<https://www.trthaber.com/foto-galeri/togg-araclarinin-batarya-bolumleri-sergilendi/55920/sayfa-3.html>> , Erişim Tarihi: 17.12.2023.
- URL_44<<https://temizenerji.org/2023/04/25/turkiye-kendi-batarya-hucrelerini-gelistirip-uretecek/>>, Erişim Tarihi: 20.05.2024.

- URL_45<<https://www.heise.de/news/Natrium-Batterie-von-Northvolt-soll-Gewinnung-erneuerbarer-Energien-verbilligen-9535845.html>>, Erişim Tarihi: 20.05.2024.
- URL_46<<https://northvolt.com/articles/insights-from-cop28/#:~:text=Featuring%20a%20salt%2Dbased%20Prussian,20%20kg%20CO2%20per%20kWh>>, Erişim Tarihi: 25.05.2024.
- URL_47<<https://www.spiegel.de/auto/feststoffzellen-batterie-besteht-langzeittest-a-ef9de7a5-162d-4b7c-ae1e-b221c37c17da>>, Erişim Tarihi: 20.04.2024.
- URL_48<<https://www.vwofakron.com/blogs/1469/new-vw-models/volkswagen-tests-new-solid-state-battery-that-shows-no-signs-of-degradation-over-300000-miles/>>, Erişim Tarihi: 20.05.2024.
- URL_49<https://www.festo.com/de/en/e/about-festo/research-and-development/bionic-learning-network/bionichydrogenbattery-id_1884271/>, Erişim Tarihi: 26.04.2024.
- URL_50<https://www.festo.com/de/de/e/ueber-festo/forschung-und-entwicklung/bionic-learning-network/bionichydrogenbattery-id_1884271/>, Erişim Tarihi: 26.04.2024.
- URL_51<<https://cars.usnews.com/cars-trucks/features/solar-powered-lightyear-0-production-begins>>, Erişim Tarihi: 20.05.2024.
- URL_52<<https://lightyear.one/lightyear-0>>, Erişim Tarihi: 20.05.2024.
- URL_53<<https://iwaste.epa.gov/rpts/BatteryManagement.pdf>>, Erişim Tarihi: 30.06.2024.
- URL_54<<https://www.birikimpilleri.com/tr/blog/nikel-kadmiyum-mu-yoksa-nikel-metal-hidrit-piller-mi/142>>, Erişim Tarihi: 30.06.2024.
- URL_55<<https://www.linkedin.com/pulse/whether-nimh-nickel-metal-hydride-batteries-better-than-rick-ce-ts7mc/>>, Erişim Tarihi: 30.06.2024.
- URL_56<<https://geniusgurus.com/sodium-sulfur-batteries/>>, Erişim Tarihi: 01.07.2024.
- URL_57<https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_sulfur_battery>, Erişim Tarihi: 01.07.2024.
- URL_58<<https://ensia.com/notable/battery-of-the-future-mining-electric-vehicles/>>, Erişim Tarihi: 01.07.2024.
- URL_59<<https://www.alsym.com/blog/alternatives-to-lithium-batteries/>>, Erişim Tarihi: 01.07.2024.

- URL_60<<https://www.cardino.de/en/blog-posts/solid-state-battery-vs-lithium-batteries>>, Erişim Tarihi: 01.07.2024.
- URL_61<https://te-cdn.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/files/2022_07_TE_solid-state-batteries_study.pdf>, Erişim Tarihi: 02.07.2024.
- URL_62<<https://nadionenergy.com/sodium-ion-batteries-a-sustainable-alternative-to-lithium-ion-batteries/>>, Erişim Tarihi: 02.07.2024.
- URL_63<<https://www.econopolis.be/en/blog/posts/2023/december/solid-state-batteries-benefits-and-drawbacks/>>, Erişim Tarihi: 02.07.2024.
- URL_64<<https://codibly.com/news-insights/flow-batteries-what-you-need-to-know/>> , Erişim Tarihi: 03.07.2024.
- URL_65<<https://www.statista.com/statistics/1423001/energy-density-of-battery-energy-systems/>> adresinden alındı, Erişim Tarihi: 19.05.2024.
- URL_66<<https://www.licarco.com/news/first-car-with-solid-state-sodium-battery-to-come>> adresinden alındı, Erişim Tarihi: 19.05.2024.
- URL_67<<https://www.linkedin.com/pulse/german-solid-state-sodium-sulfur-batteries-power-electric-deng--c8nuc/>>, Erişim Tarihi: 21.07.2024.
- URL_68<<https://www.altechgroup.com/projects/german-sodium-chloride-solid-state-scss-battery-project/>>, Erişim Tarihi: 21.07.2024.
- URL_69<<https://www.linkedin.com/pulse/batteries-history-innovation-semco-universit-me41c/> - Semco Üniversitesi, 2024, Batteries: a History of innovation>, Erişim Tarihi: 09.05.2024.
- URL_70<<https://www.spglobal.com/esg/s1/topic/the-future-of-battery-technology.html>- S&P Global, 2022, The Future of Battery Technologyhe>, Erişim Tarihi: 15.05.2024.
- URL_71<<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsaem.8b01905>>, Erişim Tarihi: 22.05.2024.
- URL_72<https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/867228/Sustainable%20batteries%20in%20their%20full%20life-cycle_EN.pdf>,Erişim Tarihi: 22.05.2024.
- URL_73<<https://www.acs.org/content/dam/acsorg/membership/acs/benefits/discovery-reports/>>, Erişim Tarihi: 22.06.2024.
- Wang, Y., Song, S., Chaohe, X., and Hu, N., 2019. Development of solid-state electrolytes for sodium-ion battery–A short review.

- Wang, Y., Song, S., Chaohe, X., and Hu, N., 2019. Development of solid-state electrolytes for sodium-ion battery–A short review,.
- Yaşar, S., 2024. Pomega Enerji. (E. Kılıç, Röportaj Yapan)
- Yeşiltepe, S., and Şeşen, M. K., 2016. Primer Pillerin Geri Dönüşüm Prosesleri Hakkında Genel Değerlendirme. Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt: 1 Sayı: 1, 33 - 38.
- Yue, Q., He, C., Wu, M., and Zhao, T., 2021. Advances in thermal management systems for next-generation power batteries, Volume 181, 121853.
- Zeng, X., Li, M., El-Hady, D. A., Alshitari, W., Al-Bogami, A. S., Lu, J., and Amine, K., 2019. Commercialization of Lithium Battery Technologies for Electric Vehicles . Advanced Energy Materials, Volume 9, Issue 27.
- Zhan, R., Oldenburg, Z., and Pan, L., 2018. Recovery of active cathode materials from lithium-ion batteries using froth flotation.
- Zhang, J., Chen, C., Zhang, X., and Liu, S., 2016. The Tenth International Conference on Waste Management and Technology (ICWMT) Study on the environmental risk assessment of lead-acid batteries . Procedia Environmental Sciences - 31 , s. 873 – 879.
- Zhao, L; Zhang, T; Li, W; Li, T; Zhang, L; Zhang, X. and Wang, Z., 2023. Engineering of Sodium-Ion Batteries: Oppurtunities and Challenges, Engineering Volume 24. s. 172-183.
- Zhou, L., Yang, D., Tao, D., and Gong, H., 2020. The Current Process for the Recycling of Spent Lithium Ion Batteries. Frontiers in Chemistry,8.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Eda KILIÇ

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans : Selçuk Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 2013-2018

Yüksek Lisans : Aksaray Üniv, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, 2021-2024

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

- 1.TOGG Projesi /Çevre, Sağlık ve Güvenlik Mühendisi
- 2.İksir Kimya/Çevre Mühendisi
- 3.Atıksa/Çevre Mühendisi
- 4.Gisa Metal/Çevre Mühendisi
- 4.Taurus Umwelttechnik GmbH-Almanya/Erasmus Stajı
- 5.Exitcom Recycling GmbH-Almanya/Erasmus Stajı
- 6.Koski Atıksu Arıtma Tesis-Yaz Stajı
7. İski İçme Suyu Arıtma Tesis-Yaz Stajı

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

1. Kılıç E. ve Bilgin M., 2024. Sürdürülebilir Pil Teknolojileri ve Çevresel İnovasyon, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.