

ÖNCÜL PROJE PROGRAMI BATARYA GERİ DÖNÜŞÜM VE İKİNCİL KULLANIM TEKNOLOJİLERİ

ÖN ARAŞTIRMA RAPORU

Mart 2025





www.ttgvy.org.tr

MERKEZ

ANKARA

Cyberpark B Blok Kat: 5-6, Bilkent Ankara

Telefon: 0312 265 02 72

Faks: 0312 265 02 62

Dr. E. Serdar Gökpınar

Rabia Önen Tüzgel

Ediz Kaan Önem

Grafik Tasarım: Özge Egemen, www.kirmizitasarim.com

Bu çalışma TTGV tarafından yaptırılmıştır. Çalışmanın tümü ya da bir bölümü TTGV'nin izni olmadan kopya edilemez ancak kaynak göstermek kaydı ile alıntı yapılabilir.

Bu kitapçık içerisinde yer alan tasarımlar, yazılar, logolar, grafikler de dahil olmak üzere, tüm yazılı ve görsel materyale ilişkin her türlü mali, manevi ve ticari haklar yahut bunları kullanma yetkisi TTGV'ye aittir. Sözü edilen içeriğin kişisel ve ticari olmayan kullanım dışında herhangi bir amaçla kullanılması, kopyalanması, işlenmesi, herhangi bir şekil veya yöntemle, tamamen veya kısmen, doğrudan veya dolaylı, geçici veya sürekli olarak çoğaltılması, kiralanması, ödünç verilmesi, satışa çıkarılması veya diğer yollarla dağıtılması kesinlikle yasaktır.

Bandrol Uygulamasına İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmeliğin 5 inci maddesinin ikinci fıkrası çerçevesinde bandrol taşıması zorunlu değildir.

ÖNCÜL PROJE PROGRAMI

BATARYA GERİ DÖNÜŞÜM VE İKİNCİL KULLANIM TEKNOLOJİLERİ

ÖN ARAŞTIRMA RAPORU

Mart 2025



TÜRKİYE TEKNOLOJİ GELİŞTİRME VAKFI

KISALTMALAR:

- ADR:** European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (Tehlikeli Malların Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşması)
- BMS:** Battery Management System (Batarya Yönetim Sistemi)
- CCT:** Continuous Charge Test (Sürekli Şarj Testi)
- DOE:** Department of Energy (Enerji Bakanlığı)
- EIS:** Electrochemical Impedance Spectroscopy (Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi)
- EPDK:** Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
- ESS:** Energy Storage System (Enerji Depolama Sistemi)
- EV:** Electric Vehicle (Elektrikli Araç)
- GW:** Gigawatt
- HPPC:** Hybrid Pulse Power Characterization (Hibrit Darbe Gücü Karakterizasyonu)
- HVAC:** Heating, Ventilation, and Air Conditioning (Isıtma, Havalandırma ve Klima)
- HVDC:** High Voltage Direct Current (Yüksek Gerilim Doğru Akım)
- IEC:** International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
- IEA:** International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
- IRENA:** International Renewable Energy Agency (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı)
- ISO:** International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
- LCO:** Lithium Cobalt Oxide (Lityum Kobalt Oksit)
- LIB:** Lithium-Ion Battery (Lityum-İyon Batarya)
- LFP:** Lithium Iron Phosphate (Lityum-Demir Fosfat)
- LMO:** Lithium Manganese Oxide (Lityum Manganez Oksit)
- NCA:** Nickel Cobalt Aluminum (Nikel-Kobalt-Alüminyum)
- NMC:** Nickel Manganese Cobalt (Nikel-Manganez-Kobalt)
- OCV:** Open Circuit Voltage (Açık Devre Voltajı)
- TCT:** Thermal Cycling Test (Termal Döngü Testi)
- TRL:** Technology Readiness Level (Teknoloji Hazırlık Seviyesi)
- TTGV:** Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı
- UN:** United Nations (Birleşmiş Milletler)
- UPS:** Uninterruptible Power Supply (Kesintisiz Güç Kaynağı)

İÇİNDEKİLER

YÖNETİCİ ÖZETİ	1
1. GİRİŞ	4
2. BATARYA TEKNOLOJİLERİ PAZAR BÜYÜME BEKLENTİLERİ	11
3. BATARYA TEKNOLOJİLERİ VE KULLANIM ALANLARI	14
3.1. Batarya Teknolojileri	14
3.1.1. Lityum-iyon Bataryalar (NMC-NCA)	14
3.1.2. Nikel Metal Hidrit (NiMH) ve Nikel Kadmiyum (NiCd) Bataryalar	15
3.1.3. Lityum-Demir Fosfat (LFP) Bataryalar	16
3.1.4. Kurşun Asit Bataryalar	17
3.2. Batarya Üretiminde Kullanılan Malzemeler	17
3.2.1 Kritik Hammaddelerin Batarya Teknolojilerinde Kullanım Alanları	18
3.3. Küresel Batarya Talebi, Kritik Hammadde İhtiyacı ve Atıl Batarya Projeksiyonu	24
4. BATARYANIN ÖMRÜNÜN SONLANMASI VE YÖNETİMİ	28
4.1. Batarya Ömür Değerlendirmesi – Yaşam Döngüsü	30
4.1.1. Geri Dönüşüm Süreci	32
4.1.2. İkincil Kullanım (Second-Life) Süreci	44
4.1.3 Bertaraf Yöntemleri ve Yönetimi	55
5. DEĞERLENDİRMELER	61
6. EKLER	64
EK 1 – BATARYA İKİNCİL KULLANIM SÜRECİ ADIMLARI	64
EK 2 – MEVZUATLAR VE DEĞERLENDİRMELER	67
REFERANSLAR	71

TABLO LİSTESİ

- Tablo 1. Sektörel Kullanım Alanlarına göre Kullanılan Kritik Hammadeler
- Tablo 2. Türkiye'nin Kritik ve Stratejik Hammaddelerinin Sınıflandırılması (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025)
- Tablo 3. Batarya Üretim Malzemeleri ve Kullanım Alanları
- Tablo 4. Batarya Teknolojilerinde Kritik Hammaddelerin Kullanım Alanları
- Tablo 5. Batarya Teknolojilerinin Kritik Hammadde Oranları
- Tablo 6. Batarya Testleri ve Amaçları
- Tablo 7. Pirometalurji Süreçlerinde Malzemeler ve Sıcaklık Aralıkları
- Tablo 8. Hidrometalurjik Süreçler: Malzemeler, İşlem Türleri ve Hedef Ürünler
- Tablo 9. Doğrudan Geri Dönüşüm: İşleme Tabi Malzemeler ve İşlem Türleri
- Tablo 10. Batarya Geri Dönüşüm Süreçleri: Avantajlar, Dezavantajlar
- Tablo 11. İkincil kullanım süreçleri, amaçları ve ikincil kullanım yöntem/kontrol parametreleri
- Tablo 12. Batarya İkincil Kullanım Senaryoları ve Değerlendirmeler
- Tablo 13. Batarya Türlerine Göre Geri Dönüşüm, İkincil Kullanım ve Bertaraf Süreçlerinin Karşılaştırması

ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 1. Küresel Kritik Hammaddelerin Üretim ve İşleme Sürecindeki Coğrafi Dağılım (2019)
- Şekil 2. Elektrikli Araç Batarya Modül Dağılımı ve Bölgesel Karşılaştırma Grafiği (2023-2024)
- Şekil 3. Küresel Batarya Pazarının Teknolojilere Göre Dağılımı (2018-2030)
- Şekil 4. Küresel Enerji Depolama Uygulamaları, Kapasite Büyüme Beklentisi
- Şekil 5. Lityum İyon Batarya Hücresi
- Şekil 6. Nikel Metal Hidrit ve Nikel Kadmiyum Batarya Hücresi
- Şekil 7. Lityum-Demir Fosfat (LFP) Hücresi
- Şekil 8. Kurşun Asit Batarya
- Şekil 9. Batarya Teknolojilerinde Yer Alan Kritik Hammadeler
- Şekil 10. Batarya Kullanım Alanları (2020-2030)
- Şekil 11. Elektrikli Araç Lityum-İyon Bataryaları İçin Küresel Metal ve Malzeme Talep Artışı (2015-2030)
- Şekil 12. Küresel Kullanılmış Batarya Miktarı Öngörüsü (2020-2040)
- Şekil 13. Bataryalarda Performans ve Ömür Kaybına Neden Olan Faktörler
- Şekil 14. Kullanım Ömrünü Tamamlamış Bataryaların Yönetim Akış Şeması
- Şekil 15. Batarya Geri Dönüşüm Süreçleri
- Şekil 16. Pirometalurjik Süreçler
- Şekil 17. Hidro-Metalurji İşlem Adımları
- Şekil 18. Biyo-Metalurji Geri Dönüşüm Süreci
- Şekil 19. Geri Dönüşüm ve Bertaraf Karar Akış Şeması
- Şekil 20. Batarya Paketleme Bileşenleri: Hücre, Modül ve Paket Yapısı
- Şekil 21. İkincil Kullanım Süreç İllüstrasyonu
- Şekil 22. Batarya İkincil Kullanımı İçin Söküm İşlemi

- Şekil 23. Bataryaların/Hücrelerin İkincil Kullanımı İçin Gerçekleştirilen Süreç Adımları
- Şekil 24. İkincil Kullanım Mekanizması Karar Akış Şeması
- Şekil 25. Batarya İkincil Kullanım Süreçlerindeki Zorluklar
- Şekil 26. Batarya Bertaraf Yöntemleri
- Şekil 27. Bertaraf Süreci Karar Akış Şeması



YÖNETİCİ ÖZETİ

Enerji dönüşümünde kritik bir rol oynayan enerji depolama teknolojileri, sürdürülebilirlik, arz güvenliği ve ekonomik kalkınma açısından stratejik bir öncelik haline gelmiştir. Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı (TTGV) tarafından gerçekleştirilen “**Şebeke Ölçeğinde Uzun Süreli Elektrokimyasal Enerji Depolama Derin Analiz Çalışması**” (2023) ve “**Elektrokimyasal Dışı Enerji Depolama Ön Araştırma Raporu**” (2024), yenilenebilir enerji entegrasyonu ve enerji sistemlerinin esnekliği açısından enerji depolama teknolojilerinin giderek artan önemini ortaya koymaktadır. Bu çalışmalar, **enerji depolama teknolojilerine olan talebin hızla artacağını ve enerji depolama alanında öne çıkan batarya teknolojilerinin gelecekte hayatımızın ayrılmaz bir parçası olacağını** göstermektedir.

Dünya genelinde **yenilenebilir enerji kurulu gücü hızla artarken**, bu sistemlerin kesintisiz ve verimli çalışabilmesi için uzun süreli enerji **depolama çözümlerine yapılan yatırımlar ivme kazanmaktadır**. Küresel enerji sektörü, arz güvenliğini sağlamak ve iklim değişikliği ile mücadele etmek için dönüşüm sürecine girmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintisiz kullanımı ve **mobilité, sanayi, tarım ve ulaşım gibi birçok sektörlerde** enerji arz güvenliğini destekleyen enerji depolama sistemleri ve bunun en önemli bileşeni olan batarya teknolojileri, günümüz enerji ekosisteminde öncü teknolojiler olarak öne çıkmaktadır.

Enerji arz güvenliği yanı sıra, hızla büyüyen elektrikli araç sektörü için de en temel bileşen etkin ve verimli batarya teknolojileridir. Sadece Türkiye’de, **elektrikli araç sektöründe yıllık %84’lük büyüme yaşanırken**, batarya üretim tesislerine yapılan yatırımlar **1 milyar ABD dolarını aşmıştır**. Bu yatırımlara ve büyümeye karşın üretimde çoğunlukla hücre bazında ithalat gerçekleştirilmekte olup bu hücreler modül ve batarya olarak birleştirilmektedir. Üretimde hücre üretim aşamasının tercih edilememesinin temel nedenlerinden biri de hammadde erişimi olarak görülmekte, uluslararası tedarik riskleri ve rekabetçi fiyatlar olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, **sektör büyümesini sürdürülebilirlik açısından sınırlayıcı** bir etken olarak değerlendirilebilir. Türkiye’de 2018 verilerine göre **yıllık yaklaşık 1.600 tonun üzerinde lityum karbonat ithal edilmekte olup, bu ithalatın maliyeti 16 milyon ABD doları seviyesindedir**. Ülkemizde ekonomik ölçekli bir lityum madeni

bulunmamakla birlikte, düşük miktarlarda yerli üretim kapasitesi oluşturulmaya başlanmıştır. Ancak, **yerli üretim hızla büyüyen iç talebi karşılamaya yetmemekte ve Türkiye'nin lityum ihtiyacı gelişen batarya sektörüyle birlikte her yıl artmaktadır.**

Diğer taraftan bu teknolojilerin üretim süreçlerinde kullanılan **lityum, kobalt ve nikel gibi kritik hammaddelerin sınırlı rezervleri ve jeopolitik riskler**, küresel tedarik zincirinde kırılganlıklar ve riskler yaratmaktadır. Bu bağlamda, **kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların geri kazanımı, sürdürülebilir bir tedarik zinciri oluşturmak için ülkemiz için önemli bir fırsat sunmaktadır.** Türkiye'nin nüfusu, elektrikli araç sektöründeki pazar payı ve yıllık büyümesi baz alındığında, bu ürünlerin kullanım ömrünü tamamladıktan sonra ortaya çıkacak atıl durumdaki bataryaların uygun şekilde yönetilmesinin büyük önem taşıdığı değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda da **kent madenciliği ve batarya geri dönüşüm süreçleri**, hem çevresel hem de ekonomik kazanımlar sağlayarak Türkiye'nin batarya ekosistemini güçlendirebilecektir. **Avrupa Birliği'nin Batarya Regülasyonu** doğrultusunda, geri dönüşüm süreçlerinin geliştirilmesi ve kritik hammaddelerin geri kazanım oranlarının artırılması, Türkiye için de öncelikli bir konu olmalıdır. **Lityum karbonatın geri dönüşüm yoluyla yüksek verimlilikle (%85-95) ve üretim proseslerinde kullanılabilecek kadar yüksek saflıkta üretilmesi (%99,9)**, enerji depolama ve elektrikli araç sektörlerinin artan talebini karşılamak adına **stratejik bir öncelik olarak öne çıkmaktadır.**

Ancak, Türkiye'de **geri dönüşüm süreçlerinin fiziksel ve kimyasal işleme kapasitesi halen sınırlıdır. Atık pil ayrıştırma, kırma ve öğütme gibi fiziksel işlemler ile pirometalurji ve hidrometalurji süreçleri, verimlilik açısından iyileştirilmesi gereken alanlardır. Bu eksiklikler, batarya geri dönüşüm sektörünün gelişimini sınırlamakta ve atık bataryaların ekonomiye yeniden kazandırılmasını zorlaştırmaktadır.**

Bununla birlikte, **atıl bataryaların efektif şekilde kullanılması için batarya ikincil kullanım süreçleri** de değerlendirilmesi gereken bir fırsat alanıdır. **Elektrikli araçlardan çıkan bataryalar, ilk kapasitenin %80'inin altına düştüğünde** farklı sektörlerde (düşük güç gereksinimi; mesken tipi, acil durum güç üniteleri, UPS benzeri vb.) yeniden kullanılabilir. **Şarj altyapıları, yedek güç sistemleri ve sanayi uygulamalarına entegre edilerek** atıl bataryaların ekonomik değeri artırılabilir. Ülkemizde hâlihazırda, hasarsız batarya paketleriyle yapılan küçük ölçekli bazı pilot uygulamalar, elektrikli araç şarj ünitelerine entegre edilerek test edilmiştir. İkincil kullanım uygulamalarının gelişimi henüz yeni oluşmakla birlikte bu işlemlerin daha verimli gerçekleştirilebilmesi ve atıl bataryaların daha etkili bir şekilde yönetilebilmesi için hücre bazında testler, değerlendirmeler ve denemeler gerçekleştirilmesi, **hücrelerden ikincil kullanım amaçlı batarya paketlerinin oluşturulması, sektör gelişimi, pazar ve bilgi birikimi (know-how) oluşumu için etkin uygulamalar arasında değerlendirilmektedir**

Türkiye'nin **batarya teknolojileri alanında büyüyen pazarı, sürdürülebilirlik ve rekabetçilik açısından önemli fırsatlar sunmaktadır.** Ancak, **kritik hammaddelere erişim sorunu, geri dönüşüm altyapısının yetersizliği ve ikincil kullanım süreçlerinin eksikliği**, sektörün sürdürülebilir büyümesini sınırlayabilir başlıca faktörlerden olması beklenebilir. Bu doğrultuda, Türkiye'nin

enerji dönüşüm sürecinde rekabetçi bir konum elde edebilmesi için aşağıdaki adımlar önem taşımaktadır:

- 1. Batarya geri dönüşüm altyapısının geliştirilmesi ve lityum, kobalt, nikel gibi kritik hammaddelerin geri kazanım verimliliğinin artırılması.**
- 2. İkincil kullanım senaryolarının geliştirilmesi, hücre bazında bataryaların yeniden değerlendirilmesi ve bu bataryaların farklı sektörlerde yeniden kullanımı için test, standartizasyon ve regülasyon süreçlerinin hızlandırılması.**
- 3. Kent madenciliği uygulamalarının yaygınlaştırılması, atık bataryaların verimli bir şekilde toplanarak geri dönüşüm tesislerine yönlendirilmesi için teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi.**
- 4. Sanayi iş birliklerinin güçlendirilmesi, yerli batarya üreticileri ile geri dönüşüm tesisleri arasında entegre bir ekosistem oluşturularak döngüsel ekonominin desteklenmesi.**
- 5. Batarya test ve sertifikasyon altyapısının güçlendirilmesi, batarya ömrünün yönetimi ve güvenilirliğinin artırılması için standartların belirlenmesi.**

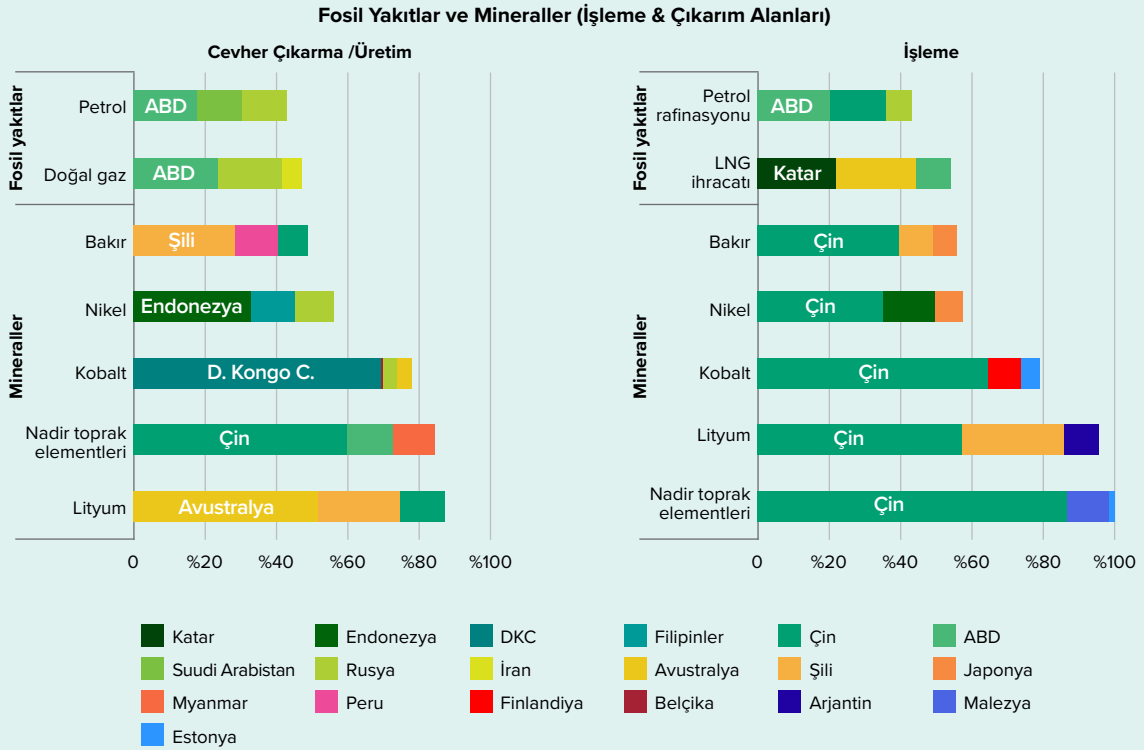
Türkiye'nin **batarya üretiminde sürdürülebilir bir model oluşturabilmesi için**, sadece yatırımlar değil, **bataryaların etkin değerlendirilmesine olanak sağlayan düzenleme ve teşvikler ile eş zamanlı olarak desteklenmesi ve bu aşamalar için standartların oluşturulması gerekmektedir. Atıl bataryaların yönetimi, kent madenciliği ve geri dönüşüm süreçlerinin güçlendirilmesi, hücre değerlendirme, test etme ve yeni batarya paketlerinin oluşturulması hem ihracatı azaltıcı hem de yerli bilgi kapasitesinin oluşmasına önemli katkı sağlayacak çalışmaların başında yer almaktadır.**

1.

GİRİŞ

Günümüzün hızla enerji dönüşümüne odaklanan dünyasında, kritik hammaddeler stratejik bir değer kazanmış ve bu hammaddelerin çıkarımı ile işlenmesi belirli ülkelerde yoğunlaşarak küresel tedarik zincirinde kırılganlık yaratmıştır. Bir malzemenin kritik kabul edilebilmesi için tedarik zinciri bağımlılığı, sınırlı rezerv dağılımı, ikamesinin zor olması ve ekonomik önemi gibi faktörlerin bulunması gerekir. Stratejik olması için ise ulusal güvenlik, askeri ve enerji bağımsızlığı açısından vazgeçilmez olması gereklidir. Bazı hammaddeler ise hem kritik hem de stratejik olabilir, örneğin lityum ve nadir toprak elementleri, hem teknolojik gelişmelerde hem de enerji dönüşümünde vazgeçilmez oldukları için bu iki kategoriyi de kapsar. Batarya teknolojilerinden yenilenebilir enerji sistemlerine, elektrikli araçlardan savunma sanayine kadar birçok sektörde temel bileşenler olan lityum, kobalt, nikel, bakır ve nadir toprak elementleri, sınırlı coğrafyalarda yoğunlaşan üretim ve işleme kapasitesi nedeniyle arz güvenliği açısından risk oluşturmaktadır. Şekil 1’de, küresel kritik hammaddelerin üretim (çıkartım) ve işleme süreçlerindeki coğrafi dağılımı gösterilmektedir. Grafik, fosil yakıtlar (petrol ve doğalgaz) ile bakır, nikel, kobalt, lityum ve nadir toprak elementleri gibi stratejik minerallerin çıkarıldığı ve işlendiği ülkeleri karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

Seçili minerallerin ve fosil yakıtların üretiminde en fazla üretim yapan üç ülkenin payı, 2019



Şekil 1. Küresel Kritik Hammaddelerin Üretim ve İşleme Sürecindeki Coğrafi Dağılım (2019) [1]

Şekil 1'e göre bakır üretiminin %28'i Şili'de, nikelin %30'u Endonezya'da, kobaltın %70'i Demokratik Kongo Cumhuriyeti'nde ve lityumun %50'den fazlası Avustralya'da gerçekleştirilmektedir. Ancak asıl kritik nokta, bu hammaddelerin işlenmesi aşamasında Çin'in baskın konumda olmasıdır. Çin, küresel rafinasyon kapasitesinin büyük bir kısmını elinde tutarak bakırın %40'ını, kobaltın %75'ini, lityumun %60'tan fazlasını ve nadir toprak elementlerinin %85'ini işlemektedir. Bu durum, madencilik faaliyetlerinin coğrafi çeşitliliğine rağmen, hammaddelerin işlenmesi ve tedarikinde belirli bir ülkeye bağımlılık yaratmakta, jeopolitik gerilimler ve ticari kısıtlamalar nedeniyle küresel pazarda dengesizliklere yol açmaktadır. Arz güvenliğini sağlamak ve bu bağımlılığı azaltmak amacıyla ABD, Avrupa Birliği ve diğer büyük ekonomiler madencilik yatırımlarını çeşitlendirme, geri dönüşüm teknolojilerini geliştirme ve alternatif malzemeler üzerine araştırmalar yapma yönünde stratejiler belirlemektedir. Ancak, kısa vadede bu yoğunlaşmayı kırarak hızlı bir çözüm bulunmadığından, kritik minerallerin arzı küresel enerji dönüşümünün hızını ve maliyetini doğrudan etkilemeye devam edecektir.[2]

Sınırlı cevher sahipliği bazı ülkeler için avantajlar sağlamakla birlikte bu alanda kıymetli cevheri bulunmayan ülkeler için dezavantaj oluşturmaktadır. Bu durum beraberinde jeopolitik sorunları, teknoloji yarışlarını ve ticari kısıtlamaları beraberinde getirerek küresel tedarik zincirlerinde sorunlar yaşanmasına sebebiyet vermektedir. Bu kapsamda Avrupa Birliği (EU) ve Amerika Enerji Bakanlığı (DOE) yeşil dönüşüm ve savunma sanayii başta olmak üzere kullanılan hammaddeleri gruplandırmıştır. Tablo 1’de, enerji uygulamalarında kullanılan teknolojiler ile bu teknolojilere yönelik temel bileşenler ve kritik hammaddeler gösterilmektedir.

Tablo 1’de iletim ve dağıtım, enerji üretimi, enerji depolama ve son kullanım gibi kategoriler altında, HVDC, HVAC, nükleer enerji, fotovoltaik güneş panelleri, rüzgar **türbinleri, bataryalar, yakıt hücreleri ve hidrojen elektrolizörleri** gibi teknolojiler listelenmiştir.

Bu sistemlerde kullanılan hammaddeler, her teknolojinin işlevine bağlı olarak belirlenmiştir. Örneğin:

- HVDC ve HVAC sistemleri, yüksek iletkenlik ve mekanik dayanım için bakır, germanyum ve nikel gibi metaller içerir.
- Nükleer enerji sistemlerinde kullanılan uranyum ve zirkonyum, reaktör yakıtları ve moderatörler için kritik rol oynar.
- Fotovoltaik güneş panelleri, yarı iletken özellikleri nedeniyle silisyum, tellür, galyum ve indiyum gibi elementler gerektirir.
- Rüzgar türbinlerinde, mıknatıslar için neodimyum, praseodimyum, terbiyum ve disprosyum gibi nadir toprak elementleri kullanılır.
- Batarya teknolojileri, lityum, nikel, kobalt, grafit, alüminyum, demir ve fosfor gibi malzemelere dayanır.

Tablo 1. Sektörel Kullanım Alanlarına göre Kullanılan Kritik Hammadeler [3,4]

Enerji Uygulama Kategorileri	Teknoloji	Bileşenler / Alt Teknolojiler	Malzemeler
İletim ve Dağıtım	HVDC (Yüksek Gerilim Doğru Akım)	Dönüştürücüler, transformatörler, kesiciler ve anahtarlar	Bakır, Germanyum, Nikel, Elektrik Çeliği, Silisyum Karbür
	HVAC (Yüksek Gerilim Alternatif Akım)	Transformatörler	Bakır, Elektrik Çeliği
Üretim	Nükleer	Yakıtlar, moderatörler	Uranyum, Zirkonyum, Doğal Grafit, Elektrik Çeliği
	Güneş	Fotovoltaik paneller	Silisyum, Tellür, Galyum, İndiyum
	Rüzgar (Deniz Üstü)	Deniz üstü rüzgar türbinleri	Bakır, Neodimyum, Praseodimyum, Terbiyum, Disprosyum, Bor, Galyum, Elektrik Çeliği
	Rüzgar (Kara)	Kara rüzgar türbinleri	Bakır, Elektrik Çeliği
Enerji Depolama	Yakıt Hücreleri	Sabit hidrojen-elektrik dönüşümü	Platin, Grafit, Lantan, Stronsiyum, Kobalt, Nikel, Yttriyum, Zirkonyum, Manganez
	Bataryalar	Lityum-iyon bataryalar, çinko-hava, demir-hava, sodyum-hava, akış bataryaları	Lityum, Kobalt, Nikel, Grafit, Vanadyum, Çinko, Demir, Alüminyum, Sodyum, Fosfor, Flor
Son Ürün	Aydınlatma	LED aydınlatma	Galyum
	Tüketici Elektronik	Güç Elektronik	Galyum Nitrid, Silisyum Karbür
	Elektrikli Araçlar	Güç Elektronik	Silisyum Karbür
		Hafifletilmiş malzemeler	Magnezyum, Manganez, Alüminyum, Nikel, Silikon
		Mıknatis sistemleri	Neodimyum, Praseodimyum, Disprosyum, Terbiyum, Bor, Demir, Galyum
		Elektrikli araç bataryaları	Lityum, Nikel, Manganez, Kobalt, Grafit, Alüminyum, Demir, Fosfor, Hafif Nadir Toprak Elementleri
		Elektrikli araç motorları	Elektrik Çeliği, Bakır
		Elektrikli araç kabloları	Bakır
	Optoelektronik	Mikroçipler	Germanyum
	Otomotiv	Araç hafifletme sistemleri	Magnezyum, Alüminyum, Nikel, Silikon
		Katalizörler	Platin, Paladyum, Rodyum
		Motor sistemleri	Elektrik Çeliği, Bakır
		Yakıt hücreleri	Platin, Grafit, Lantan, Stronsiyum, Kobalt, Nikel, Zirkonyum, Manganez
	Hidrojen	Hidrojen Elektrolizörleri	Platin, İttriyum, Titanyum, Lantan, Stronsiyum, Kobalt, Nikel, Zirkonyum, Manganez

* Batarya Teknolojileri kapsamında kullanılan Kritik Hammaddeler **Sarı** renk ile işaretlenmiştir.

Her ülke için kritik ve stratejik hammadde ihtiyacı, mevcut rezervine, cevher erişim risklerine, tedarik risklerine, jeolojik stratejisine, üretim teknolojileri yönelik olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Bu kapsam benzer bir çalışma ülkemizde T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 2025, Ocak ayında gerçekleştirilmiş olup aşağıdaki tabloda yer alan hammaddeler yüksek kritik, önemli derecede kritik ve kritik olma potansiyeli yüksek hammaddeler için değerlendirilmiş ve gruplandırılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Türkiye'nin Kritik ve Stratejik Hammaddelerinin Sınıflandırılması (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025)

Yüksek Oranda Kritik Malzemeler	Önemli Derecede Kritik Malzemeler	Kritik Olma Potansiyeli Olan Malzemeler
Lityum	Niyobyum	Kurşun
Gümüş	Cıva	Nikel
Titanyum	Antimuan	Nadir Toprak Elementleri (REEs)
Demir	Barit	Kadmiyum
Manganez	Grafit	İndiyum
Çinko	Kömür	Germanyum
Bakır	Paladyum	Kalay
Alüminyum	Kobalt	Arsenik
	Bizmut	Molibden
		Galyum
		Bentonit

*Nadir Toprak Elementleri (REEs): Neodimyum (Nd), Praseodimyum (Pr), Disprosyum (Dy), Terbiyum (Tb), Lantan (La), Seryum (Ce), Samaryum (Sm), İttriyum (Y), Gadolinyum (Gd), Erbiyum (Er)

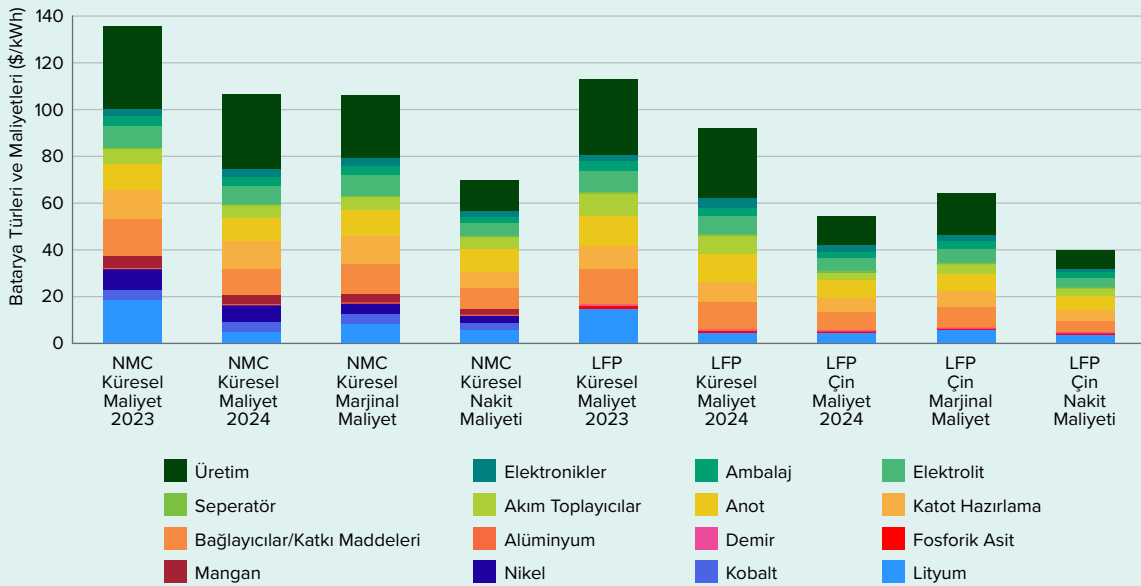
** Batarya Teknolojileri kapsamında kullanılan Kritik Hammaddeler **Sarı** renk ile işaretlenmiştir.

Ön Araştırma Raporu çalışması kapsamında bataryalarda kullanılan hammaddeler değerlendirilmiş olup ülkemizde kritik olarak değerlendirilen hammaddeler için gerçekleştirilebilecek çalışmalar incelenmiştir. Kritik hammaddelerin sahipliği batarya üretim süreçlerinde yönetilmesi gereken temel sorun olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, üretim süreçlerinde ekonomik maliyetlerin yükselmesine neden olmakla birlikte, kullanım ömrünü tamamlayan bataryalar, uygun şekilde yönetilmediğinde çevresel zararları artıran tehlikeli atıklar haline gelmekle, atık yönetim zorluklarını da beraberinde getirmektedir. Türkiye'nin batarya üretiminde ihtiyaç duyduğu kritik hammaddeler, özellikle lityum, kobalt, nikel ve grafit gibi metaller, küresel ölçekte giderek daha büyük bir talep görmektedir. 2030'a kadar bu hammaddelere olan ihtiyacın keskin bir şekilde artması beklenirken, bu durum madencilik faaliyetlerinin sürdürülebilirliği ve geri dönüşüm süreçlerinin önemini artırmaktadır. Türkiye'de yıllık 2018 verilerine göre yaklaşık 1,634 ton lityum karbonat ithal edilmekte, bu ithalatın yıllık maliyeti 16 milyon ABD doları, toplam lityum ithalatı ise 23,5 milyon ABD doları civarındadır. Lityum oksit ve hidroksit ithalatı 8 milyon ABD doları seviyesinde olup, ana tedarikçiler Belçika

ve Şili'dir. Türkiye'de ekonomik ölçekli bir lityum madeni bulunmazken, Eti Maden tarafından yıllık 600 ton lityum karbonat üretim kapasitesine sahip bir tesis kurulmuştur. Ancak, Türkiye'nin lityum ihtiyacı her yıl artmaktadır.

Bu kritik hammaddelerin dışa bağımlılığı, üretim süreçlerinde maliyetleri artırmakta ve tedarik zinciri riskleri yaratmaktadır. Türkiye'de bu metallerin yeterli rezervlerinin bulunmaması ve madencilik yatırımlarının sınırlı olması, sürdürülebilir bir tedarik modelinin oluşturulmasını zorlaştırmaktadır. Buna ek olarak, kullanım ömrünü tamamlayan bataryaların uygun şekilde yönetilmemesi durumunda, toprak ve su kirliliği, ağır metal sızıntıları ve yangın riski gibi çevresel sorunlar ortaya çıkmaktadır. Batarya geri dönüşüm altyapısının eksik olması, tehlikeli atık yönetiminde bir boşluk yaratmaktadır.

Türkiye'nin bu alandaki dışa bağımlılığını azaltmak ve çevresel etkileri minimize etmek için lityum başta olmak üzere diğer kritik ve stratejik hammaddelerin geri dönüşümü, ikincil kullanım modelleri ve yerli üretim kapasitesinin artırılması gibi stratejik adımların atılması gerekmektedir. Batarya geri dönüşüm ekosisteminin geliştirilmesi ve yerli madencilik yatırımlarının teşvik edilmesi, hem ekonomik sürdürülebilirlik açısından hem de yenilenebilir enerji geçişinde batarya teknolojilerinin kritik rolü açısından önem taşımaktadır. Şekil 2 'de Elektrikli Araç Batarya Modül Dağılımı ve Bölgesel Karşılaştırma Grafiği verilmiştir.



*Küresel: Tüm dünya genelindeki ortalama batarya üretim maliyetlerini ifade eder

*Marjinal Maliyet: Sabit maliyetleri (fabrika yatırımları, altyapı gibi) içermeyen, yalnızca değişken maliyetleri hesaplayan bir yaklaşımdır. Üretim ölçeği büyüdükçe, marjinal maliyet azalabilir.

*Nakit Maliyeti: Doğrudan üretim sürecinde yapılan ödemeleri içerir (hammadde alımı, işçilik, enerji, lojistik vb.)

Şekil 2. Elektrikli Araç Batarya Modül Dağılımı ve Bölgesel Karşılaştırma Grafiği (2023-2024) [5]

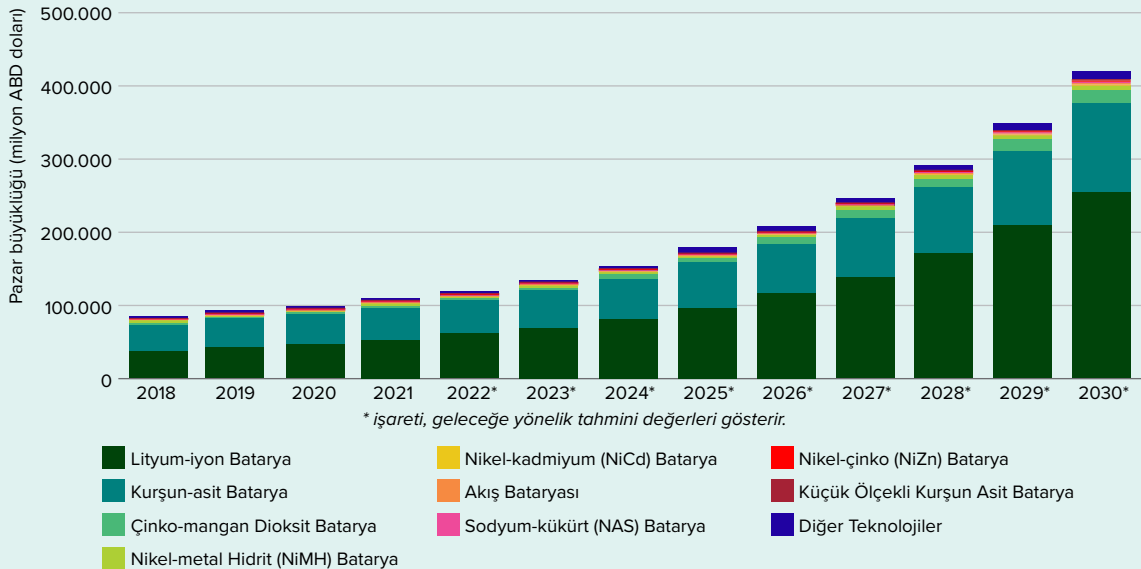
- Şekil 2’de verilen Elektrikli Araç Batarya Modül Dağılımı ve Bölgesel Karşılaştırma Grafiği verileri değerlendirildiğinde; Çin’de üretilen bataryaların maliyetinin, kritik hammaddelerin doğrudan erişimi sayesinde (başta lityum, kobalt, nikel, manganez, grafit %50-80 arasında değişen Çin sahipliği) küresel fiyatlara kıyasla sağladığı avantajlar görülmektedir. Bu durumun hammadde erişiminin ve sahipliğinin batarya üretiminde yaklaşık %15-20 seviyelerinde toplam maliyet etkisi yaratmakla birlikte diğer üreticiler arasında rekabet seviyesini zorlamaktadır. Ayrıca tedarik zincirindeki güven ve süreklilik unsuru da göz önüne alındığında belirgin şekilde tedarik riskleri minimize yöneterek avantaj elde ettiği görülmektedir.
- Tedarik zincirinde güven ve süreklilik unsurları da göz önüne alındığında, Çin’in bu avantajı yalnızca maliyet üzerinden değil, ham madde erişiminin sürekliliğini sağlayarak da pekiştirdiği görülmektedir. Kritik hammaddelerin çıkarımı, işlenmesi ve batarya üretim süreçleri arasındaki entegrasyon, tedarik risklerini minimize etmekte ve Çin’in batarya üretiminde güçlü bir konumda olmasını sağlamaktadır
- Kritik hammaddelerin belirli ülkelerin kontrolünde olması, küresel batarya üretimi için uzun vadeli bir risk teşkil etmektedir. **Özellikle lityum, nikel ve kobalt gibi hammaddelere olan bağımlılık, tedarik zincirinde kırılganlığa yol açarken, bu metallerin fiyat dalgalanmaları küresel piyasalarda maliyet baskısı yaratmaktadır.** Bu nedenle, alternatif tedarik yollarının oluşturulması, geri dönüşüm teknolojilerinin yaygınlaştırılması ve yeni nesil batarya kimyalarının geliştirilmesi, kritik hammaddeye olan bağımlılığı azaltarak üretim süreçlerini daha sürdürülebilir hale getirebilir.
- Sonuç olarak, batarya üretiminde sadece maliyet avantajı değil, aynı zamanda kritik hammaddelere erişim stratejisi de belirleyici bir faktör olmaktadır. Bu nedenle, ülkeler ve üreticiler için kritik minerallerin tedarik güvenliği, sanayi politikalarının ve yatırım stratejilerinin temel bileşenlerinden biri haline gelmektedir.

Bu raporda, bataryaların üretiminden geri dönüşümüne kadar tüm yaşam döngüsü ele alınmakta; üretim, kullanım, ikincil kullanım, geri dönüşüm ve atık yönetimi süreçleri bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmektedir.

2.

BATARYA TEKNOLOJİLERİ PAZAR BÜYÜME BEKLENTİLERİ

Son yıllarda batarya teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, bu teknolojilerin ticarileşmesini hızlandırmış ve uygulama alanlarını genişletmiştir. Elektrikli araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar, yenilenebilir enerji sistemleri ve akıllı şebekeler, bataryaların kullanımında öne çıkan sektörlerdir. 2024 yılı itibarıyla, küresel batarya pazarının toplam büyüklüğünün yaklaşık 150 milyar ABD doları olduğu tahmin edilmektedir. Bu büyüklük, farklı teknolojilere dayalı bataryaların pazar paylarının çeşitliliğini yansıtmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Küresel Batarya Pazarının Teknolojilere Göre Dağılımı (2018-2030) [6]

Şekil 3'e göre Lityum-iyon bataryaların pazardaki baskın konumunu korumakla birlikte zaman içerisinde daha da arttırması beklenmektedir. 82.7 milyar ABD doları ile pazarın en büyük segmentini oluşturan lityum-iyon bataryalar (Li-ion), yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür gibi avantajları sayesinde elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bataryalar, özellikle elektrikli araçlara olan artan küresel talep ve düşen üretim maliyetleriyle büyümesini sürdürmektedir.

Kurşun asit aküler, 54.9 milyar ABD doları büyüklüğündeki pazar değeriyle, düşük maliyetleri ve geniş sıcaklık aralığında çalışma kabiliyeti sayesinde otomotiv sektörü ve acil durum enerji sistemlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Ancak enerji yoğunluğunun düşük olması, bu bataryaların modern enerji ihtiyaçlarını karşılamada sınırlı bir role sahip olmasına neden olmaktadır. Buna rağmen, maliyet etkinliği ve yaygın kullanım ağı, bu teknolojinin önemini korumaktadır.

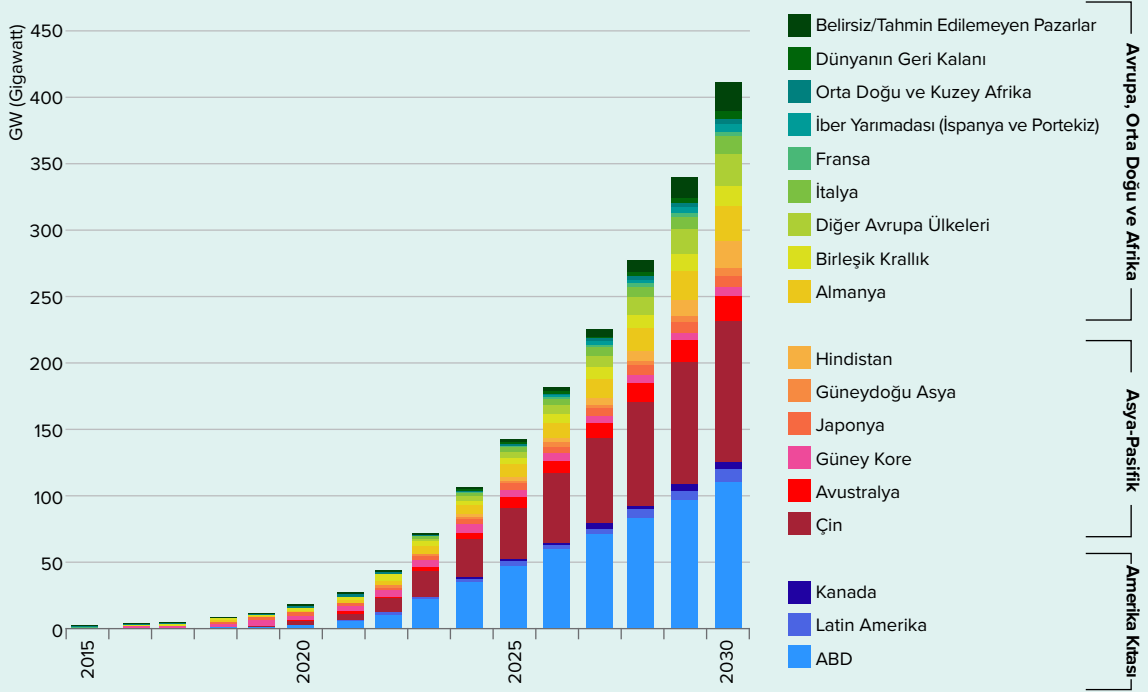
Lityum demir fosfat (LiFePO₄) bataryalar ise 6.9 milyar ABD doları pazar büyüklüğüne ulaşarak enerji depolama sistemlerinde ve belirli elektrikli araç modellerinde tercih edilmektedir. Termal dayanıklılık ve güvenlik avantajları, bu bataryaların öne çıkan özellikleri arasındadır. Özellikle Çin pazarında artan talep, bu teknolojinin küresel çapta büyümesine katkı sağlamaktadır.

Akış bataryaları, sodyum sülfür (NAS) ve nikel-çinko (NiZn) gibi alternatif teknolojiler toplamda 6 milyar ABD doları seviyesine ulaşmıştır. Uzun süreli enerji depolama projelerinde ve şebeke destek sistemlerinde bu teknolojilere olan talebin artış göstermesi beklenmektedir. Özellikle büyük ölçekli enerji projeleri, bu teknolojilerin kullanım alanlarını genişletmektedir. Bu tür teknolojiler, belirli uygulama alanlarında potansiyel büyüme sunmaktadır.

Küresel batarya pazarındaki bu büyüme, lityum, nikel ve kobalt gibi kritik hammaddelere olan talebin hızla artmasına yol açmaktadır. Sınırlı rezervlere sahip bu hammaddelerin tedarikinde yaşanabilecek bölgesel dengesizlikler, tedarik zincirlerinde kırılganlıklara neden olma potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca, madencilik faaliyetlerinin artması hem çevresel etkileri artırmakta hem de sosyal sürdürülebilirlik konularında ciddi kaygılar doğurmaktadır.

Şekil 4, APAC bölgesinin (özellikle Çin) liderliğiyle enerji depolama kurulumlarında öne çıktığını, Şekil 3 ise lityum-iyon pillerin bu büyümede baskın bir rol oynadığını göstermektedir. Bölgesel enerji politikaları ve pazar ihtiyaçları, teknoloji tercihlerini doğrudan etkilerken, APAC ve AMER bölgelerinde lityum-iyon teknolojilerinin yaygın kullanımı, bu bölgelerdeki hızlı kapasite artışını desteklemektedir. Sonuç olarak, enerji depolama yatırımları ve teknoloji seçimleri arasındaki bu uyum, hem bölgesel büyüme dinamiklerini hem de küresel pazarın yönelimini şekillendirmektedir.

Küresel kümülatif enerji depolama kuruluşları, 2015-2030



Kaynak: BloombergNEF.

"Belirsiz" ifadesi, BNEF'in öngörü yapamadığı pazarları ve kullanım senaryolarını temsil etmektedir.

Şekil 4. Küresel Enerji Depolama Uygulama, Kapasitesi Büyüme Beklentisi [7]

2015 yılında 10 GW'ın altında olan küresel enerji depolama kapasitesinin, 2025 yılına kadar 200 GW'a, 2030 yılına kadar ise 450 GW'a ulaşması beklenmektedir. ABD, 2030 itibarıyla 100 GW'tan fazla kapasiteyle en büyük pazar konumuna gelirken, Çin'in 120 GW'ı aşan kapasitesiyle küresel lider olması öngörülmektedir. Asya-Pasifik (APAC) bölgesinin toplam katkısının 200 GW'ı geçmesi, Avrupa, Orta Doğu ve Afrika (EMEA) bölgesinde ise Almanya, Birleşik Krallık ve diğer Avrupa ülkelerinin yatırımlarıyla 70 GW'tan fazla kapasiteye ulaşılması beklenmektedir [1].

Bu büyüme, lityum, kobalt ve nikel gibi kritik hammaddelere olan talebi hızla artıracaktır. 2030 yılına kadar lityum talebinin 2020 seviyesine kıyasla 5 katına, nikel ve kobalt talebinin ise sırasıyla 3 ve 4 katına çıkacağı öngörülmektedir. Bu artan talep karşısında batarya geri dönüşüm kapasitesinin 2030'a kadar yıllık 50 GWh'yi aşması, özellikle Avrupa'da batarya hammadde ihtiyacının %15-20'sini geri dönüşümle karşılaması hedeflenmektedir. Ayrıca, uzun süreli enerji depolama çözümlerine yönelik artan ihtiyaç doğrultusunda, alternatif depolama teknolojilerinin toplam kurulu kapasite içindeki payının %30'a ulaşması beklenmektedir [1].

3.

BATARYA TEKNOLOJİLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Bu bölümde, ticari ölçekte yaygın kullanılmalarının sebebi olan performans, maliyet ve güvenlik avantajları doğrultusunda NMC, NCA, LFP, NiMH ve kurşun asit bataryaları ele alınmaktadır. NMC ve NCA bataryalar yüksek enerji yoğunluklarıyla elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılırken, LFP bataryalar güvenlik ve uzun ömürlülük avantajlarıyla öne çıkmaktadır. NiMH bataryalar hibrit araçlarda, kurşun asit bataryalar ise düşük maliyetleri nedeniyle yedek enerji çözümlerinde tercih edilmektedir.

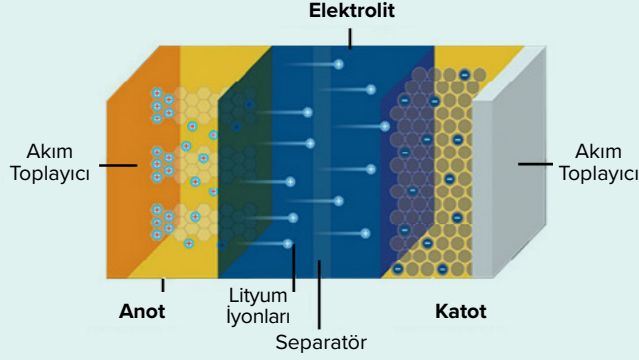
3.1 BATARYA TEKNOLOJİLERİ

3.1.1 Lityum-iyon Bataryalar (NMC-NCA)

Lityum-iyon bataryalar, lityum, nikel, kobalt, mangan ve grafit gibi malzemelerden üretilmektedir. Yüksek enerji yoğunluğu (150-250 Wh/kg) ve düşük kendi kendine deşarj oranları gibi özellikleri sayesinde elektrikli araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar ve yenilenebilir enerji depolama çözümleri gibi geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Şekil 5'te lityum iyon batarya hücresinin yapısı verilmiştir.

Lityum-iyon bataryalar, uygulama ihtiyaçlarına göre farklı tasarımlarda üretilmektedir. Silindirik hücreler (ör. 18650 ve 21700), termal yönetim avantajları ve üretim kolaylığı nedeniyle taşınabilir cihazlarda ve Tesla Model 3 gibi elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılır. Prizmatik hücreler, yer tasarrufu sağladığından elektrikli araçlar ve sabit enerji depolama sistemlerinde tercih edilir. Kесе hücreler (pouch) ise hafif ve esnek yapıları sayesinde genellikle akıllı telefonlar ve tabletlerde kullanılmakla birlikte bazı elektrikli araçlarda da kullanılmaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaşması, lityum-iyon bataryalara olan talebi hızla artırmaktadır. Örneğin, Tesla Model 3'te uzun menzil için NCA (Nikel-

Kobalt-Alüminyum) kimyası tercih edilirken, Volkswagen ID serisi araçlarda daha dengeli ve güvenli NMC (Nikel-Mangan-Kobalt) kimyası kullanılmaktadır. [7,11]



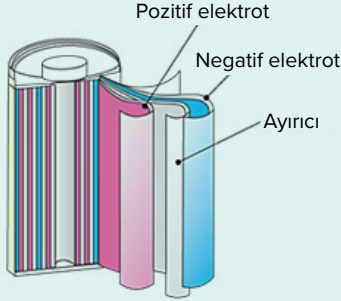
Şekil 5. Lityum İyon Batarya Hücresi[12]

3.1.2. Nikel Metal Hidrit (NiMH) ve Nikel Kadmiyum (NiCd) Bataryalar

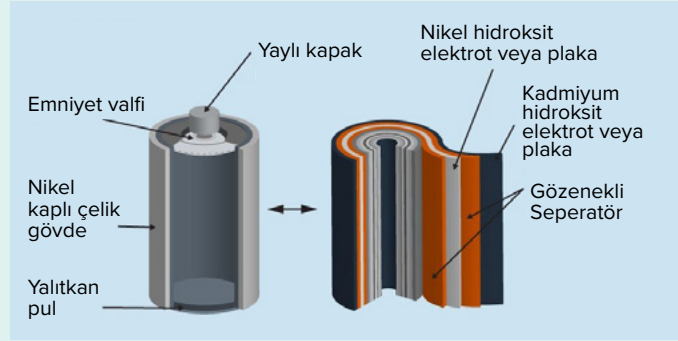
Nikel Metal Hidrit (NiMH) ve Nikel Kadmiyum (NiCd) bataryalar, nikel oksihidrat katot ve metal alaşımlı anot yapılarına sahiptir. NiMH bataryalar, çevresel açıdan daha güvenli olup, lityum-iyon teknolojisinden önce taşınabilir cihazlarda yaygın olarak kullanılmıştır. Hibrit araçlarda (ör. Toyota Prius) dayanıklılık ve düşük maliyet avantajı sayesinde hâlâ tercih edilmektedir. Enerji yoğunluğu lityum-iyon bataryalara göre düşüktür (70-100 Wh/kg). Şekil 6'da örnek Nikel Metal Hidrit ve Nikel kadmiyum batarya hücresi yapısı verilmiştir.

NiCd bataryalar ise kadmiyumun toksik yapısı ve hafıza etkisi (bataryanın tekrar tekrar tam şarj edilmemesi durumunda kapasite kaybı ve %100 kapasitesini kullanamaması durumu/elektrot kristallerinin büyümesi) nedeniyle günümüzde sınırlı kullanım alanına sahiptir. Bu bataryalar genellikle acil durum aydınlatma sistemleri gibi dayanıklılık gerektiren endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Çevresel riskleri nedeniyle Avrupa Birliği başta olmak üzere birçok ülkede kullanımına ciddi sınırlamalar getirilmiştir. NiMH bataryaların geri dönüşümü de ekonomik zorluklar nedeniyle (geri kazanım için gerekli enerji, geri kazanılan hammadde değeri açısından karşılanmamaktadır) sınırlıdır. Ancak NiCd bataryalar, içerdiği kadmiyumun kontrolü ve geri kazanımı açısından geri dönüşüm sistemlerinde yüksek önceliğe sahiptir [13-15].

Geleneksel Nikel-Metal Hidrit (Ni-MH) Silindirik Batarya



Nikel-Kadmiyum (NiCd) Batarya



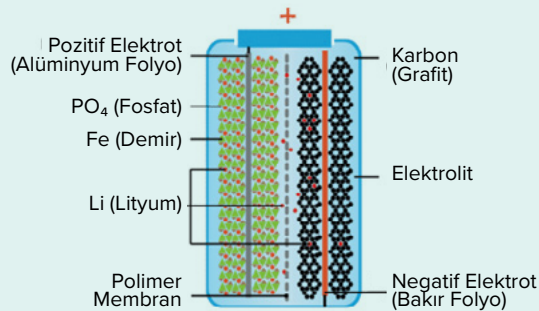
Şekil 6. Nikel Metal Hidrit ve Nikel Kadmiyum Batarya Hücresi [16]

3.1.3. Lityum-Demir Fosfat (LFP) Bataryalar

Lityum-demir fosfat (LFP) bataryalar, lityum-iyon bataryaların bir alt kategorisidir ve katot malzemesi olarak lityum demir fosfat (LiFePO_4) kullanır. Bu bataryalar, yüksek termal stabilite, uzun çevrim ömrü (2000-4000 döngü) ve düşük maliyet avantajlarıyla dikkat çeker. Kobalt ve nikel gibi pahalı metaller içermemesi, ekonomik ve çevresel açıdan avantaj sağlar. Şekil 7’de Lityum-Demir Fosfat (LFP) Hücresi yapısı verilmiştir.

LFP bataryalar, enerji yoğunluğu açısından geleneksel lityum-iyon bataryalardan daha düşük olmasına rağmen (90-160 Wh/kg), güvenlik avantajları sayesinde elektrikli otobüsler, ticari araçlar ve sabit enerji depolama sistemlerinde tercih edilmektedir. Örneğin, Tesla, Çin’de üretilen Model 3 araçlarında maliyet avantajı sağlamak için LFP bataryalarını kullanmaktadır. BYD gibi üreticiler, elektrikli otobüslerinde termal güvenlik avantajları nedeniyle LFP teknolojisini tercih etmektedir.

Ayrıca, LFP bataryalar yenilenebilir enerji sistemleri için güvenilir bir depolama çözümü sunmaktadır. Uzun ömürleri ve düşük bakım maliyetleri, bu bataryaları hem ticari hem de bireysel enerji depolama projelerinde öne çıkarmaktadır[17,18].

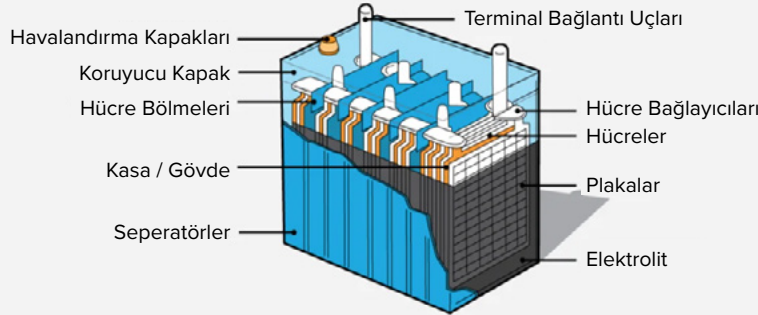


Şekil 7. Lityum-Demir Fosfat (LFP) Hücresi[19]

3.1.4. Kurşun Asit Bataryalar

Kurşun asit bataryalar, uzun yıllardır otomotiv sektörü, telekomünikasyon, yedek enerji kaynakları ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Düşük maliyet, yüksek güvenilirlik ve kısa süreli enerji depolama kapasitesi gibi özellikleriyle bu bataryalar, özellikle maliyet etkin çözümler arayan kullanıcılar için uygun bir tercih olmaya devam etmektedir. Şekil 8 'de Kurşun Asit Batarya Hücresi yapısı verilmiştir.

Kurşun asit bataryaların geri dönüşüm oranı dünya genelinde %99 gibi oldukça yüksek bir seviyededir. Bu, onları en sürdürülebilir enerji depolama çözümlerinden biri haline getirir. Geri dönüşüm süreçlerinde kurşun, plaka malzemeleri ve elektrolitler yeniden kullanılarak hem çevresel etkiler azaltılır hem de ekonomik fayda sağlanır. Son yıllarda geliştirilen kurşun-karbon bataryalar, çevrim ömrünü artırarak geleneksel kurşun asit bataryalara göre daha iyi bir performans sunmaktadır. Bu bataryalar, veri merkezleri ve kritik altyapı sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 8. Kurşun Asit Batarya [20]

3.2. BATARYA ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER

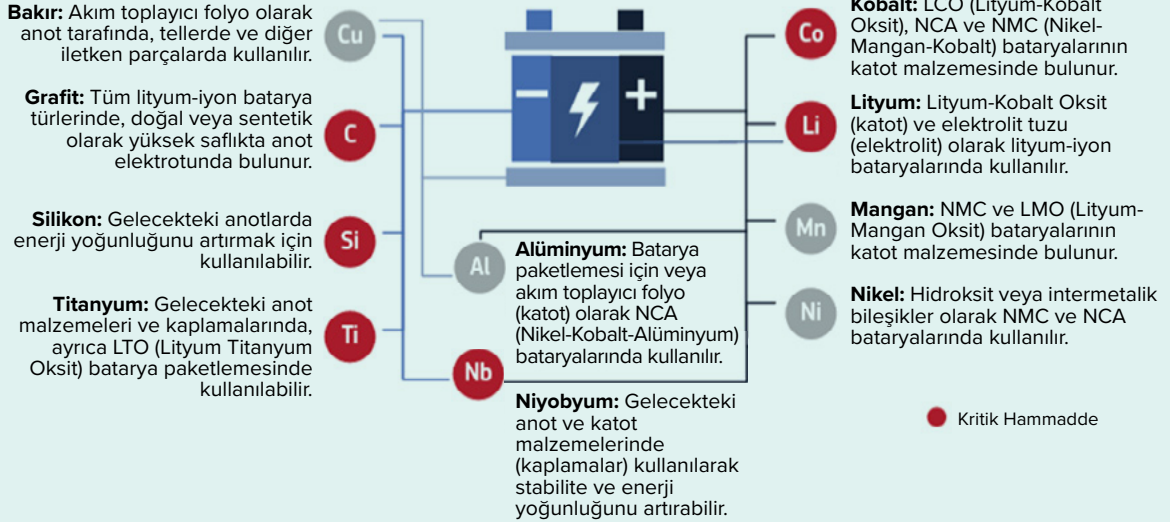
Küresel enerji dönüşümü kapsamında enerji depolama teknolojilerinin hızla gelişmesi, ulaşım alanında elektrikli araçların kullanımının artması çeşitli batarya türlerinin teknik özelliklerine göre farklı uygulamalarda kullanılmasını sağlamaktadır. Bataryaların kimyasal bileşimi, enerji yoğunluğu, termal kararlılık ve çevresel etkilere karşı güvenlik profilleri, her bir teknolojinin spesifik uygulamalara daha uygun hale gelmesine yol açmaktadır. Tablo 3'de farklı batarya teknolojilerinin kimyasal yapıları, enerji yoğunlukları, güvenlik özellikleri ve spesifik kullanım alanları teknik detaylarıyla sunulmaktadır [20-22].

Tablo 3. Batarya Üretim Malzemeleri ve Kullanım Alanları

Batarya Teknolojisi	Kimyasal Bileşim	Nadir Toprak Elementleri ve Kritik Hammaddeler	Kullanım Alanları
Lityum İyon Bataryalar (Li-ion / LIB)	Lityum, kobalt, nikel, manganez, grafit, elektrolit (genellikle lityum tuzları)	Lityum, Kobalt, Nikel, Grafit	Elektrikli araçlar, taşınabilir cihazlar, enerji depolama sistemleri
Lityum Demir Fosfat Bataryalar (LiFePO ₄ / LFP)	Lityum, demir, fosfat, grafit (katot ve anot malzemeleri), elektrolit (lityum tuzları)	Lityum, Grafit	Elektrikli araçlar, enerji depolama sistemleri
Kurşun Asit Aküler	Kurşun, kurşun dioksit, sülfürik asit, su	Kurşun	Otomotiv, acil durum sistemleri, yenilenebilir enerji destek sistemleri
Nikel-Metal Hidrit (NiMH) Bataryalar	Nikel, metal hidrit alaşımları (genellikle lantan, neodim, praseodim), elektrolit (alkalin çözelti)	Nikel, Lantan, Neodim, Praseodim	Hibrit araçlar, elektronik cihazlar
Nikel-Kadmiyum Bataryalar (NiCd)	Kadmiyum, nikel oksit hidroksit, elektrolit (potasyum hidroksit çözeltisi)	Kadmiyum, Nikel	Endüstriyel uygulamalar, havacılık

3.2.1. Kritik Hammaddelerin Batarya Teknolojilerinde Kullanım Alanları

Batarya teknolojilerinde kullanılan kritik malzemeler, stratejik öneme sahip olup, arzında zorluklar yaşanabilecek maddelerdir. Genellikle belirli bölgelerde sınırlı miktarda bulunmaları ve artan talep nedeniyle tedarik riski oluştururlar. Özellikle lityum, kobalt ve nikel gibi malzemeler batarya teknolojilerinde sahip olduğu benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklerden dolayı günümüz teknolojilerinde alternatifsizdir, ancak bu malzemelerin çıkarılması çevresel ve sosyal sorunlara yol açabilir. Geri dönüşüm oranlarının düşük olması, bu malzemelere olan bağımlılığı artırır. Ayrıca, kritik malzemelerin ikamesi zor olduğundan, enerji depolama ve elektrikli araç teknolojilerinde sürdürülebilir bir çözüm bulunmasını zorlaştırır. Bu nedenle, kritik malzemelerin sürdürülebilir bir şekilde temin edilmesi, teknolojik ilerlemenin devamı ve sürdürülebilir teknolojik uygulamalar için gereklidir. Genel olarak batarya komponentlerinde kullanılan malzemeler Şekil 9'da verilmiştir. Tablo 4'te, farklı batarya teknolojilerinde kullanılan kritik hammaddeler ve bu hammaddelerin bataryalardaki işlevleri detaylandırılmıştır.



Şekil 9. Batarya Teknolojilerinde Yer Alan Kritik Hammaddeler [23]

Batarya teknolojileri, kullanılan kritik hammaddelere bağlı olarak farklı performans, çevrim ömrü ve güvenlik seviyeleri sunmaktadır. Elektrikli araçlar, enerji depolama sistemleri ve tüketici elektroniği gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılan bataryalar, kimyasal bileşimlerine göre farklı hammaddelere ihtiyaç duymaktadır.

Tablo 4’ te batarya türlerinde kullanılan lityum, kobalt, nikel, grafit, mangan ve diğer kritik hammaddelerin batarya bileşenlerindeki işlevleri detaylandırılmaktadır. Katot ve anot malzemeleri, elektrolit bileşenleri ve akım toplayıcılar gibi bataryanın temel yapı taşlarını oluşturan bu hammaddeler, enerji yoğunluğu, termal dayanıklılık, şarj-deşarj verimliliği gibi temel performans kriterlerini doğrudan etkilemektedir [24-26].

Tablo 4. Batarya Teknolojilerinde Kritik Hammaddelerin Kullanım Alanları

Batarya Teknolojisi	Lityum	Kobalt	Nikel	Grafit	Mangan	Alüminyum	Bakır	Kurşun	Kadmiyum
Lityum iyon Bataryalar (Li-ion / LIB)	iyon taşıma amacıyla Anot, Katot' malzemelerinde kullanılır	Katot stabilizasyonu amacıyla Katot (LCO, NMC, NCA) malzemelerde kullanılır	Katot kapasitesini artırma amacıyla (kapasitesinin (mAh/g) ve enerji yoğunluğunun (Wh/kg)) Katot (NMC, NCA) malzemelerinde kullanılır	Lityum iyonu depolama amacıyla Anot' da kullanılır.	Katot stabilitesi ve termal yönetim için Katot (NMC) malzemesinde kullanılır.	Akim toplayıcı olarak Katot Akım Toplayıcısında kullanılır	Akim toplayıcı olarak Anot Akım Toplayıcısında kullanılır		
Lityum Demir Fosfat Bataryalar (LiFePO ₄ / LFP)	iyon taşıma amacıyla Katot (LiFePO ₄) malzemede kullanılır			Lityum iyon depolama amacıyla Anot' da kullanılır		Akim toplayıcı olarak Katot Akım Toplayıcısında kullanılır	Akim toplayıcı olarak Anot Akım Toplayıcısında kullanılır		
Kurşun Asit Bataryalar								Elektrot malzemesi olarak Anot ve Katot'da kullanılır.	
Nikel-Metal Hidrit Bataryalar (NiMH)			Elektrot malzemesi olarak, Katot'da kullanılır.						
Nikel-Kadmiyum Bataryalar (NiCd)			Elektrot malzemesi olarak, Katot'da kullanılır.						Elektrot malzemesi olarak Anot'da kullanılır.

Tablo 5. Batarya Teknolojilerinin Kritik Hammadde Oranları [27,28]

Batarya Teknolojisi	Lityum (%)	Kobalt (%)	Nikel (%)	Demir (%)	Fosfat (%)	Grafit (%)	Kurşun (%)	Kadmiyum (%)	Diğer Metaller (%)	Sülfürik Asit (%)	Plastik (%)	Alüminyum (%)	Bakır (%)
Lityum İyon Bataryalar (Li-ion / LIB)	5-7	15-20	40-50	-	-	10-15	-	-	-	-	-	5-10	5-10
Lityum Demir Fosfat Bataryalar (LiFePO4 / LFP)	5-7	-	-	35-40	40-45	5-10	-	-	-	-	-	5-10	5-10
Kurşun Asit Bataryalar	-	-	-	-	-	-	60-70	-	-	20-30	5-10	2-5	2-5
Nikel-Metal Hidrit Bataryalar (NiMH)	-	-	40-50	-	-	-	-	-	Nadir Toprak Elementleri 20-30	-	5-10	-	-
Nikel-Kadmiyum Bataryalar (NiCd)	-	-	20-30	-	-	-	-	30-40	-	-	5-10	-	-

Tablo 5, farklı batarya teknolojilerinin bileşimini ve bu teknolojilerde kullanılan hammaddelerin yüzdesel dağılımını göstermektedir. Lityum iyon (Li-ion) bataryalar, lityum, kobalt, nikel ve grafit gibi kritik malzemelere en yüksek oranda bağımlı olan teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu bataryalarda toplam bileşimin yaklaşık %60-70'i kritik hammaddelerden oluşmaktadır. Özellikle NMC ve NCA kimyalarına sahip lityum iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu sağlamak için nikel ve kobalt kullanımında en üst sırada yer almaktadır.

Lityum demir fosfat (LFP) bataryalar ise kobalt ve nikel içermemesi nedeniyle daha düşük kritik hammadde bağımlılığına sahiptir ve bileşiminin yalnızca %10-15'i lityum ve grafit gibi kritik malzemelerden oluşmaktadır. Kurşun asit bataryalar, toplam bileşimin %60-70'ini kurşun ve sülfürik asit gibi yaygın malzemeler oluşturduğu için kritik hammadde kullanımı bakımından daha sürdürülebilir. Nikel-metal hidrit (NiMH) bataryalar ise nikel ve nadir toprak elementlerine bağımlı olup, bileşiminin yaklaşık %40-50'si kritik hammaddelerden oluşmaktadır. Nikel-kadmiyum (NiCd) bataryalar ise %50-60 oranında kritik malzeme içermekle birlikte, kadmiyumun çevresel etkileri nedeniyle kullanım alanı giderek azalmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, lityum iyon bataryalar kritik hammaddelere

en fazla bağımlı teknoloji olarak öne çıkarken, LFP ve kurşun asit bataryalar, daha düşük kritik hammadde kullanımı ile alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Ön Araştırma çalışması kapsamında, batarya teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan kritik hammaddelerden olan lityum, kobalt, nikel, grafit, mangan, alüminyum, bakır, kurşun ve kadmiyumun özellikleri ve bu malzemelere yönelik potansiyel kazanım alanları değerlendirilmiştir.

Lityum:

Lityum, lityum-iyon bataryaların katot ve elektrolit bileşiminde yer alarak enerji depolama kapasitesini ve şarj-deşarj döngü ömrünü artıran temel elementtir. Yüksek enerji yoğunluğu ve düşük ağırlığı nedeniyle elektrikli araç bataryaları, taşınabilir elektronik cihazlar ve enerji depolama sistemlerinde kullanılmaktadır. Katı hal bataryalar ve ileri nesil enerji depolama çözümleri için de mevcut malzeme teknolojilerine göre vazgeçilmez bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Küresel arzın büyük kısmı Avustralya, Şili, Çin ve Arjantin'den sağlanırken, işleme süreçlerinde Çin'in hakimiyeti bulunmaktadır. Lityum madenciliği, su tüketimi ve ekosistem üzerindeki etkileri nedeniyle çevresel riskler barındırmakta olup, sürdürülebilir madencilik yöntemleri ve geri dönüşüm süreçleri geliştirilerek arz güvenliği artırılmaya çalışılmaktadır.

Kobalt:

Kobalt, lityum-iyon bataryaların katot yapısında yer alarak enerji yoğunluğunu ve termal stabilitesini artıran bir metaldir. Özellikle nikel-mangan-kobalt (NMC) ve lityum-kobalt-oksit (LCO) batarya kimyalarında kullanılmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu sağlaması nedeniyle elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerinde tercih edilmektedir. Ancak üretiminin %70'inin Demokratik Kongo Cumhuriyeti'nde gerçekleşmesi, jeopolitik riskler ve tedarik bağımlılığı yaratmaktadır. Alternatif olarak kobalt içermeyen batarya kimyaları (örneğin lityum-demir-fosfat - LFP) geliştirilmekte ve geri dönüşüm teknolojileri yaygınlaştırılmaktadır.

Nikel:

Nikel, bataryaların katot malzemesinde kullanılarak enerji yoğunluğunu artırır ve bataryaların uzun ömürlü olmasını sağlar. Yüksek nikel içerikli bataryalar (özellikle NMC ve nikel-kobalt-alüminyum - NCA) uzun menzil sağlayan elektrikli araç bataryalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Arzın büyük bölümü Endonezya, Filipinler ve Rusya'dan sağlanırken, yüksek saflıkta nikel üretimi enerji yoğun ve çevresel olarak zararlı süreçler içermektedir. Düşük kobalt içerikli yüksek nikel katot bileşimleri geliştirilerek maliyet düşürülmeye ve sürdürülebilirlik artırılmaya çalışılmaktadır.

Grafit:

Grafit, lityum-iyon bataryaların anot malzemesi olup, iyon taşınımı ve elektriksel iletkenliği sağlamada rol oynar. Doğal ve sentetik grafit, anot üretiminde kullanılır ve bataryaların şarj-deşarj kapasitesini artırır. Küresel arzın büyük kısmı Çin tarafından karşılanmakta

olup, bu durum tedarik zinciri risklerini artırmaktadır. Grafitin işlenmesi sırasında kullanılan asitle zenginleştirme süreçleri çevresel zararlara yol açabileceğinden, sentetik grafit üretimi ve geri dönüşüm teknolojileri ön plana çıkmaktadır.

Mangan:

Mangan, bataryaların katot kimyasında stabiliteyi artırarak batarya ömrünü uzatan bir metaldir. NMC ve lityum-mangan-oksit (LMO) bataryalarda kullanılarak batarya maliyetini düşürmekte ve güvenlik performansını artırmaktadır. Güney Afrika, Çin ve Avustralya, küresel mangan üretiminin büyük kısmını sağlamaktadır. Mangan madenciliği sırasında ortaya çıkan ağır metal kirliliği, çevresel sürdürülebilirlik açısından sorun oluşturmaktadır.

Alüminyum:

Alüminyum, batarya bileşenlerinde katot desteği ve elektrik bağlantılarında kullanılan hafif bir metaldir. Özellikle batarya hücreleri içinde akım toplayıcı olarak anot ve katot folyosunda kullanılmaktadır. Ayrıca, batarya modülleri ve paketleme sistemlerinde yapısal eleman olarak da rol oynamaktadır. Çin, Hindistan ve Rusya küresel alüminyum üretiminde başı çekmektedir. Alüminyum üretimi yüksek enerji tüketimi gerektirdiğinden, geri dönüşüm süreçleri enerji tüketimini azaltmak için yaygınlaşmaktadır.

Bakır:

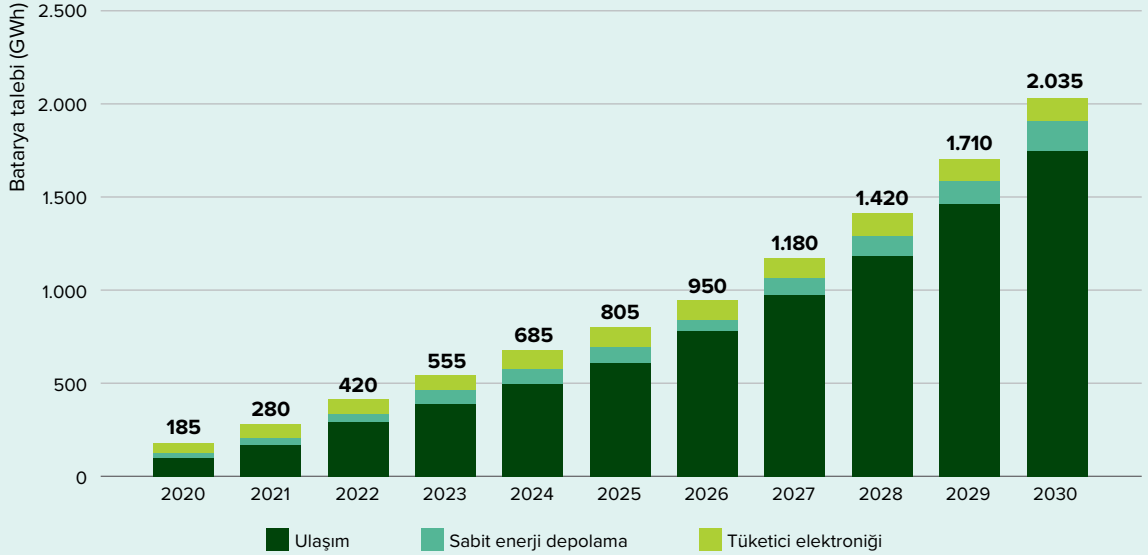
Bakır, batarya akım toplayıcıları, elektrik iletim sistemleri ve yüksek voltaj bağlantılarında kullanılan yüksek iletkenlik sağlayan bir metaldir. Bataryalarda anot akım toplayıcı olarak görev yapar ve enerji kayıplarını minimize eder. Elektrikli araçlarda, yenilenebilir enerji altyapılarında ve enerji depolama sistemlerinde vazgeçilmez bir bileşen olup, arzının büyük bölümü Şili, Peru ve Çin'den sağlanmaktadır. Bakır madenciliği su tüketimi ve ekosistem tahribatı açısından çevresel etkiler barındırmakta olup, bakır geri dönüşümü stratejik öncelik kazanmaktadır.

Kurşun ve Kadmiyum:

Kurşun ve kadmiyum, geleneksel bataryalarda kullanılan ancak toksik etkileri nedeniyle yeni nesil batarya teknolojilerinde sınırlanan metaller arasındadır. Kurşun-asit bataryalar düşük maliyetli enerji depolama çözümlerinde ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılırken, geri dönüşüm süreçleri sayesinde %90'a varan oranlarda geri kazanılabilmektedir. Kadmiyum ise yüksek toksisitesi nedeniyle birçok ülkede kısıtlanmış olup, halen belirli endüstriyel ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır [27,28].

3.3. KÜRESEL BATARYA TALEBİ, KRİTİK HAMMADDE İHTİYACI VE ATIL BATARYA PROJEKSİYONU

Şekil 10'da, 2020-2030 yılları arasında küresel batarya talebinin sektörel dağılımı ve yıllık büyüme eğilimi gösterilmektedir. 2030 yılına kadar gerçekleşmesi beklenen bu kapasite artışının, enerji geçiş süreçlerinde enerji depolama sistemlerine olan ihtiyacı daha da artıracakı düşünülmektedir. Ancak, bu büyümenin çevresel ve ekonomik etkilerinin dengeli bir şekilde yönetilmesi, sektör için bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.[29].



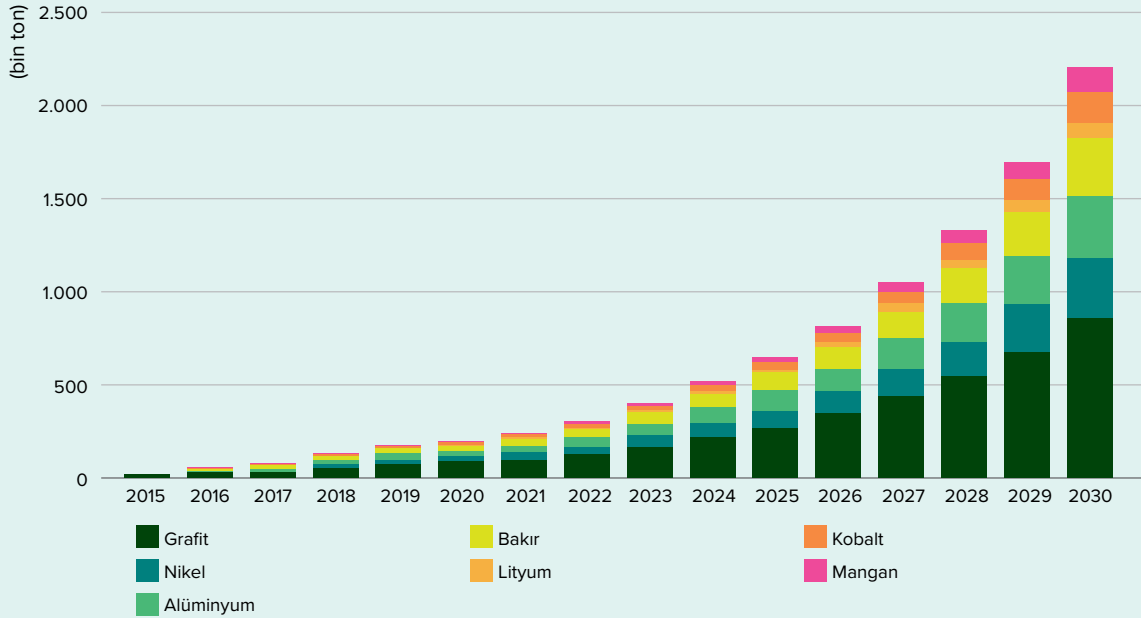
Şekil 10. Batarya Kullanım Alanları (2020- 2030) [30]

Şekil 10 incelendiğinde, batarya talebi, özellikle ulaşım, sabit enerji depolama ve tüketici elektroniği sektörlerinde hızla arttığı gözlemlenmektedir. Bu talep, elektrikli araçların benimsenmesi, yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaşması ve enerji depolama çözümlerinin artan önemiyle doğru orantılıdır. Her yıl artması öngörülen enerji depolama ihtiyacı, yalnızca enerji depolama kapasitesine yönelik değil, aynı zamanda bu teknolojilerin sürdürülebilir şekilde üretilmesine dair bir baskı oluşturmaktadır. Ancak bu büyüme, sadece toplam batarya talebinin artışıyla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda batarya üretiminde kullanılan hammaddelerin önemini de daha belirgin hale getirmektedir. Küresel talepteki bu büyümenin etkisiyle özellikle lityum, kobalt, nikel ve grafit gibi kritik hammaddelere olan taleplerinde artması beklenmektedir. Bu doğrultuda, Şekil 11'de,

2015-2030 yılları arasında elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon bataryalar için küresel metal ve malzeme talebindeki artış gösterilmektedir.

Talep artışı

Küresel metal ve malzeme talebi ile elektrikli araç (EV) lityum-iyon bataryalarından beklenen talep

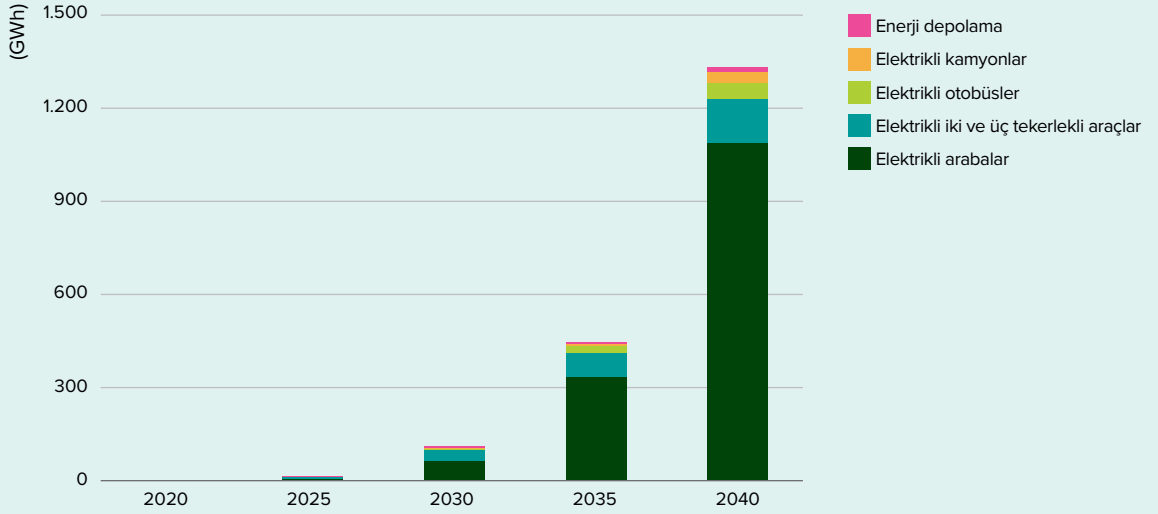


Şekil 11. Elektrikli Araç Lityum-İyon Bataryaları İçin Küresel Metal ve Malzeme Talep Artışı (2015-2030) [31]

Şekil 11 incelendiğinde, küresel talepteki bu büyümenin doğrudan bir yansıması olarak elektrikli araç bataryaları için gerekli olan hammaddelerin (grafit, nikel, alüminyum, bakır, lityum, kobalt ve mangan) kullanımında büyük bir artış yaşanması beklenmektedir.

2025 yılından itibaren, batarya üretiminde kullanılan hammaddelerin toplam ihtiyacının hızla yükseldiği görülmektedir. 2030 yılına gelindiğinde, küresel lityum-iyon batarya talebinden kaynaklı hammadde ihtiyacı 2,500 bin ton (2.5 milyon ton) seviyesine yaklaşacaktır. Bu artış, **özellikle grafit ve nikel için belirgin hale gelirken, lityum ve kobalt gibi hammaddelerde de tedarik zinciri kırılganlıklarını artırma** riski yaşatmaktadır. Artan talebe karşılık ayrıca lityum, kobalt ve mangan gibi kritik hammaddeler için batarya üretiminin sürdürülebilirliği, yaşam döngüleri ve tekrar kazanımı konuları daha fazla önem kazanmaktadır. Bununla birlikte, Şekil 12’de, küresel ölçekte kullanılmış batarya miktarına yönelik 2020-2040 yılları arasındaki öngörüler sunulmaktadır.

Kullanılmış batarya miktarı



Şekil 12. Küresel Kullanılmış Batarya Miktarı Öngörüsü (2020- 2040) [32]

Şekil 12’de, 2020-2040 arasında atıl durumda olan batarya miktarının yaklaşık 140 kat artacağı gösterilmektedir. Bu büyümenin en büyük kaynağı elektrikli binek araçlar olurken, elektrikli iki ve üç tekerlekli araçlar da (mikro-mobilite) katkı sağlamaktadır. Ayrıca elektrikli otobüsler, ağır vasıtalar ve enerji depolama sistemleri de toplam harcanmış batarya miktarının giderek artan bir bölümünü oluşturmaktadır.

2030’dan sonra harcanmış bataryaların hızla yükselmesi, batarya geri dönüşüm teknolojilerine ve alternatif kullanım yöntemlerine olan ihtiyacı artıracak değerlendirilmektedir. Bu durum, batarya üretiminde kullanılan kritik hammaddelerin sürdürülebilir tedarikini önemli hale getirmektedir. Özellikle lityum, kobalt, nikel ve grafit gibi hammaddelere olan talep, madencilik ve geri dönüşüm süreçlerine olan ilgiyi artırırken, küresel tedarik zincirlerinde kırılganlık yaratabilir.

Sonuç olarak, batarya kullanımının yaygınlaşması, yalnızca üretim süreçlerini değil, aynı zamanda kullanım ömrü sonunda yönetim süreçlerini de küresel ölçekte bir öncelik haline gelmektedir.

Türkiye Perspektifinden Değerlendirmeler:

Türkiye’de batarya teknolojilerine ve kullanımına yönelik sektörel artışlar yaşanmaktadır. Elektrikli araçlardan mikro mobilite çözümlerine, batarya üretim tesislerinden enerji depolama sistemlerine kadar geniş bir yelpazede batarya kullanımı hızla artmakta ve bu artış yatırımlarla devam etmektedir.

- Elektrikli Araçların Yaygınlaşması:
 - 2024 yılı itibarıyla elektrikli otomobil sayısı 183.776’ya ulaşmış ve yıllık %129,6 büyüme kaydedilmiştir.

- Mikro Mobilite ve Şehir İçi Elektrifikasyonun Artışı
 - 2023 itibarıyla Türkiye’de 300 binden fazla elektrikli scooter kullanılmakta olup, 2025’e kadar bu sayının 500 bine ulaşması beklenmektedir.
 - Türkiye mikro mobilite pazarının 2030 yılına kadar 15-22 milyar ABD doları seviyesine ulaşabileceğini öngörmektedir.
- Batarya Üretim Fabrikaları ve Yatırımlar
 - 2024 yılı itibarıyla, enerji sektöründe hücre ve batarya fabrikası kurulumu için yapılan anlaşmaların toplam değeri 1 milyar ABD doları aşmıştır.
 - Yatırım teşviklerinin bu alanda artması beklenmektedir.
- Enerji Depolama Sistemleri (EDS) ve Kapasite Artışı
 - Enerji depolama sistemleri (EDS) alanında önemli adımlar atmaktadır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) verilerine göre, Aralık 2023 itibarıyla toplam 260 gigavat (GW) kapasiteye sahip yenilenebilir enerji santralleri için 5.968 adet batarya enerji depolama sistemi başvurusu alınmıştır.
 - Türkiye’nin enerji depolama kapasitesinin 2035 yılına kadar 15 gigavatsaate ulaşması hedeflenmektedir[33-35].
- Türkiye’de batarya teknolojilerine yönelik yatırımlar ve talep hızla artmaktadır. Elektrikli araçlar, mikro mobilite çözümleri, batarya üretim tesisleri ve enerji depolama sistemleri gibi birçok alanda batarya kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ancak, bu büyüme kritik hammadde bağımlılığı, geri dönüşüm eksikliği ve sürdürülebilir üretim süreçlerine olan ihtiyacı da beraberinde getirmektedir.
- Türkiye, batarya üretim kapasitesini artırma yolunda adımlar atsa da, bu teknolojinin temel bileşenleri olan lityum, nikel, kobalt ve grafit gibi hammaddeler büyük ölçüde ithal edilmektedir. Bu durum, batarya üretim maliyetlerini artırırken, tedarik zinciri kırılganlıklarını da derinleştirerek dışa bağımlılığı artırmaktadır.
- Türkiye’nin lityum, kobalt, grafit ve nikel rezervleri düşük seviyededir. Ülke, yıllık yaklaşık 1.634 ton lityum karbonat ithal etmekte olup, toplam lityum ithalatı 23,5 milyon ABD doları seviyesindedir. Eskişehir Eti Maden tesislerinde bor kilerinden yıllık 600 ton lityum karbonat üretimi yapılsa da bu miktar Türkiye’nin ihtiyacının yalnızca %20-30’unu karşılamaktadır. 2021 yılı verilerine göre Türkiye 14.001 ton grafit ithal etmiş, küresel kobalt rezervlerinin ise yalnızca %1,1’ine sahiptir.
- Büyüyen batarya pazarı, artan kritik hammadde ihtiyacına yönelik yenilikçi yöntemleri değerlendirmeli ve bu yöntemlere yönelik düzenlemeleri desteklemelidir. Özellikle, kent içi madencilik (urban mining) yaklaşımlarıyla geri dönüşüm süreçleri güçlendirilerek, bataryalardan üretimde kullanılabilir hammadde elde edilmesi öncelik olmalıdır. **İkinci kullanım senaryoları geliştirilerek bataryaların ömrü uzatılabilir, böylece ithalat bağımlılığı azaltılarak batarya ihracat potansiyeli artırılabilir** [36,38].

4.

BATARYANIN ÖMRÜNÜN SONLANMASI VE YÖNETİMİ

Bir bataryanın ömrünün bitmesi ve kullanım dışına çıkması; temel olarak bataryanın başlangıçtaki kapasitesinin ve performansının belirli bir seviyenin altına düşmesiyle, orijinal kullanım amacına hizmet edememesi durumudur. Batarya ömrünün sona ermesine yol açan başlıca nedenler arasında kimyasal değişiklikler, termal stres, döngü yoğunluğu ve derin deşarj ile aşırı şarj yer almaktadır (Şekil 13).

Ömrü sonlanan bir bataryanın karşılaşılabileceği üç farklı senaryo vardır. Bunlar; İkincil kullanım, Geri Dönüşüm ve bertaraf olarak sıralanabilir. Bu yöntemler detaylı olarak Bölüm 4.1’de anlatılmaktadır.





Şekil 13. Bataryalarda Performans ve Ömür Kaybına Neden Olan Faktörler

- **Şarj ve deşarj döngüleri** sırasında bataryanın elektrotlarında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar, zamanla elektrot malzemelerinin bozulmasına ve kristal yapılarının değişmesine neden olur. Özellikle lityum-iyon bataryalarda, katot malzemelerindeki yapısal bozulmalar kapasite kaybına yol açar.
- **Yüksek sıcaklıklar**, bataryanın içindeki kimyasal reaksiyon hızını artırarak elektrot materyallerinin bozulmasını hızlandırır, soğuk ortamlar ise bataryanın performansını düşürerek enerji verimliliğini azaltır. Aşırı sıcaklık değişimleri, batarya hücrelerinde mekanik gerilmeler oluşturarak yapısal hasarlara neden olabilir.
- **Yüksek döngü yoğunluğu**, bataryanın şarj-deşarj işlemlerinin sık ve hızlı gerçekleştirilmesi anlamına gelir ve bu durum bataryanın ısınmasına ve kimyasal bozulmaların hızlanmasına neden olur.
- **Bataryanın tamamen boşaltılması veya aşırı şarj edilmesi** ise geri dönüşümsüz kimyasal değişikliklere yol açarak bataryanın kapasitesinde ani ve belirgin bir azalmaya sebep olabilir.

Bir bataryanın ömrünün sona erdiğini gösteren belirtiler arasında kapasite azalması, düşük performans, güvenlik riskleri ve artan iç direnç yer alır. Kapasite azalması, bataryanın şarj edilebileceği enerji miktarının orijinal seviyesinin altına düşmesiyle kendini gösterir; örneğin, %20 -30 oranında kapasite kaybı bataryanın kullanım ömrünün sona erdiğini gösterebilir (ya da %70-80 kapasitede olması). Düşük performans ise bataryanın enerji sağlayabilme kapasitesinin azalması,

cihazların daha hızlı boşalması veya çalışma sürelerinin kısalması şeklinde kendini gösterir. Her bir batarya teknolojisi için farklı olsa da genel güvenlik riskleri, bataryanın aşırı ısınması, şişmesi veya sızıntı yapması gibi fiziksel bozulmalarla ortaya çıkar ve bu durum bataryanın güvenli kullanımını tehdit eder. Artan iç direnç ise bataryanın enerji iletimini zorlaştırarak cihazların verimliliklerinin azalmasına neden olmaktadır[39-42].

4.1. BATARYA ÖMÜR DEĞERLENDİRMESİ – YAŞAM DÖNGÜSÜ

Batarya değerlendirme, bir bataryanın performansını, güvenliğini ve kullanım ömrünü belirlemek amacıyla bir dizi test ve analizden oluşur. Bu testler ve işlemler, batarya modülleri veya batarya hücrelerine göre farklılık gösterebilir. Bu farklılıklar; bataryanın tasarımına, kimyasal içeriğine, fiziksel yapısına ve kullanıldığı uygulama alanına bağlı olarak şekillenir. Örneğin, yüksek enerji yoğunluğu gerektiren uygulamalarda kullanılan lityum iyon bataryalar ile güvenlik açısından daha dayanıklı olan kurşun asit bataryaların değerlendirme kriterleri farklılık gösterebilir. Batarya ömrü değerlendirme sırasında yapılan testler, bataryanın enerji depolama kapasitesini, çevrim ömrünü, iç direnç seviyesini ve termal kararlılığını inceleyerek, bataryanın mevcut durumu hakkında bilgi sağlar. Fiziksel hasar testleri ve kimyasal analizler ise bataryanın yapısal bütünlüğünü ve geri kazanılabilir materyallerini ortaya koyar.

Bu değerlendirme süreçleri, bataryanın ikincil kullanım için uygun olup olmadığına veya geri dönüşüm sürecine yönlendirilmesi gerektiğine karar verilmesinde görev alır. Eğer bataryanın kapasitesi belirli bir seviyenin üzerindeyse, şebeke ölçekli enerji depolama, yedek güç sistemleri ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi uygulamalarda yeniden kullanımı mümkün olabilir. Ancak, yapılan testler sonucunda bataryanın ileri derecede kapasite kaybına uğradığı veya yapısal bütünlüğünün bozulduğu tespit edilirse, hidrometalurjik veya pirometalurjik süreçler ile geri dönüşüme yönlendirilerek lityum, nikel, kobalt ve diğer değerli metallerin kazanımı sağlanır. Bu iki seçenek, bataryanın mevcut durumu, güvenlik seviyesi ve ekonomik fizibilite gibi faktörlere bağlı olarak değerlendirilir. Bu karar alma süreçleri ve mekanizması incelenmiştir. Tablodaki kriterler doğrultusunda yapılan değerlendirmeler, bataryaların ömrü tamamlandıktan sonra bile çevresel etkilerini en aza indirerek verimli bir şekilde yeniden kullanılması veya sürdürülebilir bir şekilde bertaraf edilmesi amacıyla yapılmaktadır. Bu testler sonucunda elde edilen veriler, hem bataryanın mevcut durumunu hem de ileriye dönük potansiyel kullanım seçeneklerini belirlemede kullanılmaktadır. Tablo 6'da ise bu değerlendirmeler sırasında yapılan testler, amaçları ve ölçüm birimleri yer almaktadır [43,44].

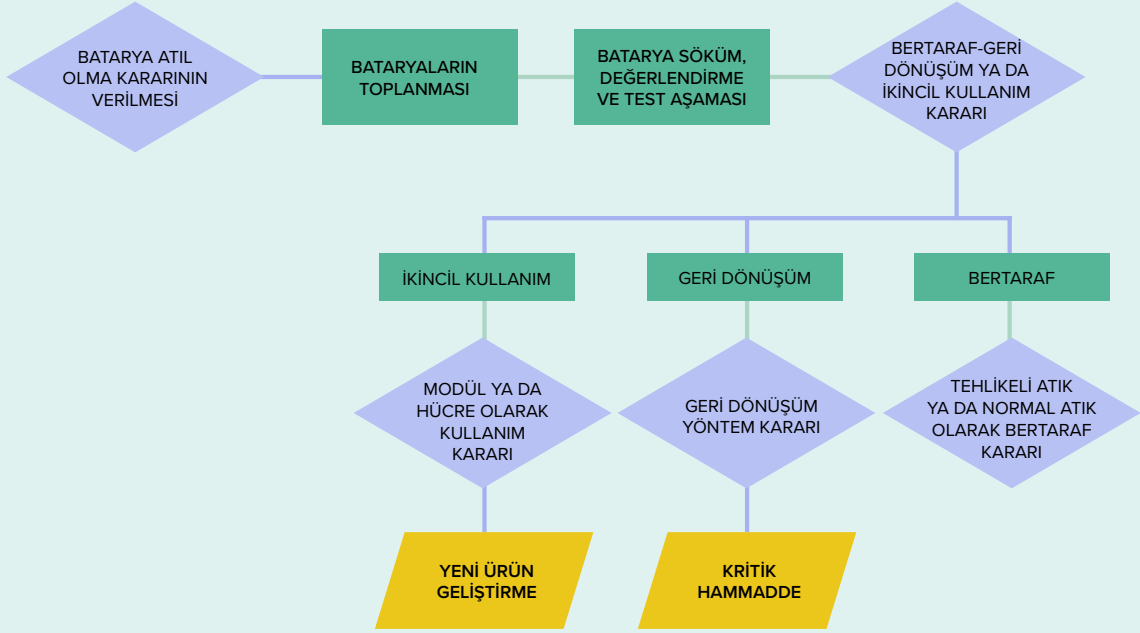
Tablo 6. Batarya Testleri ve Amaçları

Test	Yapılan İşlem ve Amacı	Ölçüm Birimi
Kapasite Testi	Bataryanın mevcut kapasitesi ölçülür ve bu kapasitenin bataryanın ilk kapasitesine oranı hesaplanır. Bu test, bataryanın enerji depolama kapasitesinde ne kadar kayıp yaşandığını belirlemek için yapılmaktadır.	mAh/Ah
İç Direnç (Empedans) Testi	Bataryanın iç direnci ölçülerek enerji iletimindeki verimlilik değerlendirilir. İç direnç seviyesinin tespit edilmesi, bataryanın enerji iletiminde verimliliğini ve iç bileşenlerde yaşanan olası bozulmaları anlamak amacıyla gerçekleştirilir.	mΩ
Kendiliğinden Deşarj Hızı Testi	Bataryanın tam şarj edildikten sonra belirli bir süre bekletilip kapasite kaybı ölçülür. Bu test, bataryanın ne kadar süre boyunca şarjını koruyabildiğini ve kullanım dışındayken enerji kaybının ne kadar hızlı olduğunu anlamak için yapılır.	% kapasite kaybı/gün
Termal Kararlılık Testi	Batarya farklı sıcaklık koşullarına maruz bırakılarak termal kararlılığı ve güvenliği test edilir. Bu test, bataryanın sıcaklık değişimlerine nasıl tepki verdiğini ve yüksek sıcaklıklarda güvenli olup olmadığını değerlendirmek amacıyla yapılmaktadır.	°C
Dış Görünüm ve Fiziksel Hasar Testleri	Bataryada şişme, çatlak, sızıntı gibi fiziksel hasar olup olmadığı görsel olarak incelenir. Bu işlem, bataryanın yapısal bütünlüğünü koruyup korumadığını ve güvenli bir çalışma sağlayıp sağlamadığını değerlendirmek için gerçekleştirilmektedir.	----
Çevrim Ömrü Testi	Batarya, belirli sayıda tam şarj ve deşarj döngüsünden geçirilerek kapasite kaybı incelenir. Bu test, bataryanın kaç kez şarj edilip deşarj edilebileceğini ve ömrünün ne kadar uzun olduğunu belirlemek için uygulanır.	Döngü sayısı
Kimyasal Analiz	Bataryanın kimyasal bileşenleri analiz edilir ve içerdiği toksik veya geri kazanılabilir maddeler belirlenir. Bu işlem, bataryada kullanılan malzemelerin yapısal özelliklerini ve potansiyel çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılır.	ppm/%

Bataryaların Ömür Sonu Yönetimi

Şekil 14'te bulunan diyagram, kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların yönetim sürecini göstermektedir ve daha önce belirtilen geri dönüşüm, ikincil kullanım ve bertaraf seçeneklerini detaylandırmaktadır.

Süreç, bataryanın atıl duruma düşmesiyle başlar ve bataryaların toplanması aşamasıyla devam eder. Daha sonra, söküm, değerlendirme ve test işlemleri gerçekleştirilerek bataryanın bertaraf, geri dönüşüm veya ikincil kullanım için uygun olup olmadığına karar verilir.



Şekil 14. Kullanım Ömrünü Tamamlamış Bataryaların Yönetim Akış Şeması

Geri Dönüşüm: Bataryanın içeriğindeki değerli metallerin ve kritik hammaddelerin geri kazanılması için uygun yöntem seçilir. Bu süreç sonunda, kritik hammadde üretimi sağlanır.

İkincil Kullanım: Bataryanın modül veya hücre bazında yeniden kullanılabilir olup olmadığı değerlendirilir. Eğer uygun görülürse, batarya yeni ürün geliştirme süreçlerine yönlendirilir.

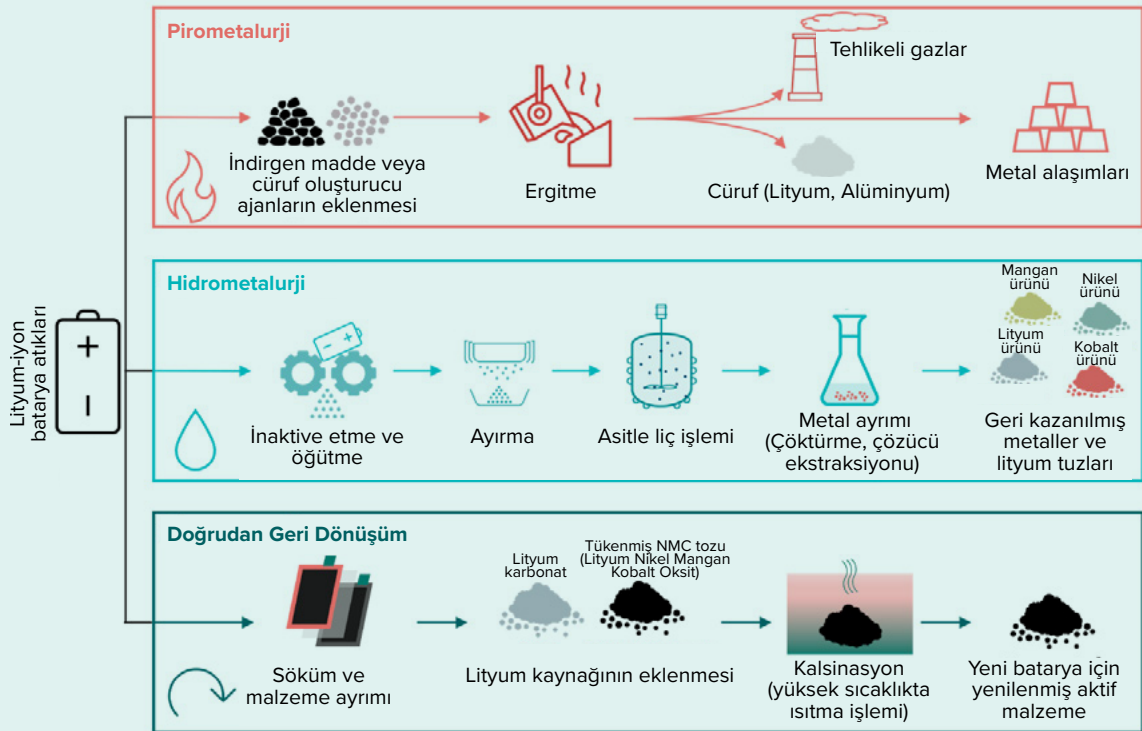
Bertaraf: Batarya tehlikeli atık ya da normal atık statüsüne göre uygun bertaraf yöntemiyle imha edilir.

Bataryaların döngüsel ekonomi yaklaşımıyla nasıl değerlendirilebileceğini ve farklı senaryolara göre nasıl yönetilmesi gerektiğini araştırma çalışma kapsamında değerlendirilmiştir.

4.1.1. Geri Dönüşüm Süreci

Batarya geri dönüşüm süreçleri, kullanılan teknolojiye bağlı olarak üç ana yöntemle yürütülmektedir: Pirometalurji, Hidrometalurji ve Doğrudan Geri Dönüşüm. Bu yöntemler, atık bataryaların bileşenlerini geri kazanmak ve sürdürülebilir malzeme döngüsüne katkı sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Kurşun-asit, nikel-kadmiyum (NiCd), nikel-metal hidrit (NiMH) ve lityum-iyon (LIB) gibi farklı batarya türleri, içerdiği metallerin yapısına ve ekonomik değerine bağlı olarak farklı geri dönüşüm teknikleriyle işlenmektedir. Biyometalurji ve elektrometalurji gibi alternatif yöntemler, geri dönüşüm süreçlerinde enerji tüketimini

azaltma ve çevresel etkileri minimize etme potansiyeli taşımakla birlikte, henüz ticari ölçekte uygulanabilirlikleri sınırlıdır. Bu nedenle, pirometalurji, hidrometalurji ve doğrudan geri dönüşüm yöntemleri, geri kazanım verimlilikleri, endüstriyel ölçeklenebilirlikleri ve mevcut geri dönüşüm tesislerine entegrasyon kolaylıkları nedeniyle öncelikli olarak tercih edilmektedir. Şekil 15'te bu üç ana süreç için aşamalar gösterilmiştir [43-45].



Şekil 15. Batarya Geri Dönüşüm Süreçleri [46]

4.1.1.1. Piro-Metalurjik Geri Dönüşüm

Piro-metalurjik yöntemler, batarya geri dönüşümünde büyük ölçekli uygulamalarda sıkça kullanılan yüksek sıcaklık bazlı bir teknolojidir. Bu yöntem, bataryaların içerisindeki değerli metallerin (örneğin, kobalt, nikel, bakır) geri kazanımını sağlamak amacıyla 600–1.500 °C arasında gerçekleştirilen işlemlerle metalik bileşenlerine ayrılmasını mümkün kılar. Farklı metal türleri için farklı sıcaklıklar gerekir. Örneğin; alüminyum için gerekli olan pirometalurjik işlem sıcaklığı 660-750 °C arasındayken, bakır için gerekli olan sıcaklık 1000-1300 °C arasındadır. Yüksek sıcaklık ortamında, bataryanın organik bileşenleri yanar veya buharlaşırken, metalik bileşenler fırın tabanında birikerek daha sonra saflaştırılmak üzere ayrıştırılır. Sürecin verimliliği, modern fırın teknolojileri ve enerji optimizasyon yöntemleriyle artırılmaktadır.

Bu yöntemin büyük ölçekli uygulamalarda tercih edilmesinin temel nedeni, farklı kimyasal yapıya sahip bataryaları ön ayrıştırma veya deşarj gibi maliyetli işlemlere ihtiyaç duymadan topluca işleme yeteneğidir. Piro-metalurjik süreç, elektrikli araç (EV) bataryaları gibi büyük ve karmaşık yapıdaki atıkları yüksek verimlilikle işlemeye olanak tanır. Özellikle değerli metallerin doğrudan metalik formda geri kazanılması, bataryaların döngüsel ekonomiye yeniden kazandırılmasını kolaylaştırır. Piro-liz aşaması, bataryadaki organik bağlayıcıların termal parçalanmasını sağlar ve böylece metalik bileşenlerin daha kolay ayrışmasını mümkün kılar. Ayrıca, piro-metalurjik yöntemler, büyük ölçekli geri dönüşüm operasyonlarının hızlı ve sürekli bir şekilde yürütülmesine imkan tanır. Farklı türde ve bileşimdeki bataryaların bir arada işlenebilmesi, bu yöntemin endüstriyel geri dönüşüm tesislerinde yaygın olarak kullanılmasının bir diğer nedenidir. Ancak, enerji tüketiminin yüksek olması ve bazı metallerin (örneğin, lityum) bu süreçte düşük verimle geri kazanılması, yöntemin sürdürülebilirliğini artırmak için geliştirilmesi gereken alanlar arasında yer almaktadır. Buna rağmen, piro-metalurjik süreç, batarya geri dönüşümünde mevcut teknolojiler arasında en bilinen yöntemlerden biridir [46-49].

Aşağıda, pirometalurjik süreçler tanımlanmış ve ilgili örneklerle açıklanmıştır.



Şekil 16. Pirometalurjik Süreçler

Oksitlenme

Oksitlenme sürecinde, metallerin içeriğinde bulunan istenmeyen elementler oksijenle reaksiyona girerek oksit fazına taşınır. Bu oksitler, genellikle cüruf fazı ile ayrılarak metalin saflığını artırır. Örneğin, bakır üretiminde fosfor gibi safsızlıkların oksitlenmesi sırasında bu elementler cürufa taşınır ve ayrılır.

Oksit İndirgeme

Oksit indirgeme, metal oksitlerin karbon veya hidrojen gibi indirgen maddelerle reaksiyona sokularak metale dönüştürülmesi sürecidir. Örneğin, demir oksidin (Fe_2O_3) kok kömürü ile indirgenmesi sonucunda metalik demir elde edilir.

Saflaştırma

Saflaştırma, metalin içindeki safsızlıkların giderilmesi amacıyla uygulanan bir süreçtir. Bu işlem genellikle ergitme sırasında cüruf ayrımı ile gerçekleştirilir. Örneğin, kurşun üretiminde metal fazındaki safsızlıklar ayrılarak yüksek saflıkta kurşun elde edilir.

Ayrıştırma

Ayrıştırma, metalin farklı fazlardan (örneğin, cüruf ve metal fazı) fiziksel veya kimyasal yöntemlerle ayrılmasıdır. Örneğin, nikel üretiminde metal fazının cüruf fazından ayrılması sırasında bu süreç uygulanır.

Ergitme

Ergitme, metal ve cüruf fazlarının sıvı fazda ayrıldığı bir süreçtir. Bu işlem genellikle yüksek sıcaklıkta fırınlarda gerçekleştirilir. Örneğin, bakır cevherinin ergitilmesi sırasında, metalik bakır cüruftan ayrılarak elde edilir.

Kalsinasyon

Kalsinasyon, karbonat veya hidrat minerallerin yüksek sıcaklıkta oksitlere dönüştürülmesi sürecidir. Örneğin, kalsiyum karbonat (CaCO_3) kalsinasyon sırasında kalsiyum oksit (CaO) ve karbondioksit (CO_2) dönüşür.

Termal Buharlaştırma

Bu süreçte, uçucu özellik gösteren metaller buharlaştırılarak ayrıştırılır. Örneğin, çinko oksit, termal buharlaştırma sırasında metalik çinkoya dönüştürülür.

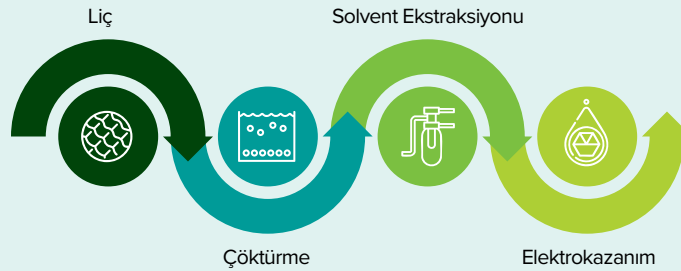
Tablo 7’de farklı malzeme türleri için kullanılan pirometalurjik işlem türleri, işlem sıcaklık aralıkları ve nihai ürünler verilmiştir [50-55].

Tablo 7. Pirometalurji Süreçlerinde Malzemeler ve Sıcaklık Aralıkları

Malzeme	Kullanılan Pirometalurjik İşlem Türü	İşlem Sıcaklık Aralığı (°C)	Nihai Ürünler
Bakır	Ergitme ve Redüksiyon	1000-1300	Metalik Bakır
Kurşun	Ergitme ve Saflaştırma	1000-1250	Metalik Kurşun
Çinko	Oksit İndirgeme ve Termal Buharlaştırma	900-1100	Metalik Çinko veya Çinko Oksit
Nikel	Oksit İndirgeme ve Elektroliz	1400-1600	Metalik Nikel veya Nikel Oksit
Alüminyum	Elektrotermik İşlemler ve Kalsinasyon	660-750	Metalik Alüminyum veya Alüminyum Oksit
Demir	Yüksek Fırın İşlemi ve Ayırıştırma	1300-1600	Metalik Demir veya Çelik (Alaşım)
Kobalt	Oksit Dönüşümü ve Elektroliz	900-1200	Metalik Kobalt veya Kobalt Oksit
Lityum	Karbonat Dönüşümü ve Elektroliz	200-600	Lityum Karbonat (Bileşik) veya Metalik Lityum

4.1.1.2. Hidro-Metalurjik Geri Dönüşüm

Hidrometalurji, metallerin düşük sıcaklıklarda sıvı çözeltiler kullanılarak cevherlerden, atıklardan veya konsantrelerden elde edilmesini sağlayan metalurjik bir yöntemdir. Lityum, kobalt ve nikel gibi kritik metallerin %95 ve üzeri saflıkta geri kazanımını sağlayan bu yöntem, özellikle yüksek saflık gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Düşük enerji tüketimi, yüksek geri kazanım oranı ve çevresel etkilerin minimize edilmesi açısından avantajlıdır. İşlem, kimyasal çözeltilerle metallerin seçici olarak çözündürülmesi, iyon değişimi ve çöktürme teknikleriyle saflaştırılması aşamalarını içerir. Selektif çöktürme ve solvent ekstraksiyonu gibi yöntemler kullanılarak değerli metaller ayrıştırılır ve yeniden kullanılabilir hale getirilir. Aşağıdaki şekilde hidrometalurji süreçlerinde kullanılan temel işlem adımları verilmiştir. Bu süreçler, genellikle liç (leaching), çöktürme (precipitation), solvent ekstraksiyonu (solvent extraction) ve elektro kazanım (electrowinning) gibi aşamalardan oluşur. Bu işlemler aşağıda detaylandırılmıştır [56,57].

**Şekil 17.** Hidro-Metalurji İşlem Adımları

Liç (Leaching)

Liç, metallerin asitli veya bazik çözeltilerle çözünmesi işlemidir. Bu süreçte metal iyonları sıvı faza geçer. Örneğin çinko cevherleri sülfürik asitle liç edilerek çinko iyonları çözeltiye alınır.

Solvent Ekstraksiyonu (Solvent Extraction)

Solvent ekstraksiyonu, çözelti içindeki metal iyonlarının organik çözücülerle ayrıştırılmasıdır. Bu yöntem, metallerin saflaştırılmasını sağlar. Örneğin bakır iyonları sülfat çözeltisinden organik faza aktarılır ve saf bakır elde edilir.

Çöktürme (Precipitation)

Çöktürme, metal iyonlarının kimyasal bir reaksiyonla katı fazda çökeltilmesi işlemidir. Bu yöntem genellikle metalin bileşik formunda geri kazanılması için kullanılır. Örneğin lityum iyonları, çözeltiye karbonat eklenerek lityum karbonat halinde çökeltilir.

Elektrokazanım (Electrowinning)

Elektrowinning, çözelti içindeki metal iyonlarının elektrik akımı kullanılarak katot yüzeyinde biriktirilmesi işlemidir. Bu yöntemle saf metal elde edilir. Örneğin nikel iyonları sülfat çözeltisinden elektrolitik bir hücrede saf metalik nikel olarak biriktirilir.

Siyanürleme (Cyanidation)

Siyanürleme, altın ve gümüş gibi değerli metallerin siyanür çözeltisinde çözünmesi ve ardından çöktürme yöntemiyle geri kazanılmasıdır. Örneğin altın cevheri siyanür çözeltisiyle işlenir ve çözünen altın, çinko tozu eklenerek çöktürülür.

Karbonat Çöktürme (Carbonate Precipitation)

Karbonat çöktürme, çözelti içindeki metal iyonlarının karbonat tuzlarıyla reaksiyona girerek çökeltilmesi işlemidir. Bu yöntem, özellikle lityum gibi metallerin bileşik formunda geri kazanılmasında kullanılır. Örneğin lityum içeren çözeltiye sodyum karbonat eklenir ve lityum karbonat çöker.

Tablo 8 kapsamında farklı malzeme türleri için kullanılan hidrometalurjik işlem türleri, hedef ürünler ve işlem türünün açıklaması verilmiştir [58].

Tablo 8. Hidrometalurjik Süreçler: Malzemeler, İşlem Türleri ve Hedef Ürünler

Malzeme	İşlem Türü	İşlem Sıcaklık Aralığı (°C)	Hedef Ürünler	İşlem Türünün Açıklaması
Altın	Siyanürleme ve Çöktürme	20-50	Metalik Altın	Altın, siyanür çözeltisinde çözülerek ve ardından çöktürme yöntemiyle geri kazanılır.
Bakır	Liç ve Elektroliz	30-60	Metalik Bakır	Bakır, sülfat çözeltisinde liç edilerek elektroliz yoluyla saflaştırılır.
Çinko	Asitli Liç ve Solvent Ekstraksiyonu	50-90	Metalik Çinko	Çinko, asitli liç ile çözeltide çözülür ve solvent ekstraksiyonu ile saflaştırılır.
Nikel	Liç ve Elektrowinning	40-70	Metalik Nikel	Nikel, liç ile çözeltide çözülerek elektrowinning yöntemiyle saf metal haline getirilir.
Kobalt	Liç ve Oksit İndirgeme	50-90	Metalik Kobalt	Kobalt, liç çözeltisinden oksit indirgeme yöntemiyle metalik hale dönüştürülür.
Lityum	Solvent Ekstraksiyonu ve Karbonat Çöktürme	20-40	Lityum Karbonat (Bileşik) veya Metalik Lityum	Lityum, solvent ekstraksiyonu ve karbonat çöktürme yöntemiyle lityum karbonat olarak elde edilir.
Manganez	Asitli Liç ve Elektroliz	50-90	Metalik Manganez veya Manganez Oksit (MnO ₂)	Manganez cevheri asitli liç ile çözeltide çözülerek elektroliz yöntemiyle saf metalik manganez veya mangan oksit olarak elde edilir.

4.1.1.3. Direkt (Doğrudan) Geri Dönüşüm

Doğrudan geri dönüşüm, bataryaların kimyasal işlem gerektirmeden mekanik yollarla ayrıştırılması ve bileşenlerinin yeniden kullanımına odaklanan bir yöntemdir. Parçalama, öğütme, eleme ve manyetik ayırma gibi fiziksel işlemlerle bataryaların katot malzemeleri, metal folyoları ve diğer bileşenleri korunarak geri kazanılır. Lityum nikel manganez kobalt oksit (NMC) gibi katot malzemeleri, yapısal bütünlüğü bozulmadan ayrıştırılarak yeni batarya üretiminde kullanılabilir, böylece malzeme kaybı, enerji tüketimi ve üretim maliyetleri azalır. Bakır ve alüminyum gibi metallerin de geri kazanılmasını sağlayan bu yöntem, kimyasal reaktif kullanımını ve atık üretimini minimize ettiği için çevresel etkileri düşüktür. Özellikle homojen batarya atıkları bulunan tesislerde verimli ve düşük maliyetli bir çözüm sunar. Üretim hatası bulunan veya hasar görmüş bataryaların hızlı ve maliyet etkin geri dönüşümünde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşağıda doğrudan geri dönüşüm sürecinde kullanılan temel işlemler verilmiştir[60,61].

Re-Lithiation (Lityum Yeniden Kazanımı)

Katot malzemelerinde zamanla kaybolan lityum iyonlarının geri kazandırılması ve yapısal stabilitenin yeniden sağlanması amacıyla uygulanır. Özellikle NMC

katotlarında, üretim ve kullanım sırasında meydana gelen lityum kaybı, Li_2CO_3 veya LiOH gibi bileşikler eklenerek ve yüksek sıcaklıkta kalsinasyon işlemi uygulanarak telafi edilir. Bu işlem, katot malzemelerinin yeniden batarya üretiminde kullanılabilmesini sağlar.

Temizleme ve Yeniden Kullanım

Anot ve seperatörler üzerindeki elektrolit kalıntıları ve safsızlıklar, kimyasal çözeltiler veya termal işlem ile uzaklaştırılır. Aktif anot malzemeleri (grafit, silisyum vb.) fiziksel ve kimyasal saflaştırma teknikleriyle yeniden kullanılabilir hale getirilir.

Elektrolit Saflaştırma ve Geri Kazanımı

Elektrolit içerisindeki bozunmuş organik bileşikler kimyasal ayrıştırma süreçleriyle saflaştırılarak yeniden kullanıma hazırlanır. Elektrolit bileşenleri (LiPF_6 gibi lityum tuzları) rejenere edilerek yeni bataryalarda değerlendirilir.

Kimyasal ve Termal Yeniden İşleme

Katot yüzeylerinin yeniden kristalleştirilmesi ve anot malzemelerinin yapısal stabilitesinin korunması amacıyla düşük sıcaklık işlemleri uygulanır. Termal ısıtma (annealing) ve yüzey modifikasyonu işlemleriyle, malzemelerin elektrokimyasal performansı iyileştirilerek yeniden batarya üretiminde kullanılabilir hale getirilmesi sağlanır.

Bu işlemler, doğrudan geri dönüşüm sürecinin aktif malzemeleri bozmadan yeniden kullanımını sağlayan kritik adımlardır ve enerji tüketimini, kimyasal madde kullanımını ve maliyetleri minimize eder. Tablo 9 kapsamında doğrudan geri dönüşüm yöntemleriyle kazanılan malzemelerin hangi yöntemle kazanıldıkları, hedef ürün ve işlem türünün açıklaması verilmiştir [61-63].

Tablo 9. Doğrudan Geri Dönüşüm: İşleme Tabi Malzemeler ve İşlem Türleri

Malzeme	İşlem Türü	İşlem Sıcaklık Aralığı (°C)	Hedef Ürün	İşlem Türünün Açıklaması
Katot Malzemesi	Yeniden Kristalleştirme (Re-Lithiation)	25-300°C	Yenilenmiş katot aktif malzemesi	Katot yüzeyindeki bozulmuş lityum iyonlarının geri kazandırılması.
Anot Malzemesi	Saflaştırma ve Yenileme	25-60°C	Temizlenmiş grafit anot	Elektrot üzerindeki elektrolit kalıntılarının ve safsızlıkların giderilmesi.
Elektrolit	Yeniden Üretim ve Saflaştırma	25-50°C	Yenilenmiş elektrolit	Elektrolit içerisindeki bozunmuş bileşiklerin saflaştırılması.
Ayırıcı	Temizleme ve Kurutma	Oda sıcaklığı	Yeniden kullanılabilir ayırıcı	Ayırıcı üzerindeki kalıntıların kimyasal ve fiziksel yöntemlerle temizlenmesi.

Tablo 10'da, batarya geri dönüşümünde yaygın olarak kullanılan pirometalurji, hidrometalurji ve doğrudan geri dönüşüm yöntemleri karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlerin temel özelliklerini anlamak, hangi yöntemin hangi durumlarda daha etkili olduğunu değerlendirmek için gereklidir. Örneğin, pirometalurji basit bir operasyonel yapıya sahipken yüksek enerji tüketimi nedeniyle çevresel açıdan sınırlamalara sahiptir. Hidrometalurji ise yüksek saflıkta ürünler sunarken uzun işlem süreleri ve daha fazla kimyasal tüketim gerektirir. Doğrudan geri dönüşüm ise çevre dostu bir yaklaşım sunmasına rağmen operasyonel maliyetler açısından bazı zorluklar taşımaktadır.

Tablo 10. Batarya Geri Dönüşüm Süreçleri: Avantajlar, Dezavantajlar [64]

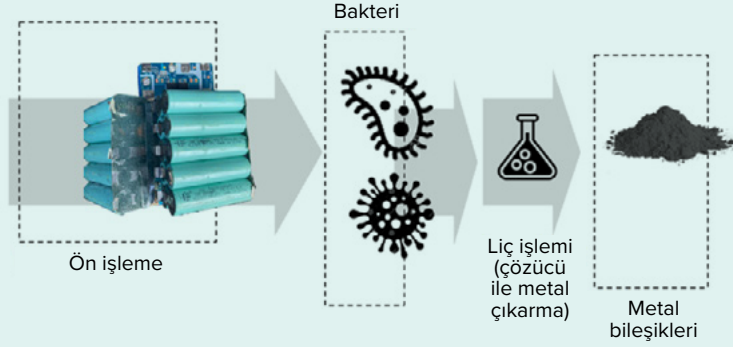
İşlem	Avantajlar	Dezavantajlar	Uygun PİL Türleri
Pirometalurji	• Basit operasyon • Ön işlem gerektirmez • Yüksek verimlilik • Büyük ölçekli uygulamalar için uygun	• Yüksek enerji tüketimi (Yüksek sıcaklık gerektirir (1000°C+)) • Daha fazla atık gaz • Lityum ve manganez geri kazanılamaz	• NMC (Li-Ni-Mn-Co), • LCO (Li-Co-O₂), • LMO (Li-Mn-O₂), • NiMH, NiCd
Hidrometalurji	• Yüksek saflıkta ürün • Düşük enerji tüketimi • Daha az atık gaz • Yüksek saflıkta metal geri kazanımı • Farklı pil kimyalarına uyumlu	• Daha fazla su ve kimyasal reaktif tüketimi • Daha fazla atık su • Uzun süreç	• LFP (LiFePO₄) • NMC (Li-Ni-Mn-Co), • LCO (Li-Co-O₂) • LMO (Li-Mn-O₂)
Doğrudan Geri Dönüşüm	• Kısa geri kazanım süreci • Daha düşük enerji tüketimi • Katot malzemesinin yapısının bozulmadan doğrudan kazanımı • Az kimyasal kullanımı	• Yüksek operasyonel ve ekipman gereksinimleri • Eksik geri kazanım • Ölçeklenebilirliği düşük • Teknolojik olgunluğu düşük	• LFP (LiFePO₄) • NMC (Li-Ni-Mn-Co) • LCO (Li-Co-O₂)

4.1.1.4. Batarya Geri Dönüşüm Süreçlerinde Yenilikçi Yöntemler

Biyo-Metalurjik Geri Dönüşüm

Biyo-metalurjik geri dönüşüm, mikroorganizmalar kullanılarak bataryalardaki metallerin biyolojik çözündürülmesini sağlayan bir yöntemdir. Biyoliç yöntemi olarak da bilinen bu süreç, asit üreten bakteriler veya metal iyonlarını kompleksleyebilen mikroorganizmalar yardımıyla gerçekleştirilir. Biyo-metalurjik geri dönüşüm, düşük enerji tüketimi ve çevre dostu süreçlere sahip olmasına rağmen, ticari ölçekte uygulanabilirliği henüz sınırlıdır. Metal çözündürme sürecinin uzun olması, geleneksel kimyasal yöntemlere kıyasla operasyonel verimliliği düşürebilir. Ayrıca, mikroorganizmaların stabilitesi ve etkinliği, sıcaklık, pH ve besin dengesinin hassas şekilde kontrol edilmesini gerektirir. Bu yöntem, özellikle zayıf konsantrasyona sahip atıklardan değerli metallerin geri kazanımını mümkün kılarak geleneksel süreçlere ekonomik açıdan uygun olmayan atıkların işlenmesini sağlayabilir. Mevcut

biyolojik süreçlerle atık su arıtma tesisleri gibi altyapılarla entegre edilebilmesi, proses verimliliğini artırarak çevresel etkileri minimize eder. Araştırmalar, mikrobiyal optimizasyon, süreç verimliliğinin artırılması ve endüstriyel ölçekleme üzerine yoğunlaşmaktadır [65,66].

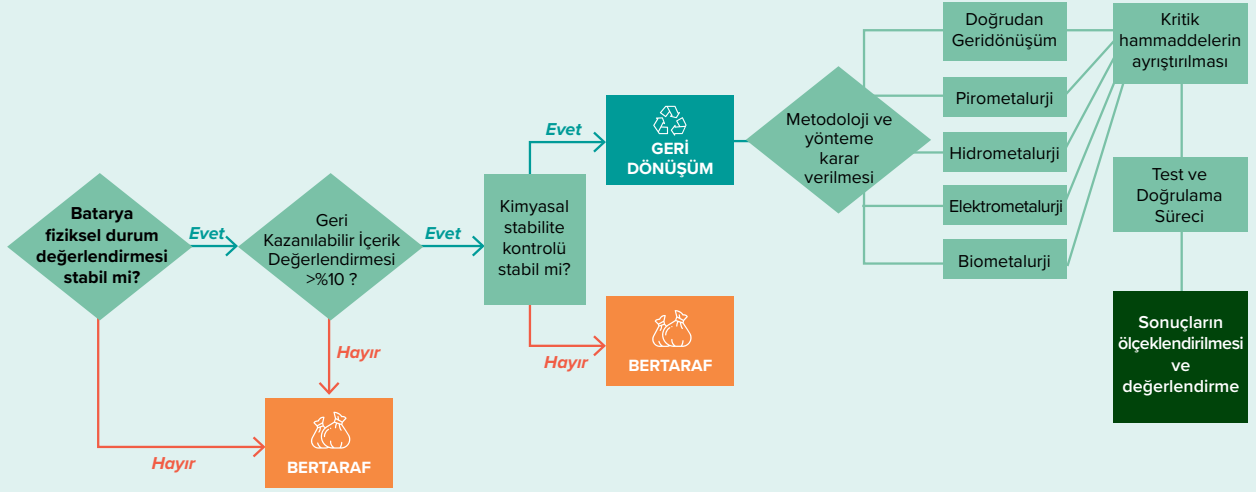


Şekil 18. Biyo-Metalurji Geri Dönüşüm Süreci [66]

Batarya geri dönüşümü, kritik hammaddelerin geri kazanımı, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir üretim açısından stratejik bir öneme sahiptir. Lityum, kobalt, nikel ve manganez gibi değerli metallerin geri kazanımı, hammadde bağımlılığını azaltarak döngüsel ekonomiyi destekler. Doğrudan geri dönüşüm, aktif malzemelerin yapısını koruyarak enerji tüketimini ve karbon ayak izini düşürmektedir. Endüstride pirometalurji, hidrometalurji ve doğrudan geri dönüşüm yaygın olarak kullanılsa da, geri kazanım verimliliğini artırmak için yenilikçi yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Geri Dönüşüm Süreçlerine Karar Verme Mekanizması

Şekil 19, kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların geri dönüşüm veya bertaraf süreçlerine yönelik karar mekanizmasını detaylandırmaktadır. Süreç, bataryaların fiziksel durumlarının stabil olup olmadığının değerlendirilmesiyle başlamaktadır. Fiziksel olarak uygun bulunan bataryalar için geri kazanılabilir içerik miktarı analiz edilmekte, %10'un üzerinde bir geri kazanım potansiyeli mevcutsa kimyasal stabilite kontrollerine geçilmektedir. Kimyasal olarak da stabil olduğu doğrulanan bataryalar, geri dönüşüm için uygun yöntem ve metodolojinin seçilmesi aşamasına yönlendirilir. Pirometalurji, hidrometalurji, elektrometalurji, biyometalurji ve doğrudan geri dönüşüm gibi farklı teknolojilerle kritik hammaddeler ayrıştırılarak test ve doğrulama süreçleri gerçekleştirilir. Sürecin sonunda, elde edilen veriler ölçümlenip değerlendirilerek geri dönüşüm sonuçları optimize edilir. Fiziksel veya kimyasal olarak uygun olmayan bataryalar ise bertaraf edilmek üzere işleme alınır. Böylece sürdürülebilir bir batarya ömür sonu yönetim sistemi stratejisi (geri dönüşüm, bertaraf, ikincil kullanım) için bütüncül bir yaklaşım ele alınmış olunur. Adımlar Şekil 19'da detaylı olarak açıklanmaktadır.



Şekil 19. Geri Dönüşüm ve Bertaraf Karar Akış Şeması

- Öncelikle “**Batarya Fiziksel Stabilite Kontrolü**” yapılarak bataryada fiziksel olarak herhangi bir bozulma, sızıntı ve patlama riski var mı ve batarya fiziksel olarak güvenli mi? kararı verilir. Eğer herhangi bir risk barındırıyor **bertaraf** süreçlerine dahil edilirken, fiziksel olarak güvenli sayılan bataryalar için **geri kazanılabilir içerik değerlendirilmesi** yapılır.
- Batarya içeriğindeki **toplam geri kazanılabilir içerik oranı >%10 üzeri olduğu durumlarda (Li>%0,5 Co>%5 Ni>%3 Mn>%2) Kimyasal stabilite kontrolü** adımına geçilirken; toplam geri kazanılabilir içerik bu değer **altındaysa** ilgili bataryalar **bertaraf** süreçlerine dahil edilir.
- Kimyasal olarak bataryaların stabil olup olmadığı kararını verebilmek için **kimyasal reaktivite** (hava, su ve kimyasallarla temasında tepkime oluşturma durumu) test edilir. Eğer sızıntı, oksidasyon, gaz çıkışı gibi reaksiyonlar varsa **bertaraf** sürecine yönlendirilirken eğer herhangi bir sorun yoksa **Geri Dönüşüm Kararı** verilir.
- Geri dönüşüm kararı verilen bataryalar için uygun metod ve yöntemlere karar verilir. Bu yöntemler direct recycling (mekanik geri dönüşüm), Pirometalurji, hidrometalurji, elektrometalurji ya da biometalurji olabilir.
 - Direct Recycling (Mekanik Geri Dönüşüm)**
Katot malzemesi gibi aktif bileşenlerin doğrudan yeniden kullanımı sağlanır. Bataryadaki aktif malzeme çıkarılıp, yenilenerek tekrar batarya üretiminde kullanılır.
 - +** Aktif malzemenin yapısı korunur ve enerji tasarrufu sağlanır.
 - Sadece Li-ion bataryalar için uygundur.

- **Pirometalurji**

Cu, Co, Ni (bakır, kobalt, Nikel) geri dönüşümü için ağırlıklı olarak tercih edilen bu yöntemle yüksek sıcaklığa dayanıklı metaller eritilerek ayrıştırılır.

+ Hızlı ve büyük hacimler için uygun

- Yüksek enerji tüketimi, Li gibi düşük erime noktasına sahip metaller verimli kazanılamaz

- **Hidrometalurji**

Li, Co, Ni, Mn (Lityum, kobalt, nikel, mangan) gibi metaller kimyasal çözeltilerde çözündürülerek ayrıştırılır.

+ Düşük çevresel etkiye sahip bu yöntemle yüksek saflık ve verimlilik elde edilebilir. Lityum geri dönüşümü için verimli bir yöntemdir.

- Daha karmaşık bir süreci ve ön işlemleri içerisinde barındırır.

- **Biometalurji**

Li, Co, Ni, Mn (Lityum, Kobalt, Nikel, Mangan) metallerinin bioliksivasyon (bioleaching) süreci ile organizmalarca çözünerek biyolojik olarak ayrıştırıldığı bir yöntemdir.

+ Düşük enerji tüketimli ve çevre dostu bir yöntemdir. Düşük metal konsantrasyonlu bataryalarda etkilidir

- Yavaş bir yöntem olduğundan dolayı büyük ölçekler ve işletmeler için uygun bir yöntem değildir.

- **Elektrometalurji**

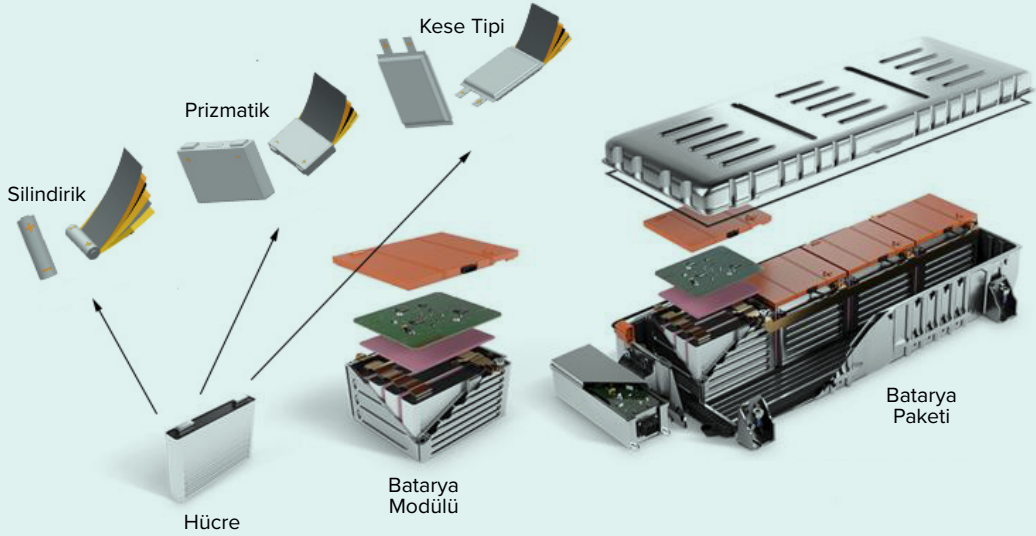
Yüksek saflık gerektiren metallerin geri kazanım süreçlerinde aktif olarak kullanılır.

+ Elektroliz yoluyla metaller kimyasal çözeltide iyonik formda çözünür ve elektrik akımı kullanılarak biriktirilir

- Kritik hammaddeler ayrıştırılarak metalik formları elde edilir ve sonrasında Uygun testler yapılarak doğrulama süreçleri başlatılır ve geri dönüşüm verimliliği hesaplanır.

Türkiye’de batarya geri dönüşümüne yönelik fiziksel ve kimyasal geri kazanım tesisleri bulunmakla birlikte, geri dönüşüm süreçlerindeki verimlilik ve saflık oranlarının artırılması gerekmektedir. Mevcut geri dönüşüm süreçlerinde pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler kullanılmakta, ancak lityum, nikel, kobalt ve grafit gibi değerli elementlerin geri kazanım oranları henüz sanayi ölçeğinde yeterli seviyeye ulaşmamaktadır.

4.1.2. İkincil Kullanım (Second-Life) Süreci



Şekil 20. Batarya Paketleme Bileşenleri: Hücre, Modül ve Paket Yapısı [67]

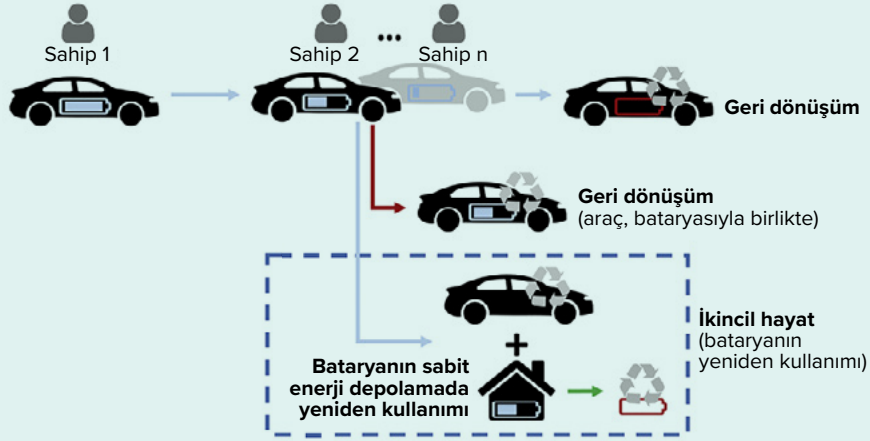
Batarya sistemleri, **ömrünü tamamlamış bataryaların yeniden değerlendirilmesi ve ikincil kullanım süreçlerinin uygulanabilirliği** açısından modüler bir yapıya sahiptir. Şekil 20’de de görüldüğü gibi **hücre (cell), modül (module) ve batarya paketi (battery pack) seviyelerinde değerlendirilen bataryalar**, performans ve güvenlik kriterlerine göre sınıflandırılarak yeniden kullanım senaryolarına uygun hale getirilmektedir.

- **Hücre (Cell):** Bataryanın en küçük yapı taşıdır ve kimyasal reaksiyonlarla elektrik enerjisi üretir. Silindirik, prizmatik ve poşet tipi (pouch) olmak üzere farklı “form faktörlerine sahiptir. Silindirik hücreler (18650, 21700), prizmatik hücreler ve kese hücreler (pouch) kullanım alanına göre tercih edilmektedir.
- **Batarya Modülü (Battery Module):** Belli bir voltaj ve kapasiteye ulaşmak için bir araya getirilmiş hücre gruplarından oluşur. Modül seviyesinde mekanik koruma, termal yönetim ve batarya yönetim sistemi (BMS) bileşenleri yer alır.
- **Batarya Paketi (Battery Pack):** Birden fazla batarya modülünün birleşimiyle oluşur ve sistemin genel enerji depolama kapasitesini belirler. Elektrikli araçlar, şebeke ölçekli enerji depolama sistemleri ve büyük ölçekli UPS sistemlerinde kullanılır. Paket seviyesinde BMS, termal yönetim ve güvenlik sistemleri entegre edilerek bataryanın verimli ve güvenli çalışması sağlanır

Bataryaların bütünleşik yapısı, bataryaların ikinci kullanım potansiyelini belirleyen temel unsurlardan biridir. Bataryaların hücre bazında değerlendirilmesi, geri kazanım verimliliğini artırırken, modül ve paket bazında entegrasyonları farklı enerji depolama senaryolarına uygun hale getirmektedir. Bataryaların birincil ömürleri boyunca performans kaybı yaşansa da, uygun test ve değerlendirme süreçleriyle farklı uygulamalarda yeniden kullanılmaları mümkündür.



İkincil kullanım, bataryaların birincil  m rlерinin sonunda, daha düşük performans gerektiren uygulamalarda yeniden değerlendirilmesini ifade eder. Bir bataryanın “ mr n  tamamlaması,” başlangıçtaki tasarım kriterlerine göre yeterli enerji yoğunluğunu sağlayamaması anlamına gelir; ancak bu, bataryanın tamamen işlevsiz hale geldiği anlamına gelmez. Genellikle kapasitesinin %50-80’ini koruyan bataryalar, uygun test ve yenileme işlemlerinden geçtikten sonra ikincil kullanım için değerlendirilebilir.

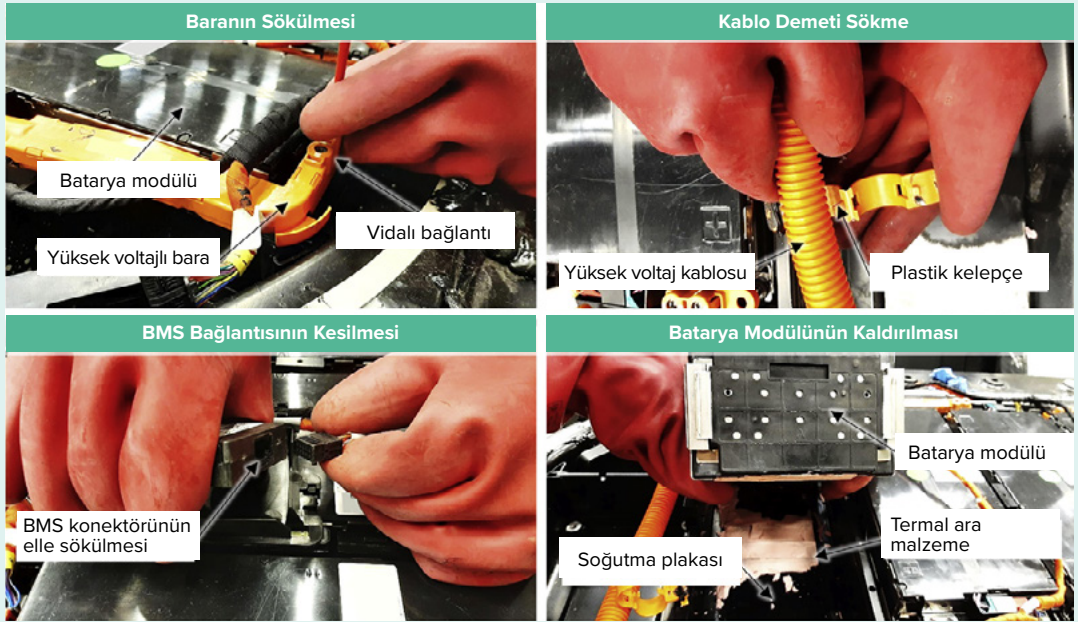


Şekil 21. İkincil Kullanım süreci illüstrasyonu [68]

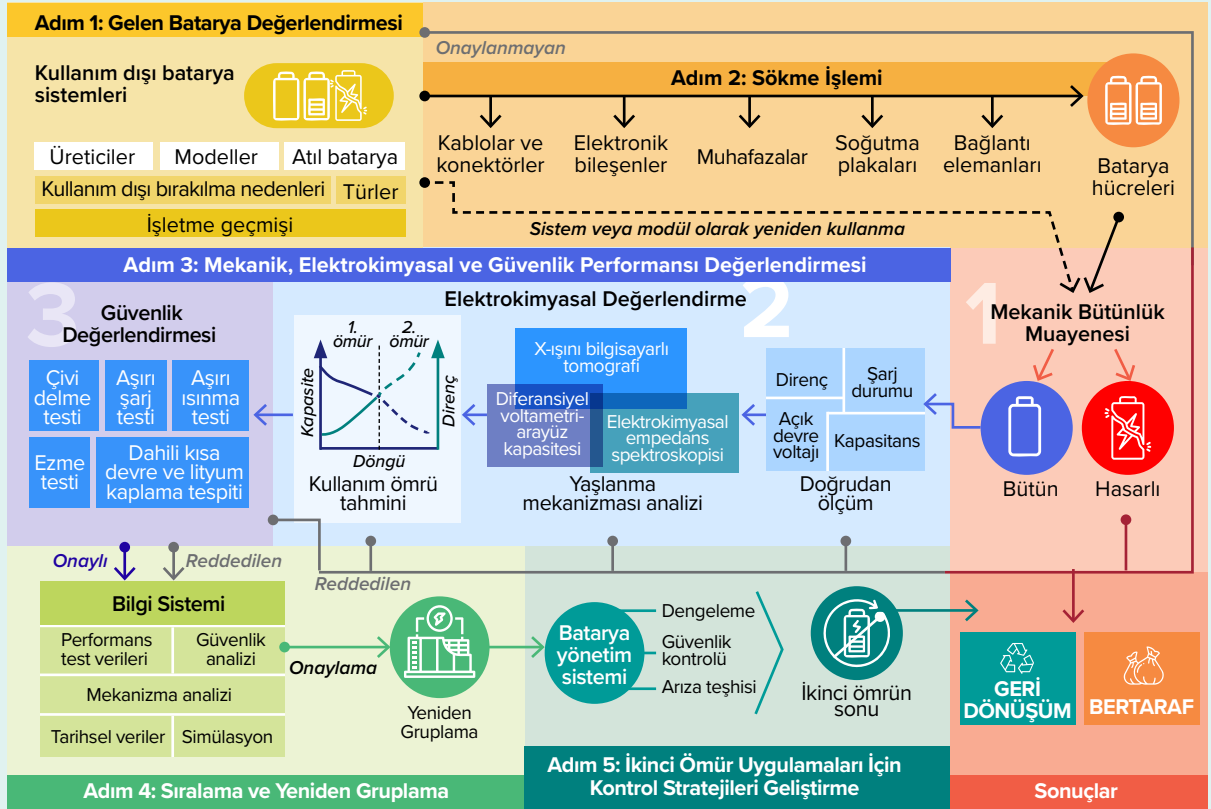
İkincil kullanım süreci, dikkatlice tasarlanmış bir dizi teknik adımdan oluşur.

- İlk olarak, bataryalar orijinal kullanım alanlarından toplanır ve fiziksel incelemeye tabi tutulur. Bu aşamada, bataryaların dış hasarları, sızıntı riski ve termal stabilitesi değerlendirilir. Fiziksel deformasyon, şişme veya delinme gibi durumlar tespit edilen bataryalar, güvenlik riski taşıdığı için genellikle ikincil kullanım sürecine alınmaz.
- Toplama işleminin ardından bataryalar, performans ve güvenlik testlerinden geçirilir. Bu testler arasında kapasite ölçümleri, deşarj analizi ve iç direnç değerlendirmesi yer alır. Kapasite testleri, bataryanın kalan enerji depolama potansiyelini belirleyerek hangi uygulamalara uygun olduğunu tespit eder. İç direnç testleri ise, bataryanın elektriksel verimliliğini ve termal stabilitesini anlamak için gerekli bir aşamadır.
- Testlerden başarıyla geçen bataryalar, yenileme işlemlerine tabi tutulur. Bu işlemler, bataryanın performansını artırmayı ve güvenliğini sağlamayı amaçlar. İlk olarak, hasarlı hücreler yenileriyle değiştirilir veya devre dışı bırakılır. Hücrelerin voltaj seviyeleri yeniden dengelenir ve bataryanın enerji yönetim sistemi (BMS) güncellenerek yeni uygulamalara uygun hale getirilir. Yenileme sürecinde, termal yönetim sistemleri de optimize edilerek bataryanın çalışma ömrü uzatılır.
- Son olarak, yenilenmiş bataryalar yeni kullanım alanları için yeniden sertifikalandırılır. Bu sertifikalandırma süreci, bataryanın teknik ve güvenlik standartlarına uygun olduğunu belgeleyen testleri içerir. Yeniden değerlendirme ve sertifikalandırma, ikincil kullanım sürecinin endüstriyel ve düzenleyici gerekliliklere uygun olmasını sağlar.

Böylece bataryalar, enerji depolama sistemleri, şebeke destek uygulamaları ve yedek enerji çözümleri gibi alanlarda yeniden kullanılabilir hale gelir. Bu süreç, yalnızca kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda yeni batarya üretiminden kaynaklanan çevresel etkileri ve maliyetleri azaltır. İkincil kullanım senaryoları bölüm 4.1.2.1’de verilmiştir. Ancak, bataryaların teknik durumunun detaylı şekilde analiz edilmesi ve uygun şekilde yenilenmesi, ikincil kullanımın başarısını belirleyen temel faktörlerdir.



Şekil 22. Batarya ikincil kullanımı için söküm işlemi



Şekil 23. Bataryaların/Hücrelerin İkincil Kullanımı için Gerçekleştirilen Süreç Adımları [69]

Kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların ikinci kullanıma uygunluğu, belirli test ve analiz süreçleriyle değerlendirilmelidir. Mekanik, elektrokimyasal ve güvenlik testleri sonucunda bataryaların modül veya hücre bazında yeniden kullanılabilir olup olmadığı belirlenir. Uygun bulunan bataryalar, enerji depolama sistemleri veya düşük güç gereksinimi olan uygulamalara entegre edilirken, yetersiz performans gösterenler geri dönüşüme yönlendirilir.

Tablo 11, bataryaların ikinci kullanım süreçlerindeki değerlendirme adımlarını ve teknik kriterlerini özetlemektedir. İkincil kullanım süreçlerinin adımları detaylı olarak Ek-1’ de anlatılmıştır [70-73].

Tablo 11. İkincil kullanım süreçleri, amaçları ve ikincil kullanım yöntem/kontrol parametreleri

Süreç	Amaç	Yöntem ve İkincil Kullanım Kontrol Parametreleri	Sonuç
Gelen Batarya Değerlendirmesi	Kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların durumunu değerlendirmek.	- Batarya Bilgileri Toplanır: Üretici, model, parti, kullanım geçmişi. - Kapasite Kaybı: %50’nin altındaki bataryalar ikinci kullanıma uygun değil. - Güvenlik Riski: Şişme (>2mm), korozyon, sıvı sızıntısı.	%50-80 kapasiteli bataryalar ikinci kullanıma. %50 altı geri dönüşüme.
Batarya Söküm Süreci	Bataryaların modül veya hücre bazında yeniden kullanılabilirliğini belirlemek.	- Tekrar Kullanılabilir Parçalar: Modüller, kablolar, bağlantılar. - Geri Dönüşüm: Elektronik bileşenler, soğutma plakaları. - Bertaraf: Şişmiş, delinmiş, sıvı sızdıran hücreler.	- Bütünlüğü korunan hücreler ikinci kullanıma. - Hasarlılar geri dönüşüme.
Mekanik Bütünlük İncelemesi	Fiziksel bütünlüğü kontrol etmek.	- Şişme: ≤ 2 mm düşük olmalıdır. - Dış Deformasyon: Çatlak veya kırık olmamalıdır. - Elektrolit Sızıntısı: Gözle görülür sızıntı olmamalı.	- Sağlam bataryalar bir sonraki teste. - Hasarlılar geri dönüşüme veya bertarafa.
Elektrokimyasal Değerlendirme	Kalan kapasite ve iç direnci ölçmek.	- Açık Devre Voltajı (OCV): 2.5V - 4.2V - Şarj Durumu (SOC): ≥ 50. - İç Direnç (R): ≤ 15 mΩ. - Kapasite (Cap): ≥ 50.	%50 üzeri kapasiteli bataryalar ikinci kullanıma. - Yüksek dirençliler geri dönüşüme.
Hücre Bazında Değerlendirme ve Test	Hücrelerin bireysel olarak test edilmesi ve yeniden kullanılabilirliğinin belirlenmesi.	- Hücre Kapasite Testi: Minimum %50 kapasite koruması sağlanmalıdır. - İç Direnç Testi: ≤ 15 mΩ olmalıdır.	- Test sonuçlarına göre kapasiteleri %50’in üzerinde olan hücreler seçilir. - Düşük kapasiteli veya yüksek iç dirençli hücreler geri dönüşüme gider.
Hücrelerin Modül Haline Getirilmesi	Tekrar kullanılabilir hücreleri bir araya getirerek yeni modüller oluşturmak.	- Hücre Seçim Kriterleri: Kapasite, iç direnç ve gerilim uyumluluğu kontrol edilmelidir. - Modül Entegrasyon Testleri uygulanmalıdır.	- Yeni batarya modülleri oluşturulur ve test edilir. - Modül entegrasyonu tamamlanan sistemler ikinci kullanım için değerlendirilir.

Tablo 11. İkincil kullanım süreçleri, amaçları ve ikincil kullanım yöntem/kontrol parametreleri (Devamı)

Süreç	Amaç	Yöntem ve İkincil Kullanım Kontrol Parametreleri	Sonuç
Bataryaların Soğutulması ve İzolasyonu	Batarya sistemlerinin güvenli çalışması için termal yönetim ve izolasyon sağlamak.	• Termal Yönetim Testleri uygulanır • İzolasyon ve soğutma sistemleri doğrulanır	• Batarya sistemleri güvenli çalışma koşullarına getirilir ve izolasyon sağlanır.
Güvenlik Değerlendirmesi	Güvenli olup olmadığını belirlemek için stres testleri uygulamak.	• Çivi Batırma: Kısa devre olmamalı • Çarpma Testi: Yapısal bütünlük korunmalı. • Aşırı Şarj: %120 SOC'de termal kaçak olmamalı. • Aşırı Isınma: 60°C'de stabil olmalı • İzolasyon Direnci: $\geq 1 \text{ M}\Omega$.	• Güvenlik testlerini geçenler ikinci kullanıma. • Riskli olanlar geri dönüşüme.
Bataryaların Sınıflandırılması	Performans, kapasite, iç direnç ve güvenlik kriterlerine göre gruplandırma.	• Yeniden Kullanılabilirler: İkinci kullanım projelerine aktarılır. • Kullanılamayanlar: Geri dönüşüme gönderilir.	• İkinci kullanım veya geri dönüşüm için ayrılır.
İkinci Kullanım Uygulaması	Bataryaların daha uzun süre güvenli çalışmasını sağlamak.	• BMS (Battery Management System): • Dengeleme (Equalization) • Güvenlik Kontrolleri (Safety Control) • Hata Teşhisi (Fault Diagnosis)	• İkinci kullanım için optimize edilmiş batarya sistemleri oluşturulur.

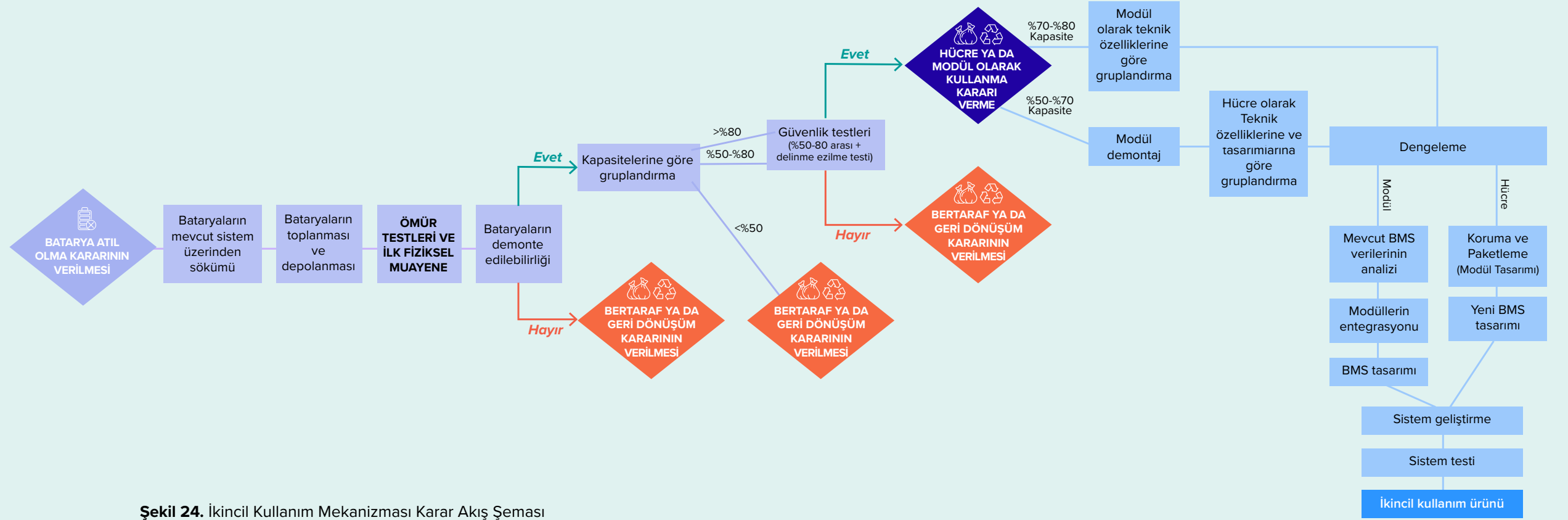
4.1.2.1. İkincil Kullanım Uygulama Senaryoları

Ömrünü tamamlamış bataryaların ikincil kullanımı, enerji sektöründe sürdürülebilirlik ve maliyet avantajı sağlama açısından değerli bir uygulamadır. Bu uygulama, enerji sektöründe verimliliği artırırken döngüsel ekonomi prensiplerine uygun çözümler geliştirilmesini de sağlamaktadır. İlk kullanım alanında ömrünü doldurmuş, yeterli performansı sağlayamayan ya da bir sebeple (kaza, söküm vb.) yeterli çalışma kapasitesi olsa dahi sistem bütünlüğü bozulmuş bataryalar, şebeke dengeleme, mikro şebekeler ve yedek enerji kaynakları gibi düşük performans gerektiren alanlarda değerlendirilebilir. İlk kullanım ömrü tamamlanmış ya da tamamlanamamış bataryalar için İkincil kullanım yöntemleri bir dizi özel yenileme ve yönetme araçları gereksinimi oluşturabilir. Bu özel yaklaşımlar temelde ikincil kullanım için gerek duyulan gereksinimlere yönelik şekillenmektedir. Özellikle minimum sistem ihtiyaçlarının ve gereksinimlerinin belirlenmesi, ikincil kullanıma yönelik özel yaklaşımları da şekillendirmektedir.

İkincil batarya kullanım ve uygulama alanları, global uygulamalar ve değerlendirmeler Tablo 12'de gösterilmiştir.

Tablo 12. Batarya İkincil Kullanım Senaryoları ve Değerlendirmeler

Enerji Gerekсинim	Potansiyel Uygulama Senaryosu	Uygulama Açıklaması	Nasıl Uygulanabilir	Global Örnekler	Türkiye Değerlendirmesi
Yüksek Enerji Gereksinimi 200 kWh ve üzeri	Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Entegre Mikro Şebekeler	Ömrünü tamamlamış bataryalar, enerji arz-talep dengesini sağlamak için mikro şebekelerde kullanılabilir. Mikro şebekeler, fazla üretilen enerjiyi depolayarak düşük üretim saatlerinde kullanıma sunar.	Mikro şebekeler, kırsal veya şebekeden bağımsız bölgelerde kurulabilir. Bu bataryalar, yenilenebilir enerji kaynaklarına entegre edilerek fazla enerjiyi depolamak için kullanılır.	BMW elektrikli araçlarının ilk versiyonları yaşam ömrünü tamamlamaya başlamıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen pilot çalışmalarda tarım uygulamaları için Yenilenebilir santrallere entegre ikincil kullanımı Leipzig kentinde pilot olarak denemiştir.	Türkiye'nin kırsal bölgelerinde mikro şebekelerin kurulması, yenilenebilir enerji entegrasyonunu ve enerji arz güvenliğini destekleyebilir.
	Veri Merkezlerinde Yedek Enerji Kaynağı	Ani enerji kesintilerine karşı yedek enerji kaynağı olarak kullanılır. Veri merkezlerinin sürekliliği açısından önemlidir ve kesintisiz güç sağlar.	Veri merkezlerinde, UPS sistemlerine, kritik tesis ve yerleşkelere entegre edilmiş ikincil bataryalar kullanılarak enerji kesintilerinde veri güvenliği sağlanabilir.		Türkiye'de büyüyen veri merkezi sektörü, ikincil bataryalarla maliyet etkin yedek güç çözümlerine yatırım yapabilir.
Orta Enerji Gereksinimi 20 kWh – 200 kWh	Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarında Depolama Çözümü	Ömrünü tamamlamış bataryalar, elektrikli araç şarj istasyonlarında enerji talebinin yüksek olduğu zamanlarda şebeke üzerindeki ani yüklenmeyi azaltmak için geçici enerji kaynağı olarak kullanılabilir.	Büyük şehirlerdeki elektrikli araç şarj istasyonlarına ömrünü tamamlamış bataryalar entegre edilebilir. Bu bataryalar, yoğun talep saatlerinde yedek enerji kaynağı sağlar.	Nissan ve 4R Energy iş birliği ile Japonya'da elektrikli araç şarj istasyonlarında ömrünü tamamlamış bataryaları kullanarak şebeke yüklenmesini dengelemektedir.	Türkiye'nin gelişmekte olan elektrikli araç altyapısında bu model, şebeke üzerindeki baskıyı azaltarak şarj istasyonlarının sürdürülebilirliğini artırabilir. (Pilot denemeler gerçekleştirilmiştir)
	Konut ve Mesken Tipi Enerji Depolama	Güneş panelleriyle birlikte çalışan bataryalar, gündüz üretilen fazla enerjiyi depolayarak gece tüketimine aktarabilir. Bu sayede, enerji tasarrufu sağlanır ve enerji maliyetleri düşürülür.	Çatılara yerleştirilen güneş panellerine bağlı ikincil bataryalar ile meskenlerde güneş enerjisinden yararlanılarak maliyet etkin enerji sağlanabilir	General Motors ve ABB iş birliği ile ABD' de Chevrolet Volt elektrikli araçlarından çıkan kullanılmış bataryaları kullanarak bir enerji depolama sistemi geliştirmiştir. Bu sistemleri ev tipi uygulamalarda kullanmak üzere tasarlanmış ancak henüz ticari faaliyetler tam anlamıyla başlamamıştır.	Türkiye'de bireysel güneş enerjisi uygulamaları artmakta, bu tür çözümler, maliyetleri düşürmek için konutlar için uygun olabilir.
Düşük Enerji Gereksinimi 1kWh- 20 kWh	Afet ve Acil Durumlar İçin Taşınabilir Enerji Depolama Çözümleri	Ömrünü tamamlamış bataryalar, afet ve acil durumlarda geçici enerji sağlayarak kurtarma çalışmalarını desteklemek amacıyla taşınabilir enerji kaynağı olarak değerlendirilebilir.	Afet bölgelerine mobil enerji üniteleri olarak taşınabilir. Depolama üniteleri, afet sırasında kurtarma çalışmalarında temel ekipmanların çalışması için gerekli enerjiyi sağlar.	Nissan ve 4R Energy iş birliği Japonya 'da deprem ve tsunami sonrasında kurtarma ekiplerine taşınabilir bataryalarla enerji sağlamak için ömrünü tamamlamış bataryaları kullanmıştır.	Türkiye'nin deprem kuşağında yer alması, afet vb. durumlarda bu tür taşınabilir enerji çözümlerinin afet anında kullanılmasını faydalı kılar ve afet yönetimini güçlendirir.
	Şebeke Frekans ve Voltaj Dengesi İçin Destek Sistemleri	Ömrünü tamamlamış bataryalar, şebeke üzerindeki ani dalgalanmalara karşı kısa süreli enerji sağlamak için frekans ve voltaj dengeleme hizmetlerinde kullanılabilir.	Şebeke dengesini sağlamak için sanayi bölgelerinde veya yoğun enerji talebi olan alanlarda bataryalar frekans dengeleme sistemleri olarak konumlandırılır.	Belectiric firması tarafından yeni bataryalar ile ikincil kullanımı uygun olan bataryalar entegre edilerek İngiltere ve Almanya'da pilot proje denemeleri gerçekleştirilmektedir.	Türkiye'de sanayi bölgelerinde frekans dengesini sağlamak amacıyla dağıtım şirketleri ile iş birliği yapılarak bu tür projeler geliştirilebilir.



Şekil 24. İkincil Kullanım Mekanizması Karar Akış Şeması

İkincil Kullanım Süreçlerine Karar Verme Mekanizması

Şekil 24, mevcut sistem üzerindeki kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların ikinci kullanım süreçlerini detaylandırmaktadır. Süreç, bataryaların atıl durumda olduğunun tespit edilmesiyle başlamaktadır. İlk aşamada, bataryalar mevcut sistemlerden sökülerek toplanır ve depolanır. Ömür testleri ve fiziksel muayene sonucunda, bataryaların demonte edilebilirliği değerlendirilir. Kapasite oranlarına göre (>%80, %50-80, <%50) gruplandırılan bataryalar, güvenlik testlerinden geçirilir. Modül veya hücre olarak kullanıma uygun olan bataryalar, teknik özelliklere göre sınıflandırılarak balanslama, mevcut BMS verilerinin analizi, modül tasarımı ve sistem entegrasyonu gibi süreçlere tabi tutulur. Bu süreçlerin sonunda, enerji depolama, yedek güç kaynağı veya diğer uygulamalarda kullanılmak üzere ikinci kullanım ürünleri geliştirilir. Kullanıma uygun olmayan bataryalar ise geri dönüşüm veya bertaraf süreçlerine yönlendirilir. Bu yapı, bataryaların ömrünü uzatarak ekonomik değer yaratırken çevresel etkilerin minimize edilmesine olanak sağlamaktadır. Aşağıda ilgili akış şemasının detaylı olarak açıklaması yapılmıştır.

- Bataryanın mevcut sistemde olması gereken performansı gösteremediği için **atıl olma kararının verilmesinden** sonra bataryanın **mevcut sistem üzerinden sökülümü** gerçekleştirilir.
- Sökülen bataryalar **toplanıp** uygun koşullarda **depolandıktan** sonra ömür testleri ve ilk fiziksel muayene gerçekleştirilir. Bu kapsamda kapasite testi, iç direnç testi yapılır ve herhangi bir fiziksel hasarının olup olmadığı değerlendirilir ve bu doğrultuda **demonte edilebilir** olan bataryalar **kapasitelerine göre gruplandırılırken** demonte edilemeyenler **bertaraf ya da geri dönüşüm** kararı vermek üzere ayrılır.
- Kapasitelere göre gruplandırma adımı tamamlandıktan sonra kapasitesi **%50 nin altında** kalan bataryalar **Bertaraf ya da Geri dönüşüm** kararı alınmak üzere ayrılırken **%50 ve üzeri** kapasiteye sahip olan bataryalara **güvenlik testleri** (Sıcaklık Döngü Testi, Titreşim testi gibi) yapılmak üzere ayrılırken **%50-80** arası kapasiteye sahip bataryalara bu testlere ek olarak delinme-ezilme testi gibi bazı ek testler yapılır.

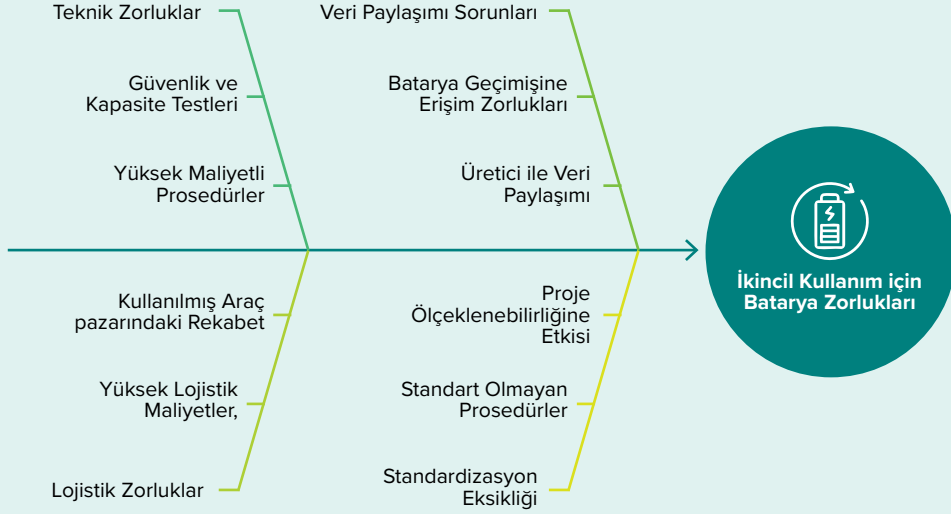
- Bu güvenlik testlerinden geçemeyen bataryalar **bertaraf ya da geridönüşüm** kararı verilmek üzere ayrılırken; geçen bataryalar ise kapasitelerine göre **modül ya da hücre olarak kullanılmak üzere gruplandırılır**. Genellikle **%70-80** arası kapasiteye sahip bataryaların ikincil kullanımı modül olarak yapılırken; **%50-70** arası daha düşük kapasiteli bataryalar hücre bazında kullanılmak üzere ayrılır.
- Hücre olarak kullanılmaya karar verilen bataryalardaki hücrelerin öncelikle **modülden demontajı** gerçekleştirilir ve hücre bazında **Teknik özellik ve tasarımlarına göre** gruplandırılırken (kapasite, iç direnç ve döngü sayısı bakımından ve tasarım tipine göre prizmatik, silindirik ve pouch hücreler benzer bir şekilde gruplandırılır.), modül olarak kullanımına karar verilen bataryalar da yine benzer **Teknik özelliklere** (kapasite ve iç direnç değerleri gibi) sahip olacak şekilde gruplandırılır.
- Sonrasında hem modül bazlı hem de hücre bazlı kendi içerisinde gruplandırılan modül ve hücrelere **dengeleme** yapılarak modüller arası ve hücreler arası şarj durumu eşitlenir. Böylece aşırı şarj durumu engellenmiş olur, modül ve hücreler eşit enerji sağlayabilir.
- Balancing adımı sonrasında modül olarak gruplandırılan bataryalar için mevcut **BMS** (batarya yönetim sistemi) verilerinin analizi yapılır ve modüllerin yeni kurulacak sistem üzerine entegrasyonu sağlanır ve yeni oluşturulan sistem için yeni bir **BMS** tasarımı yapılırken; gruplandırılan hücreler için yeni bir paket tasarımı yapılarak, yeni paketlenmiş yapı için BMS tasarımı yapılır ve iki yapı da kendileri için Uygun olan **sisteme entegre edilir** ve yeni bir sistem geliştirilir.
- Geliştirilen sistemler için **kalite ve güvenlik testleri** yapılır ve bu testlerden geçen sistemler **ikincil kullanım ürünü** olarak kullanılır.

4.1.2.2 İkincil Kullanım Süreçlerindeki Zorluklar ve Temel Riskler

Bataryaların ikincil kullanım süreçleri, enerji depolama teknolojilerinde döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmanın en etkili yollarından biri olarak öne çıkmaktadır. Ancak, ömrünü tamamlamış bataryaların yeniden kullanım potansiyelini belirlemek, hem teknik hem de lojistik açıdan karmaşık süreçleri beraberinde getirmektedir. Batarya hücrelerinin güvenlik, kapasite ve kullanım ömrü açısından değerlendirilmesi, yüksek maliyetli ve zaman alıcı test prosedürleri gerektirirken, bu süreçlerin standardize edilmemiş olması projelerin ölçeklenebilirliğini ve uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Bunun yanı sıra, ikinci kullanım bataryaların üreticilerden temin edilmesi sürecinde veri paylaşımı sorunları, bataryaların güvenlik ve performans geçmişine erişimi zorlaştırmaktadır. Lojistik süreçlerdeki maliyetler ve kullanılmış araç pazarıyla olan rekabet, bataryaların ikincil kullanım için ayrıştırılmasını daha da karmaşık hale getirmektedir [74].

Şekilde ele alınan zorluklar, bataryaların ikincil kullanım süreçlerinde karşılaşılan teknik, ekonomik ve düzenleyici engelleri ortaya koymaktadır. Bu zorluklar, ikincil kullanım uygulamalarının ölçeklenebilirliği ve ticari uygulanabilirliği üzerinde

doğrudan etkili olmasının yanı sıra, sektörün döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasını da sınırlandırmaktadır. Ancak, bu engellerin aşılmasına yönelik bazı stratejik adımlar ve teknolojik yenilikler, batarya ikincil kullanım süreçlerinin yaygınlaşmasına ve rekabetçi olmasına olanak sağlayabilir.



Şekil 25. Batarya İkincil kullanım süreçlerindeki zorluklar

4.1.3 Bertaraf Yöntemleri ve Yönetimi

Bataryaların bertaraf edilmesi, yalnızca bir atık yönetimi süreci olarak değerlendirilmemeli, aynı zamanda çevresel ve insan sağlığı açısından ciddi riskler barındıran kimyasal bileşenlerin güvenli bir şekilde yönetilmesini sağlayan bir işlem olarak ele alınmalıdır. Bataryalar, içeriğinde bulunan ağır metaller (ör. kurşun, kadmiyum, nikel), elektrolit çözeltileri ve yanıcı bileşenler nedeniyle doğrudan çevreye bırakıldığında ciddi ekolojik riskler oluşturabilir. Örneğin, toprağa karışan kurşun ve kadmiyum, yeraltı su kaynaklarını kirleterek insan sağlığı üzerinde toksik etkilere neden olabilir. Lityum-iyon bataryaların düzensiz bertaraf edilmesi ise yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında termal kaçak (thermal runaway) riski oluşturarak yangın veya patlamaya yol açabilir. Bataryaların bertaraf yöntemleri, bataryanın kimyasal bileşenlerine ve çevresel etkilerine bağlı olarak **tehlikeli atık** ve **normal atık bertarafı** olmak üzere iki temel kategoriye ayrılır.

Batarya atık yönetimi için hangi yöntem kullanılmalı?



Tehlikeli Atık Sınıflandırması

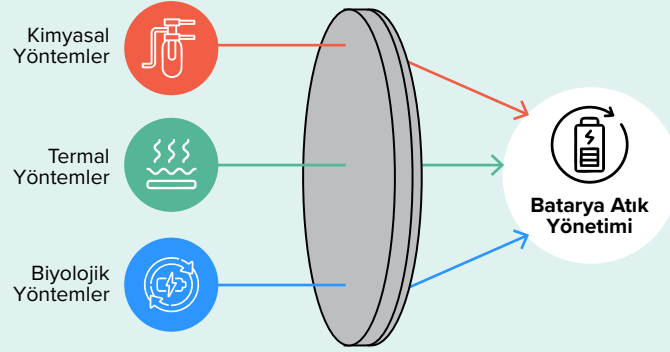
Tehlikeli atık kategorisine giren bataryalar, toksik, yanıcı veya reaktif bileşenler içeren ve çevreye doğrudan zarar verebilecek nitelikte olan bataryalardır. Bu bataryalar ağır metaller, aşındırıcı elektrolitler ve patlama riski taşıyan kimyasallar içerdiğinden, özel bertaraf süreçleri gerektirir. Tehlikeli batarya atıklarının bertarafı, çevresel ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde özel yöntemlerle gerçekleştirilmelidir. Bu süreçlerin başında kimyasal stabilizasyon yer almakta olup, bataryaların içerdiği tehlikeli bileşenlerin nötralize edilerek daha az reaktif hale getirilmesi sağlanmaktadır. Bir diğer yöntem olan inertleştirme, reaktif malzemelerin pasifleştirilmesiyle bataryaların güvenli şekilde depolanmasını veya bertaraf edilmesini mümkün kılar. Kontrollü termal bertaraf ise özellikle yanıcı bileşenler içeren bataryalar için tercih edilen bir yöntemdir ve yüksek sıcaklıklarda yakılarak imha edilmesini içerir. Kimyasal reaksiyon riski taşıyan bataryalar ise tehlikeli atık depolama sahalarında özel izole alanlarda güvenli şekilde muhafaza edilir. Bu süreçler aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

Normal Atık Sınıflandırması

Normal atık kategorisine giren bataryalar, tehlikeli ağır metaller veya yanıcı reaktif kimyasallar içermeyen ve belirli koşullarda genel atık sistemine dahil edilebilen bataryalardır. Bu tür bataryalar nispeten düşük çevresel etkiye sahiptir ve bertaraf süreci daha basittir. Bu süreçlerin başında mekanik parçalama yöntemi gelmekte olup, bataryaların güvenli bileşenlere ayrılarak geri dönüşüm veya bertaraf için uygun hale getirilmesi sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra, düşük riskli kimyasal işlemler uygulanarak bataryaların elektrolitleri nötralize edilmekte ve çevreye zarar vermeyecek bileşenler ayrıştırılmaktadır. Geri dönüşüm, kullanılabilir malzemelerin ayrıştırılarak tekrar üretime kazandırılmasını sağlarken, geri dönüşüme uygun olmayan veya kimyasal olarak nötralize edilmiş bataryalar düzenli atık depolama sahalarında güvenli bir şekilde saklanmaktadır.

Alkalin piller (AA, AAA, C, D tipi), nikel-metal hidrit (NiMH) bataryalar ve düşük kapasiteli bazı lityum-iyon bataryalar, içerdikleri kimyasal bileşenlerin düşük risk taşıması nedeniyle normal atık bertaraf sürecine dahil edilirken, kurşun-asit bataryalar, nikel-kadmiyum (Ni-Cd) bataryalar ve yüksek kapasiteli lityum-iyon bataryalar, içerdiği toksik, yanıcı veya reaktif bileşenler nedeniyle tehlikeli atık bertaraf sürecine tabi tutulmaktadır. Bu atık yönetim süreçlerinin işleyiş mekanizması ve aşamaları Şekil 27’de detaylı olarak verilmiştir.

Batarya bertaraf yöntemleri genleneksel olarak üç ana başlık altında sınıflandırılmaktadır: kimyasal nötralizasyon ve inertleştirme, termal bertaraf ve biyolojik bertaraf yöntemleri (Şekil 26).



Şekil 26. Batarya Bertaraf Yöntemleri

Kimyasal Yöntemler (Nötralizasyon ve İnertleştirme):

Kimyasal stabilizasyon ve inertleştirme yöntemleri, batarya bileşenlerinin reaktivitesini azaltarak uzun vadeli güvenli depolama imkanı sunar. Örneğin, kurşun-asit bataryalar için nötralizasyon işlemi sırasında pH 9-11 aralığında çözeltiler kullanılarak asitle reaksiyona giren metal iyonları çöktürülür.

Termal Bertaraf Yöntemleri:

Termal bertaraf yöntemleri, belirli batarya türleri için uygulanabilir bir seçenek olsa da, yüksek sıcaklık gereksinimi ve enerji tüketimi nedeniyle dikkatli bir değerlendirme gerektirir.

Termal bertaraf süreçleri, batarya bileşenlerinin yüksek sıcaklıkta (800-1400°C) parçalanmasını ve toksik bileşiklerin gazlaştırılmasını sağlar. Pirometalurjik işlemler, özellikle lityum-iyon bataryalardan nikel ve kobalt geri kazanımı için yaklaşık 1100°C sıcaklıkta uygulanmaktadır. Ancak bu işlem sırasında karbondioksit (CO₂), hidrojen florür (HF) ve diğer zararlı gazların çıkışı kontrol altına alınmalıdır.

Biyolojik Bertaraf Yöntemleri:

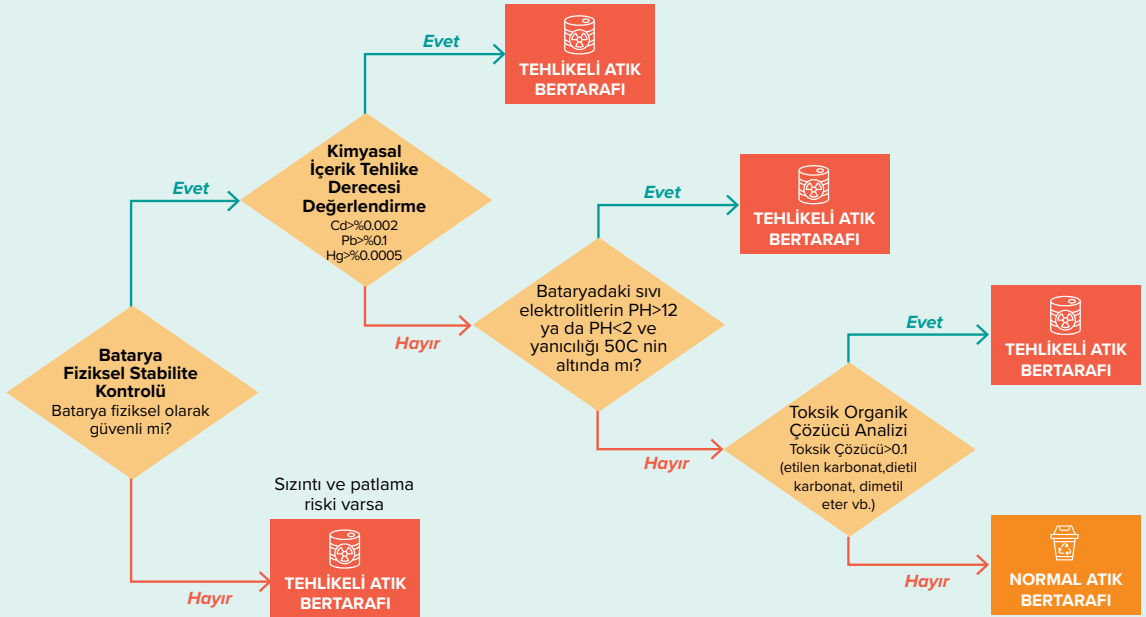
Biyolojik bertaraf yöntemleri, mikroorganizmalar aracılığıyla toksik metallerin biyokimyasal süreçlerle çözündürülmesini veya stabilize edilmesini hedefler. Örneğin, bakteri temelli biyolüç yöntemleri, 30-50°C sıcaklıkta belirli asit üreten bakteriler (ör. Acidithiobacillus ferrooxidans) kullanılarak metallerin %90'a kadar çözündürülmesini sağlayabilir. Bu süreç, özellikle düşük konsantrasyonlu metal içeriğine sahip bataryaların işlenmesinde avantaj sağlamaktadır. Henüz endüstriyel ölçekte yaygın olarak uygulanmаса da, laboratuvar ve pilot projelerde bu yöntemlerin verimliliği test edilmektedir[75-77].

Bertaraf Süreçlerine Karar Verme Mekanizması:

Şekil 27, kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların bertaraf süreçlerini ve karar mekanizmalarını açıklamaktadır. Süreç, bataryaların fiziksel stabilite kontrolü ile

başlamaktadır. Fiziksel olarak güvensiz bulunan bataryalar, sızıntı ve patlama riski taşıyorsa doğrudan tehlikeli atık bertarafına yönlendirilir. Fiziksel olarak güvenli olduğu belirlenen bataryalar, kimyasal içeriklerinin tehlike derecesi açısından değerlendirilir ve belirlenen sınır değerlerin üzerinde ise tehlikeli atık olarak işleme alınır.

Kimyasal içerik açısından sınır değerlere uygun bulunan bataryalar, elektrolitlerin pH değerleri ve yanıcılık özelliklerine göre analiz edilir. Elektrolitlerin pH değeri ya da yanıcılık özellikleri belirlenen kriterleri sağlamıyorsa tehlikeli atık olarak sınıflandırılır. Son aşamada, toksik organik çözücü analizi gerçekleştirilir; eğer toksik çözücü konsantrasyonu belirli bir eşiğin altındaysa, batarya normal atık olarak bertaraf edilir. Bu süreç, çevreye ve insan sağlığına zarar vermeden bataryaların güvenli ve yasal olarak uygun bir şekilde bertaraf edilmesini sağlamayı hedeflemektedir. Aşağıda bertaraf süreci karar verme mekanizması detaylı olarak anlatılmıştır. Ayrıca Tablo 13'te batarya türlerine göre geri dönüşüm, ikincil kullanım ve bertaraf yaklaşımları detaylandırılmıştır.



Şekil 27. Bertaraf Süreci Karar Akış Şeması

Bertarafına karar verilmiş olan bataryalar tehlikeli atık ya da normal atık bertarafına gitmek üzere sınıflandırılmak için belirli prosedürler takip edilir.

- Öncelikle “**Batarya Fiziksel Stabilité Kontrolü**” yapılarak bataryada fiziksel olarak herhangi bir bozulma, sızıntı ve patlama riski var mı ve batarya fiziksel olarak güvenli mi? kararı verilir. Eğer böyle bir güvenlik riski varsa ilgili bataryalar tehlikeli atık

bertarafında özel güvenlik süreçleri kullanılarak bertaraf edilir. Diğer bir yandan ilgili bataryalar fiziksel olarak stabilize **Kimyasal İçerik Tehlike Derecesi** değerlendirilir.

- Kimyasal içerik bakımından bataryanın toksik ya da tehlikeli içerik değerlendirmesi içerdiği ağır metaller yüzdesel olarak değerlendirilerek belirlenir. (**Cd>%0,002 Pp>%0,1 Hg>%0,0005 Ni>%5**) yüzdesel değerlerinin üzerindeyse batarya tehlikeli atık sayılarak **tehlikeli atık bertarafına yönlendirilir**. Eğer bu değerlerin yüzdesel olarak altındaysa atık bataryalardaki **sıvı elektrolitlerin yanıcılıkları test edilir**.
- Eğer bataryanın içindeki sıvı elektrolitlerin **PH değeri>12 ya da PH<2 ise ve 50 C'nin altında** bir yanıcılığa sahipse ilgili bataryalar **tehlikeli atık bertarafına** yönlendirilirken; bu değerlerin dışında kalan bataryalara **toksik organik çözücü analizi** yapılmak üzere ayrılır.
- Toksik organik çözücülerden olan etilen karbonat, dietil karbonat, dimetil karbonat gibi bataryadaki toksik çözücü miktarı >0,1'den fazla ise **Tehlikeli atık bertarafına** yönlendirilirken eğer bu orandan azsa çözücü miktarı **Normal Atık bertarafı** süreçleri başlatılır.

Tablo 13. Batarya Türlerine Göre Geri Dönüşüm, İkincil Kullanım ve Bertaraf Süreçlerinin Karşılaştırması [78-84]

Batarya Teknolojisi	İkincil Kullanım	Geri Dönüşüm	Bertaraf (Atık Yönetimi)
Lityum-İyon (Li-ion / LIB)	Enerji depolama sistemlerinde veya düşük enerji gerektiren uygulamalarda yeniden kullanım	Lityum, kobalt, nikel ve diğer değerli metallerin geri kazanımı	Lityum-iyon bataryalar, içerdiği lityum, kobalt ve nikel gibi metaller nedeniyle çevreye zararlı olabilecek toksik bileşenlere sahiptir. Bu yüzden bu bileşenlerin güvenli bertaraf edilmesi, çevresel ve insan sağlığı açısından gereklidir. Bertaraf işlemi, özel atık yönetim tesislerinde veya yetkili geri dönüşüm merkezlerinde yapılmalıdır. Bu işlem, toksik etkilerin önlenmesine ve çevreye zarar verilmemesine olanak tanır.
Lityum Demir Fosfat (LiFePO4 / LFP)	Enerji depolama sistemlerinde (UPS-Jeneratör benzeri) yeniden kullanım	Lityum ve demir fosfatın geri kazanımı	Lityum demir fosfat bataryalar, kimyasal yapıları itibarıyla diğer bazı batarya türlerine kıyasla daha düşük toksisiteye sahiptir. Bu nedenle, bertaraf işlemleri genellikle daha düşük çevresel etki yaratır ve bu tür bataryaların geri dönüşüm ve bertaraf süreci daha güvenlidir. Ancak, yine de çevreye olası etkilerini minimize etmek adına lisanslı bertaraf tesislerinde işlem görmek zorundadırlar.
Kurşun Asit Aküler	İkincil kullanım gerçekleştirilmez.	Kurşun, asit ve plastik kasaların geri kazanımı	Kurşun asit bataryalar, yüksek toksisiteye sahip kurşun içerir, bu nedenle çevresel zararın önlenmesi için güvenli ve kontrollü bertaraf edilmesi gereklidir. Kurşun, doğaya bırakıldığında su kaynaklarına ve toprağa ciddi zarar verebileceğinden, özel bertaraf işlemleri ile çevreye zarar vermeden imha edilmelidir.

Tablo 13. Batarya Türlerine Göre Geri Dönüşüm, İkincil Kullanım ve Bertaraf Süreçlerinin Karşılaştırması [78-84] (Devamı)

Batarya Teknolojisi	İkincil Kullanım	Geri Dönüşüm	Bertaraf (Atık Yönetimi)
Nikel-Metal Hidrit (NiMH) Bataryalar	Genellikle yeniden kullanılmaz	Nikel, kobalt ve diğer metallerin geri kazanımı	Nikel ve kobalt içeren NiMH bataryalar, çevreye zararlı olabilecek ağır metaller içerir. Bu nedenle, güvenli bertaraf için özel atık tesislerinde işlem görmesi gerekir. Bu tür bataryaların çevreye zarar vermemesi ve sağlığı tehdit etmemesi için, bertaraf işlemleri lisanslı atık yönetimi tesislerinde gerçekleştirilir.
Nikel-Kadmiyum Bataryalar (NiCd)	İkincil kullanım potansiyeli düşüktür. Çoğunlukla kısa ömürlü cihazlarda kullanılır ve hızlıca performans kaybeder.	Geri dönüşüm için etkin bir süreç mevcuttur. Kadmiyum ve nikelin geri kazanımı mümkündür. Yüksek sıcaklıklarda kadmiyum geri kazanımı, çevresel ve sağlık riskleri yaratabilir.	Kadmiyum toksik bir ağır metal olduğundan tehlikeli atık olarak sınıflandırılmaktadır. Düzenli olarak bertaraf edilmezse toprak ve su kaynaklarına zarar verebilir. Özel atık yönetim sistemlerine tabidir.
Lityum-Polimer Bataryalar (Li-Po)	Drone, telefon ve küçük elektronik cihazlarda ikincil kullanım potansiyeli mevcuttur. Eski bataryalar düşük enerji ihtiyacı olan cihazlar için yeniden kullanılabilir.	Geri dönüşüm süreçleri karmaşıktır ve geri kazanılan materyallerin miktarı düşüktür. Özellikle lityum geri kazanımı zordur ve geri dönüşüm işlemi ekonomik olarak maliyetli olabilir.	Çevreye zarar verebilecek kimyasal sızıntı riski vardır. Uygun şekilde bertaraf edilmediğinde yangın tehlikesi yaratabilir. Elektronik atık yönetim sistemlerine dahil edilmelidir.
Katı Hal Bataryalar	Henüz ticari kullanımda yaygın değildir, bu nedenle ikincil kullanım potansiyeli sınırlıdır. Gelişen teknoloji ile gelecekte ikincil kullanım olanakları artabilir.	Geri dönüşüm teknolojileri gelişmektedir, ancak bu konuda sınırlı veri vardır. Malzemelerin geri kazanımı açısından diğer lityum bazlı bataryalara kıyasla daha verimli olabilir	Çevreye daha az zararlı olduğu düşünülmektedir, çünkü daha az reaktif materyal içerir. Gelişen teknolojilerle birlikte atık yönetim süreçleri daha az maliyetli ve daha çevre dostu hale gelebilir.

5.

DEĞERLENDİRMELER

Enerji dönüşümüne yönelik küresel eğilim, fosil yakıtların kullanımının azaltılmasını ve bunların yerine yenilenebilir enerji, mobilite ve sanayi sektörlerinde daha çevreci teknolojilerin yaygınlaştırılmasını hedeflemektedir. Bu dönüşüm sürecinde batarya tabanlı enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliğini sağlamak, elektrikli araçları yaygınlaştırmak ve enerji yönetimini optimize etmek için önemli bir rol oynamaktadır. Dünya genelinde artan batarya talebi, özellikle **elektrikli araçlar, sabit depolama sistemleri ve taşınabilir cihazlar** gibi pek çok alanda hızla yükselmektedir. Ancak bu artış, **batarya üretiminde kullanılan kritik hammaddelerin sürdürülebilirliği, tedarik güvenliği ve ekonomik erişilebilirliği** açısından bazı riskleri de beraberinde getirmektedir.

Kritik Hammadde Değerlendirmeleri

Batarya üretiminde yaygın olarak kullanılan **Lityum İyon Bataryalar (Li-ion / LIB)**, **Lityum Demir Fosfat Bataryalar (LiFePO₄ / LFP)**, **Nikel-Metal Hidrit (NiMH) Bataryalar**, **Kurşun Asit Aküler** ve **Nikel-Kadmiyum Bataryalar (NiCd)**, **lityum, kobalt, nikel, manganez, kurşun ve grafit gibi kritik hammaddeleri içermektedir**. Bu hammaddeler, madencilik ve rafinasyon süreçlerine bağlı olarak belirli ülkelerde yoğunlaşmış olup, tedarik zinciri açısından stratejik bir kırılganlık yaratmaktadır.

- Lityum üretiminde Avustralya, küresel üretimin yaklaşık %52'sini gerçekleştirerek en büyük üretici konumundayken, Güney Amerika ülkeleri (Arjantin, Bolivya, Şili) toplam dünya rezervlerinin %55'ine sahiptir.
- Kobalt üretiminin %70'inden fazlası Demokratik Kongo Cumhuriyeti'nde (DRC) gerçekleştirilirken, nikel üretiminde Endonezya %37 pay ile önde gelmekte, onu %15 ile Filipinler ve %11 ile Rusya takip etmektedir.
- Nadir toprak elementleri konusunda Çin, küresel üretimin %60'ını karşılamakta ve işlenmiş nadir toprak elementlerinin %85'inden fazlasını üretmektedir (**Bknz. Tablo 1.**).

Kritik hammaddelerin belirli ülkelerde yoğunlaşması hem **tedarik risklerini artırmakta hem de küresel piyasalardaki fiyat dalgalanmalarına sebep olmaktadır**. Örneğin, lityum karbonat fiyatları 2023 itibarıyla ton başına 60.000-80.000 USD arasında değişirken, kobalt fiyatları 20.000-35.000 USD/ton seviyelerinde seyretmektedir. Çin'in kobalt rafinasyon kapasitesinin %70'inden fazlasını kontrol ettiği ve işlenmiş grafit üretiminde de lider konumda olduğu göz önüne alındığında, üretici ülkelerin yalnızca cevher çıkarımıyla değil, aynı zamanda işleme süreçleriyle de etkin olduğu değerlendirilmektedir.

Türkiye Batarya Geri Dönüşüm ve İkincil Kullanım Değerlendirmeleri

Türkiye'de batarya üretimi ve kullanımı son yıllarda hız kazanmıştır. **Elektrikli araç üretimi (TOGG), yerli batarya üretim girişimleri (SIRO Batarya Teknolojileri), Batarya fabrikaları (Pomega, Aspilsan, Maxxen gibi) mikro-mobilite uygulamaları (Mart'ı, Hop, Binbin vb.) ve enerji depolama sistemlerine yönelik yatırımlar (Şebeke ölçeğindeki enerji depolama yatırımları, 2035 7.5 GW enerji depolama kapasitesi hedefi), Türkiye'nin batarya ekosisteminde daha aktif bir konuma gelmesini sağlamaktadır. Ancak, Türkiye'nin batarya üretimi için kritik hammaddeler açısından dışa bağımlılığı devam etmektedir.** Türkiye, lityum, kobalt, nikel ve grafit başta olmak üzere birçok kritik hammaddeyi ithal eden ülkeler arasında yer almakta ve bu malzemelerin işlenmesi konusunda henüz yeterli kapasiteye sahip değildir. **T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanan kritik hammaddeler listesinde de bu kritik hammaddelere de ayrıca öncelik verilmiştir.** Türkiye'nin yıllık lityum ihtiyacına yönelik kesin bir veri bulunmamakla birlikte 2018 yılında ön görülen ihtiyaç 1.600 metrik ton olarak belirtilmiştir. Türkiye'de bor kristallerinden, lityum karbonat üretim eldesi yapılmakla birlikte tesisinin yıllık 600 metrik ton kapasiteye ulaşması hedeflenmiş olsa da, mevcut talebi tam olarak karşılayamamaktadır. Bu bağlamda, kent madenciliği, batarya geri dönüşümü ve ikinci kullanım teknolojilerinin geliştirilmesi, Türkiye için önemli fırsatlar sunmaktadır. SNE Research'e göre, **2025 yılında kullanım ömrünü tamamlayacak elektrikli araç bataryası sayısının yarım milyona ulaşması beklenmektedir.** Türkiye'de geri dönüşüm süreçleri genellikle laboratuvar ölçeğinde yürütülmekte olup, **endüstriyel ölçeğe geçiş sürecinde yatırım zorlukları ve maliyet engelleri** ile karşılaşılmaktadır. Mevcut sistemlerin geliştirilmesi ve lityum geri kazanım oranlarının artırılması, Türkiye'nin batarya sektöründe daha rekabetçi hale gelmesine katkı sağlayabilme potansiyeline sahiptir. **Batarya geri dönüşüm süreçlerinde verimliliklerin artırılması** (örneğin, %85-95 seviyesine çıkarılması), **tekrar üretimde kullanılabilir saflıkta lityum karbonatın elde edilmesi** (örneğin, %99.9998 saflık seviyesine ulaşılması) ve **küresel ölçekte atık batarya miktarının artmasına karşılık bu bataryaların tekrar değerlendirilmesi**, batarya sektörünün sürdürülebilir büyümesi açısından önem arz etmektedir.

Türkiye, batarya geri dönüşüm süreçlerini hızlandırarak başta lityum olmak üzere kobalt ve nikel gibi hammaddelerin ithalat bağımlılığını azaltabilir ve bu alanda ekonomik avantaj sağlayabilmesinin yanı sıra **sadece geri dönüşüm süreçleri değil ilk ömrünü tamamlamış bataryaların tekrar değerlendirilmesi ve ikinci kullanım teknolojileri de bu noktada alternatif bir çözüm olarak görülmektedir.** Elektrikli araçlardan sökülen bataryaların **%50-80 kapasite seviyelerinde**

kullanılabilir olması, bu bataryaların konut/mesken tipi, acil durum üniteleri ve UPS benzeri sistemlerde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Türkiye’de yürütülen pilot projeler bulunsa da sınırlı prosedürler gerçekleştirilerek **sadece modül bazında** ikincil kullanım uygulamaları pilot ölçekte gerçekleştirilmiştir. bataryaları, **modüllerden ve hücrelerden oluşan entegre bir sistemdir.** Hücre, bataryanın en küçük birimi olup, bataryanın toplam kapasitesini ve performansını belirleyen temel yapı taşıdır. Hücre bazlı değerlendirme, bataryanın sağlık durumunu daha hassas analiz etmeyi ve düşük performanslı hücreleri ayıklayarak, yüksek verimli hücreleri yeniden kullanmayı mümkün kılmaktadır. Bu alanda Avrupa Birliği’nde kabul edilen hücre yenileme politikaları, batarya sistemlerinin daha uzun ömürlü olmasını teşvik ederken, ABD’deki “tamir hakkı” yasaları bataryaların onarılabilirliğini artırmayı hedeflemektedir. Modül bazında değerlendirme, içinde düşük kapasiteli hücreler bulunan bataryaların tekrar kullanımını zorlaştırırken, hücre bazında analiz, en verimli hücrelerin seçilerek yeni batarya paketlerinde kullanılmasını ve atıl bataryalardan daha fazla verimin sağlanmasına olanak sunmaktadır.

Batarya Geri Dönüşümü ve İkincil Kullanım Teknolojileri Ön Araştırma Raporu kapsamında yapılan değerlendirmeler, Türkiye’de batarya geri dönüşüm altyapısının geliştirilmesine yönelik öncelikli adımların belirlenmesi gerektiğini göstermektedir. Lityum, kobalt ve nikel gibi kritik hammaddelerin geri kazanım verimliliğinin artırılması ve geri dönüşüm süreçlerinin üretim kalitesini koruyacak şekilde optimize edilmesi, batarya tedarik zincirinin sürdürülebilirliği açısından kritik bir gerekliliktir. İkincil kullanım senaryolarının oluşturulması, hücre bazında test ve değerlendirme süreçlerinin hızlandırılması ve bu süreçlere yönelik sertifikasyon altyapısının güçlendirilmesi, batarya ömrünün uzatılmasını sağlayacaktır. Kent madenciliği uygulamalarının yaygınlaştırılması ve atık bataryaların geri dönüşüm tesislerine yönlendirilmesini sağlayacak teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi, atık yönetiminin etkinleştirilmesi açısından önemlidir. Geri dönüşüm tesisleri ve yerli batarya üreticileri arasında teknik ve ekonomik iş birliklerinin teşvik edilmesi, sektörün entegre bir döngüsel ekonomi modeli ile gelişmesine olanak tanıyacaktır. Batarya test ve sertifikasyon altyapısının güçlendirilmesi, UL 1974, IEC 63330 ve IEC 62619 gibi uluslararası standartların uygulanması, güvenilirlik ve kalite standartlarının sağlanması açısından öncelikli bir gerekliliktir. Tüm bu adımların uygulanması, batarya geri dönüşüm ekosisteminin sanayi ölçeğinde genişletilmesini sağlayarak Türkiye’nin enerji depolama alanındaki dışa bağımlılığını azaltacak ve sürdürülebilir bir döngüsel ekonomi modelinin oluşumunu destekleyecektir.

6.

EKLER

EK 1 - BATARYA İKİNCİL KULLANIM SÜRECİ ADIMLARI

1. Bataryaların İlk Kullanımından Çıkışı (End-of-First-Life- EoFL)

Kaynaklar:

- Elektrikli Araç (EV) Bataryaları
- Enerji Depolama Sistemleri (ESS)
- Endüstriyel UPS sistemleri
- Taşınabilir elektronik cihaz bataryaları

Ömrünü Tamamlamış Bataryaların Çıkış Nedenleri:

- **Kapasite Kaybı:** SoH (State-of-Health- Sağlık Durumu) %50-80 seviyesine düşmüş bataryalar.
- **Fiziksel Hasar:** Darbe, sızıntı veya deformasyon oluşmuş bataryalar.
- **Garanti Kapsamında Değişim:** Üretici firmaların garanti süresi dolmuş veya değiştirilmesi önerilen bataryaları.
- **Yükseltmeler/ İyileştirmeler:** EV'lerde yeni nesil batarya paketlerine geçiş nedeniyle çıkan bataryalar.

2. Ön Değerlendirme ve Sınıflandırma (Gateway Testing- Adım 1)

Bu aşamada bataryalar ön testlerden geçirilerek sınıflandırılır. Kullanıma uygun olanlar “İkinci Kullanım”, hasarlı veya kullanımı riskli seviyede olanlar “Geri Dönüşüm” kategorisine alınır.

2.1. Görsel ve Fiziksel Muayene

- Fiziksel deformasyon, çatlak veya sızıntı kontrolü
- Modüllerin veya hücrelerin şişkinlik durumu kontrol edilir.
- Soğutma sıvısı sızıntısı olup olmadığı kontrol edilir.
- Metal bağlantılarda oksitlenme veya korozyon olup olmadığı incelenir.

2.2. Batarya Yönetim Sistemi (Battery Management System- BMS) Verilerinin Analizi

Analiz edilen veriler:

- Aşırı şarj / aşırı deşarj olayları
- Maksimum/minimum sıcaklık kayıtları
- Toplam şarj-deşarj döngü sayısı
- Anormal voltaj dalgalanmaları
- Sistem hata kayıtları (Overvoltage, undervoltage, overtemperature vb.)

2.3. Limit Değerler (Önerilen Sınırlar)

Parametre	İkinci Kullanım İçin Gerekli Limit
SoH (State of Health)	Min. %50
Sıcaklık Geçmişi	15°C - 45°C arası çalışma sıcaklığı olmalı
Şarj-Deşarj Döngü Sayısı	<1500 döngü (Çoğu ticari uygulamada kabul edilen sınır)
Dengesiz Hücreler	Hücreler arası SoH farkı %5'ten fazla olmamalı
İç Direnç (IR- Internal Resistance)	Hücre başına <5mΩ

3. Hücre ve Modül Seviyesinde Teknik Testler (Gateway Testing- Adım 2)

Bu aşamada hücrelerin ve modüllerin **elektrokimyasal, termal ve güvenlik testleri** yapılır.

3.1. Elektrokimyasal Testler

- **OCV (Open Circuit Voltage- Açık Devre Voltajı) Testi:** Hücrelerin dinlenme voltajı ölçülerek SoC (State of Charge- Şarj Durumu) doğrulanır.
- **EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy- Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi):** İç direnç ve kapasite kayıpları değerlendirilir.
- **CCT (Charge-Discharge Cycle Test- Şarj-Deşarj Döngü Testi):** Hücrelerin döngü ömrü belirlenir.

3.2. Termal ve Güvenlik Testleri

- **HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization- Hibrit Darbe Güç Karakterizasyonu):** Bataryanın yüksek güç ve hızlı deşarj kabiliyeti ölçülür.
- **TCT (Thermal Cycling Test- Termal Döngü Testi):** Farklı sıcaklıklarda batarya stabilitesi ölçülür.
- **ISO 12405-4 & IEC 62660-3: Termal Kaçak Testleri:** Hücrelerin ani sıcaklık değişimlerine tepkisi test edilir.
- **Nail Penetration Test (Çivi Delme Testi):** Hücre içi kısa devre riskine karşı delinme testleri uygulanır.

4. Yeniden Üretim (Remanufacturing) veya Yeniden Kullanım (Repurposing)

İkinci kullanım bataryalar 3 ana kategoriye ayrılır:

1. **Reuse (Aynı Uygulamada Yeniden Kullanım)** → EV üreticilerinin eski bataryaları yenileyerek tekrar kullanması.
2. **Remanufacturing (Yeniden Üretim)** → Yeni batarya paketleri oluşturmak için modüllerin seçilerek yeniden gruplandırılması.
3. **Repurposing (Farklı Uygulama için Yeniden Kullanım)** → Şebeke ölçekli enerji depolama, UPS ve mikroşebeke sistemleri gibi alanlarda değerlendirilmesi.

5. Güvenlik, Standart Uygunluk ve Onay Süreci

İkinci kullanım bataryalar aşağıdaki **uluslararası standartlara** uygun olmalıdır:

Standart	Açıklama
UL 1974	İkinci kullanım bataryaların sınıflandırılması
IEC 63330 / IEC 63338	İkinci kullanım bataryaların güvenliği
VDE-AR-E 2510:2017	Hücre seviyesinde izleme gereksinimleri
ISO 12405-4	EV bataryalarının güvenlik testleri
IEC 62619	Büyük ölçekli batarya sistemleri için güvenlik gereklilikleri

6. Nihai Uygulama ve İzleme

- Batarya sistemleri belirlenen uygulama alanlarında devreye alınır.
- Uzaktan izleme sistemleri ile SoH ve sıcaklık izlenir.
- Anormal durumlar tespit edilirse sistem devre dışı bırakılır.

7. İkinci Ömür Sonu (End-of-Second-Life- EoSL) ve Geri Dönüşüm

- SoH %50-60 seviyesine ulaştığında bataryalar kullanımdan çekilir.
- Geri dönüşüm sürecine yönlendirilir.
- Lityum, nikel, kobalt gibi değerli metallerin geri kazanımı yapılır.

EK 2- MEVZUATLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Batarya Geri Dönüşüm ve İkincil Kullanım Mevzuat Yönetmelikleri

Batarya geri dönüşümü ve ikincil kullanım projeleri için hem ulusal hem de uluslararası mevzuatlar, projelerin teknik, çevresel ve yasal standartlarını belirleyerek uygulanabilirliğini şekillendirir. Bu düzenlemeler, sürdürülebilir enerji ve döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmada bir yol haritası sunmaktadır. Türkiye’de batarya geri dönüşüm ve ikincil kullanım kapsamında oluşturulacak bu projeler için mevzuatlar, gerekli teknik, çevresel ve yasal çerçeveyi oluştururken, uluslararası düzenlemelere uyum sağlanması projelerin global pazarlara entegrasyonunu ve yerel katma değer yaratımını kolaylaştıracaktır. Özellikle Avrupa Birliği’nin Kritik Hammaddeler Yasası ve Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) gibi düzenlemeleri, Türkiye’nin enerji dönüşümü ve döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmasında fırsatlar sunmaktadır.

Ulusal Mevzuatlar

- **Elektrik Piyasasında Depolama Faaliyetleri Yönetmeliği**

Yayımlanış Tarihi: 09/05/2021

Yönetmelik Numarası: EPD/2021/01

Enerji depolama sistemlerinin şebekeye entegrasyonu, lisanslama süreçleri ve teknik gerekliliklerini düzenleyen bu yönetmelik, bataryaların şarj-deşarj performansı, çevrim ömrü ve güvenlik standartlarına uyumunu zorunlu kılmaktadır. Özellikle kapasitenin %70’in altına düşmemesi şartı, ikincil kullanım projelerinde bataryaların kalite standartlarının korunmasını sağlayarak enerji depolama çözümlerinin güvenilirliğini ve sürekliliğini garanti altına almaktadır. Bu düzenleme, projelerde kullanılacak bataryalar için teknik gereksinimleri netleştirirken, enerji güvenliği ve sistem verimliliği açısından da bir referans noktası oluşturmaktadır[81-85].

- **Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği**

Yayımlanış Tarihi: 02/11/2022

Yönetmelik Numarası: EPL/2022/05

Bu yönetmelik, yeniden kullanılan bataryaların lisanslama süreçlerinde teknik standartlara uygunluğunu zorunlu kılarak enerji depolama sistemlerinde yüksek performans gerekliliklerini tanımlamaktadır. Örneğin, şarj-deşarj verimliliği %80’in altında olan bataryaların kullanılamayacağı belirtilmiştir. Bu gereklilikler, projelerde teknolojik uygunluğun sağlanmasını ve sanayi tarafından benimsenebilir çözümler geliştirilmesini teşvik eder.

- **Atık Yönetimi Yönetmeliği**

Yayımlanış Tarihi: 02/04/2015

Yönetmelik Numarası: AY/2015/02

Atık statüsündeki bataryaların yeniden değerlendirilmesi ve taşınması için çevresel standartlar

belirleyen bu yönetmelik, ADR (Tehlikeli Maddelerin Karayolu ile Taşınması) kurallarına uyumu zorunlu kılmaktadır. Bu düzenleme, projelerde lojistik süreçlerde çevresel risklerin minimize edilmesini sağlayarak güvenli taşıma ve depolama süreçlerine katkıda bulunur.

- **Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü Yönetmeliği**

Yayımlanış Tarihi: 31/08/2004

Yönetmelik Numarası: APAK/2004/04

Geri dönüşüm süreçlerinde lityum, kobalt ve nikel gibi kritik hammaddelerin en az %50 oranında geri kazanılmasını şart koşan bu düzenleme, ekonomik değer yaratımını ve çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Bu oranların projelerde optimize edilmesi, Türkiye'nin döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmasında role sahiptir.

- **Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği**

Yayımlanış Tarihi: 14/03/2005

Yönetmelik Numarası: TAK/2005/07

Toksik ve tehlikeli maddeler içeren bataryaların güvenli şekilde işlenmesini zorunlu kılan bu yönetmelik, geri dönüşüm tesislerinin lisanslı olması gerektiğini ve emisyonların minimize edilmesini şart koşturmaktadır. Bu düzenleme, çevresel etkilerin azaltılmasını sağlarken, geri dönüşüm süreçlerinin yasal uygunluğunu da garanti altına alır.

Uluslararası Mevzuatlar

- **Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM- Avrupa Birliği)**

Yayımlanış Tarihi: 14/07/2021

Mevzuat Numarası: AB 2021/1119

Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM), karbon yoğun sektörlerden yapılan ithalatlarda ek maliyetler getirerek karbon ayak izini azaltmayı hedeflemektedir. Bu düzenleme, geri dönüştürülen bataryaların karbon emisyonlarını düşürme potansiyelini öne çıkararak Türkiye'de hayata geçirilecek projelerin Avrupa pazarına uyumunu kolaylaştırmaktadır. İkincil bataryaların karbon ayak izini azaltmadaki rolü, Türkiye'nin düşük karbonlu üretim vizyonuna katkıda bulunurken, aynı zamanda bu projelerin SKDM ile uyumlu bir şekilde yapılandırılmasına olanak tanımaktadır. Bu uyum, hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlayarak Türkiye'nin Avrupa pazarındaki rekabet gücünü artırması için fırsat sunmaktadır.

- **Avrupa Birliği Bataryalar ve Atık Bataryalar Hakkında Yönetmelik**

Yayımlanış Tarihi: 28/07/2023

Mevzuat Numarası: AB 2023/1542

Bu yönetmelik, lityum, kobalt ve grafit gibi kritik hammaddelerin geri kazanım oranlarını (%90'a

kadar) ve geri dönüştürülen malzemelerin yeni üretimde kullanımını zorunlu kılar. Türkiye’deki projelerde bu standartların karşılanması, AB pazarına erişim için fırsat yaratır.

- **Kritik Hammaddeler Yasası (Critical Raw Materials Act- Avrupa Birliği)**

Yayımlanış Tarihi: 20/03/2024

Mevzuat Numarası: AB 2024/CRMA

2024 yılında kabul edilen bu yasa, stratejik hammaddelerin güvenli tedarikini ve geri dönüşümünü zorunlu kılar. Bu mevzuata uyum, Türkiye’nin AB ile ticaret ilişkilerini güçlendirecek ve yerel hammaddelerin döngüsel ekonomi içindeki rolünü artıracaktır. Hayata geçirilecek olan projelerle, bu kapsamda yerel kapasitenin geliştirilmesine yönelik fırsatlar yaratılabilecektir.

- **Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, İzni ve Kısıtlanması (KKDİK- REACH)**

Yayımlanış Tarihi: 01/06/2007

Mevzuat Numarası: AB 1907/2006

REACH, bataryalarda kullanılan kimyasalların çevresel ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini düzenler ve geri dönüşüm süreçlerinde kimyasal güvenlik raporlarının hazırlanmasını zorunlu kılar. Türkiye’de bu standartlara uygun süreçler geliştirilmesi, projelerin uluslararası rekabet gücünü artırma konusunda süreci destekleyecektir.

- **UL 1974 – Kullanılmış Batarya Değerlendirme ve Yeniden Kullanım Standardı**

Yayımlanış Tarihi: 2018

UL 1974 standardı, kullanılmış bataryaların değerlendirilmesi, test edilmesi ve yeniden kullanım süreçleri için güvenlik ve performans kriterlerini belirler. Özellikle elektrikli araç bataryaları, sabit enerji depolama sistemleri ve UPS gibi uygulamalarda ikinci ömür kullanımına yönelik kriterleri tanımlar.

Bu standart, hücre, modül ve paket seviyesinde değerlendirme süreçlerini belirleyerek yeniden kullanım için uygun bataryaların güvenli bir şekilde sınıflandırılmasını sağlar. Yapısal bütünlük, kapasite ölçümü, termal güvenlik ve elektriksel performans testleri UL 1974 kapsamında gerçekleştirilerek bataryaların ikinci ömür senaryolarına uygun olup olmadığı belirlenir.

Türkiye’de uygulanması, batarya geri dönüşüm projelerinin ve ikincil kullanım süreçlerinin uluslararası güvenlik standartlarına uyumlu hale gelmesini sağlayarak Avrupa ve ABD pazarlarına entegrasyonu kolaylaştırabilir.

- **IEC 63330 – Batarya İkinci Kullanım ve Yeniden Sertifikalandırma Standardı**

Yayımlanış Tarihi: 2022

Mevzuat Numarası: IEC 63330

IEC 63330, kullanılmış bataryaların ikinci kullanım için yeniden sertifikalandırılmasına ve enerji

depolama sistemlerinde değerlendirilmesine yönelik gereklilikleri belirler. Bu standart, ikinci ömür bataryaların sınıflandırılması, güvenlik değerlendirmesi ve performans testlerine dair prosedürleri tanımlayarak, yeniden kullanılacak bataryaların güvenli ve verimli bir şekilde enerji depolama sistemlerinde değerlendirilmesini sağlar.

Özellikle elektrikli araçlardan sökülen bataryaların şebeke ölçekli enerji depolama sistemlerine entegre edilmesine yönelik teknik çerçeveyi oluşturması bakımından kritik öneme sahiptir. IEC 63330'un uygulanması, Türkiye'de yürütülecek batarya geri dönüşüm ve ikinci kullanım projelerinin uluslararası pazarlarla uyumlu olmasını sağlayarak ticari rekabet avantajı yaratabilir.

- **IEC 62619 – Lityum İyon Bataryaların Endüstriyel Güvenlik Standardı**

Yayımlanış Tarihi: 2017

Mevzuat Numarası: IEC 62619

IEC 62619, lityum iyon bataryaların endüstriyel uygulamalarda güvenli kullanımını sağlayan bir standarttır. Özellikle büyük ölçekli enerji depolama sistemleri, telekomünikasyon, UPS ve endüstriyel güç sistemlerinde kullanılan bataryaların risklerini azaltmaya yönelik güvenlik testlerini ve gereklilikleri belirler.

Bu standart kapsamında bataryaların aşırı şarj, aşırı deşarj, kısa devre, termal kaçak gibi güvenlik risklerine karşı dayanıklılığı test edilir ve güvenli çalışma koşulları tanımlanır. Türkiye'de IEC 62619'un benimsenmesi, büyük ölçekli batarya projelerinde uluslararası güvenlik standartlarına uygunluk sağlayarak hem iç piyasada hem de küresel pazarda daha güvenilir batarya teknolojileri geliştirilmesine katkı sunacaktır[86-92].

REFERANSLAR

- [1] **International Energy Agency (IEA).** (2021). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. IEA. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>
- [2] **Kakışım, C.** (2022). Kritik minerallerin Türkiye'nin enerji dönüşümüne etkisi: Teknoloji bağımsızlığı açısından yeni jeopolitik tehdit. *Mukaddime*, 13(1), 101-124. <https://doi.org/10.19059/mukaddime.910508>
- [3] **U.S. Department of Energy (DOE).** (n.d.). *What are critical materials and critical minerals?* U.S. Department of Energy. Retrieved March 3, 2025, from <https://www.energy.gov/cmm/what-are-critical-materials-and-critical-minerals>
- [4] **Joint Research Centre (JRC).** (n.d.). *EU critical raw materials*. European Commission. Retrieved March 3, 2025, from <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/eu-critical-raw-materials>
- [5] **Thunder Said Energy.** (n.d.). *Lithium-ion batteries for electric vehicles: What costs?* Retrieved March 3, 2025, from <https://thundersaidenergy.com/downloads/lithium-ion-batteries-for-electric-vehicles-what-costs/>
- [6] **Statista.** (n.d.). *Global battery market size by technology*. Retrieved March 3, 2025, from <https://www.statista.com/statistics/1339880/global-battery-market-size-by-technology/>
- [7] **BloombergNEF.** (2021). *Global energy storage market to grow 15-fold by 2030*. Retrieved March 3, 2025, from <https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-to-grow-15-fold-by-2030/>
- [8] **RHY Battery.** (n.d.). *Comparing battery types: Lithium-ion vs. nickel-metal hydride vs. alkaline*. Retrieved March 3, 2025, from <https://www.rhybattery.com/tr/news/comparing-battery-types-lithium-ion-vs-nickel-metal-hydride-vs-alkaline.html>
- [9] **Battery University.** (n.d.). *How do lithium batteries work?* Retrieved March 3, 2025, from <https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work>
- [10] **Batmaz, Ü.** (2023). *Elektrikli araçlarda batarya teknolojileri*. *Makina Mühendisleri Odası Dergisi*, 76, Nisan 2023. Retrieved from <https://www.mmo.org.tr/nisan-2023-sayi-76/makale/makale-elektrikli-araclarda-batarya-teknolojileri>
- [11] **U.S. International Trade Commission (USITC).** (n.d.). *Global value chains: Lithium in lithium-ion batteries for electric vehicles*. Retrieved March 3, 2025, from https://www.usitc.gov/publications/332/working_papers/no_id_069_gvc_lithiumion_batteries_electric_vehicles_final_compliant.pdf
- [12] **UL Research Institutes.** (2021, September 14). *What are lithium-ion batteries?* UL Research Institutes. <https://ul.org/research-updates/what-are-lithium-ion-batteries/>
- [13] **Efe, Ş., & Güngör, Z. A.** (2022). *Geçmişten günümüze batarya teknolojisi*. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 13(3), 453-462. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2160027>
- [14] **Energizer.** (2020). *Nickel Metal Hydride (NiMH) Handbook*. Retrieved from https://data.energizer.com/wp-content/uploads/2020/11/nimhhandbook_ver2-2.pdf
- [15] **Piping Techs.** (n.d.). *Nickel-metal hydride battery*. Retrieved March 3, 2025, from <https://pipingtechs.com/nickel-metal-hydride-battery/>
- [16] **Birikim Pilleri.** (n.d.). *Nikel-kadmiyum mu yoksa nikel-metal hidrit piller mi?* Birikim Pilleri Blog. <https://www.birikimpilleri.com/tr/blog/nikel-kadmiyum-mu-yoksa-nikel-metal-hidrit-piller-mi/142>
- [17] **Battery University.** (n.d.). *How do lithium batteries work?* Retrieved March 3, 2025, from <https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work>
- [18] **BYD Auto Group.** (n.d.). *BYD Blade Battery*. Retrieved March 3, 2025, from <https://www.bydbdautogroup.com/en/byd-blade-battery-en/>
- [19] **Nguyen, H.** (n.d.). *Pin LFP là gì?* <https://nguyenhoaituong.net/pin-lfp-la-gi/>

- [20] **Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G.** (2015). The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 252-263. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.002>
- [21] **Karden, E., Ploumen, S., Fricke, B., Miller, T., & Snyder, K.** (2017). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, 15, 224-234. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.10.011>
- [22] **Moseley, P. T., Rand, D. A. J., & Peters, K.** (2015). Nickel–cadmium and nickel–metal hydride battery energy storage. In P. T. Moseley & J. Garche (Eds.), *Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing* (pp. 287-312). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62616-5.00014-0>
- [23] **Joint Research Centre (JRC).** (2020). *Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU: A foresight study*. European Commission. Retrieved from https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2020.pdf
- [24] **Büyükburç, A.** (n.d.). *Lityum-iyon piller için yüksek kapasiteli ve enerjili katot malzemelerinin geliştirilmesi, üretilmesi ve karakterizasyonu*. Retrieved March 3, 2025, from https://www.academia.edu/87770031/Lityum_iyon_piller_i%C3%A7in_y%C3%BCksek_kapasiteli_ve_enerjili_katot_malzemelerinin_geli%C5%9Fitilmesi_%C3%BCretilmesi_ve_karakterizasyonu
- [25] **Gopalakrishnan, N., Suntharam, N. M., Bashir, S., Vengadaesvaran, B., & Ramesh, K.** (2024). Advancements in cathode materials for lithium-ion batteries: An overview of future prospects. *Ionics*. <https://doi.org/10.1007/s11581-024-06030-1>
- [26] **Chen, Z., Liu, H., Nei, J., & Liu, N.** (2024). High-performance nickel metal hydride battery anode with enhanced durability and excellent low-temperature discharge capability. *Nano Research*, 17(5), 8819–8825. <https://doi.org/10.1007/s12274-024-6742-y>
- [27] **Visual Capitalist.** (n.d.). *The key minerals in an EV battery*. Retrieved March 3, 2025, from <https://elements.visualcapitalist.com/the-key-minerals-in-an-ev-battery/>
- [28] **International Renewable Energy Agency (IRENA).** (2024). *Critical materials for batteries in electric vehicles*. IRENA. Retrieved from <https://www.irena.org/>
- [29] **International Energy Agency (IEA).** (2023). *Batteries and secure energy transitions*. IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>
- [30] **BATTERY 2030+.** (2023). *Science and innovation roadmap: Updated August 2023*. Retrieved from <https://battery2030.eu/wp-content/uploads/2023/09/B-2030-Science-Innovation-Roadmap-updated-August-2023.pdf>
- [31] **Ahead of the Herd.** (n.d.). *Surge Copper: 3 great scenarios*. <https://aheadoftheherd.com/surge-copper-3-great-scenarios/>
- [32] **International Energy Agency.** (2022). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>
- [33] **Haberler.** (2024, 23 Aralık). *Türkiye, batarya üretiminde yeni yatırımlar ve teşviklerle hedef büyütüyor*. <https://www.haberler.com/ekonomi/turkiye-batarya-uretiminde-yeni-yatirimlar-ve-tesviklerle-hedef-buyutuyor-18186071-haberi/>
- [34] **Hedef Filo.** (2024). *2024 yılında Türkiye'deki elektrikli araç sayısı*. <https://ev.hedef filo.com/ev-gundem/blog/2024-yilinda-turkiyedeki-elektrikli-arac-sayisi>
- [35] **Türkiye Kalkınma ve Yatırım Bankası.** (2024, 15 Ekim). *Mobilite ve elektrikli araçlar: Mevcut durum ve beklentiler*. https://www.oss.org.tr/uploads/sections/8f5db5f1-3abd-444f-852c-0433ef6eab89_oseq--mobilite-ve-elektrikli-aracarlar..pdf
- [36] **İstanbul Maden İhracatçıları Birliği (İMİB).** (n.d.). *Kobalt raporu*. Retrieved March 3, 2025, from <https://imib.org.tr/wp-content/uploads/kobalt.pdf>
- [37] **İstanbul Maden İhracatçıları Birliği (İMİB).** (n.d.). *Lityum raporu*. Retrieved March 3, 2025, from <https://imib.org.tr/wp-content/uploads/lityum.pdf>

- [38] **Rekabet & Regülasyon.** (2024). *Maden hukukunda dikkat çeken bir konu: Türkiye'nin kritik mineraller ile imtihanı*. Retrieved March 3, 2025, from <https://www.rekabetregulasyon.com/maden-hukukunda-dikkat-cekken-bir-konu-turkiyenin-kritik-mineraller-ile-imtihani/>
- [39] Goodenough, J. B., & Kim, Y. (2010). Challenges for rechargeable Li batteries. *Chemistry of Materials*, 22(3), 587–603. <https://doi.org/10.1021/cm901452z>
- [40] Jung, R., Metzger, M., Maglia, F., Stinner, C., & Gasteiger, H. A. (2014). A review of degradation mechanisms and recent achievements for Ni-rich cathode-based Li-ion batteries. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/356187148_A_Review_of_Degradation_Mechanisms_and_Recent_Achievements_for_Ni-Rich_Cathode-Based_Li-Ion_Batteries
- [41] Nykvist, B., & Nilsson, M. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change*, 5, 329–332. https://www.researchgate.net/publication/274407248_Rapidly_falling_costs_of_battery_packs_for_electric_vehicles
- [42] Gaines, L., Sullivan, J., Burnham, A., & Belharouak, I. (2014). Life-cycle analysis for lithium-ion battery production and recycling. *Procedia CIRP*, 15, 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.003>
- [43] **Battery University.** (n.d.). *How to prolong lithium-based batteries*. Retrieved March 3, 2025, from <https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>
- [44] **LinkedIn.** (n.d.). *What is the most effective way to test the cycle life of a battery?* Retrieved March 3, 2025, from <https://www.linkedin.com/advice/0/what-most-effective-way-test-cycle-life-battery>
- [45] Zhang, X., Sun, F., & Yu, Z. (2020). A comprehensive review of Li-ion battery materials and their recycling techniques. *Electronics*, 9(7), 1161. <https://doi.org/10.3390/electronics9071161>
- [46] Zhao, Y., Zhang, Z., & Sun, J. (2023). A comprehensive review of lithium-ion battery (LiB) recycling technologies and industrial market trend insights. *Recycling*, 9(1), 9. <https://doi.org/10.3390/recycling9010009>
- [47] Li, L., Dunn, J. B., Zhang, X. X., Gaines, L., Chen, R. J., Wu, F., & Amine, K. (2020). The current process for the recycling of spent lithium-ion batteries. *Frontiers in Chemistry*, 8, 578044. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.578044>
- [48] Riedhammer GmbH. (n.d.). *Battery recycling (pyrolysis)*. Retrieved March 3, 2025, from <https://lithium-ion-batterykilns.com/battery-recycling-pyrolysis>
- [49] Avcı, G., & Özdemir, A. (2023). Atık LFP bataryaların geri dönüşümü. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 11(4), 997–1023. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1332596>
- [50] Çevikel, B. (2009). *Elektronik atıklardan değerli metal geri kazanımı* (Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi). Sakarya Üniversitesi Araştırma ve Yayınları.
- [51] Avcı, G., & Özdemir, A. (2023). Atık LFP bataryaların geri dönüşümü. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 11(4), 997–1023.
- [52] Lee, J., & Rhee, K. (2022). Overview on pyrometallurgical recycling process of spent lithium-ion battery. *Korean Journal of Metals and Materials*, 31(3), 203–212.
- [53] Li, J., & Wang, Z. (2021). A novel pyrometallurgical recycling process for lithium-ion batteries and its application to the recycling of LCO and LFP. *Metals*, 11(1), 149. <https://doi.org/10.3390/met11010149>
- [54] Zhang, Y., & Chen, M. (2023). Recent advancements in hydrometallurgical recycling technologies of spent lithium-ion battery cathode materials. *Rare Metals*, 42(5), 1234–1248. <https://doi.org/10.1007/s12598-023-02437-3>
- [55] Davis, K., & Demopoulos, G. P. (2023). Hydrometallurgical recycling technologies for NMC Li-ion battery cathodes: current industrial practice and new R&D trends. *RSC Sustainability*, 1(8), 1932–1951. <https://doi.org/10.1039/D3SU00142C>
- [56] He, B., Zheng, H., Tang, K., Xi, P., Li, M., Wei, L., & Guan, Q. (2024). A comprehensive review of lithium-ion battery (LiB) recycling technologies and industrial market trend insights. *Recycling*, 9(1), 9. <https://doi.org/10.3390/recycling9010009>

- [57] Holzer, A., Zimmermann, J., Wiszniewski, L., Necke, T., Gatschlhofer, C., Öfner, W., & Raupenstrauch, H. (2023). A combined hydro-mechanical and pyrometallurgical recycling approach to recover valuable metals from lithium-ion batteries avoiding lithium slagging. *Batteries*, 9(1), 15. <https://doi.org/10.3390/batteries9010015>
- [58] Liu, A., Hu, G., Wu, Y., & Guo, F. (2023). Life cycle environmental impacts of pyrometallurgical and hydrometallurgical recovery processes for spent lithium-ion batteries: present and future perspectives. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26(1), 381–400. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02640-x>
- [59] Zhao, Y., Wang, L., Li, X., Chen, H., & Liu, M. (2024). A holistic review on the direct recycling of lithium-ion batteries from electrolytes to electrodes. *Journal of Materials Chemistry A*. <https://doi.org/10.1039/D4TA04976D>
- [60] Xu, Z., Zhang, W., Li, H., Wang, Y., & Chen, Z. (2024). Direct recycling technology for spent lithium-ion batteries: Limitations of current implementation. *Batteries*, 10(3), 81. <https://doi.org/10.3390/batteries10030081>
- [61] Pražanová, A., Plachý, Z., Kočí, J., Fridrich, M., & Knap, V. (2024). Direct recycling technology for spent lithium-ion batteries: Limitations of current implementation. *Batteries*, 10(3), 81. <https://doi.org/10.3390/batteries10030081>
- [62] Ji, H., Wang, J., Ma, J., Cheng, H.-M., & Zhou, G. (2023). Fundamentals, status, and challenges of direct recycling technologies for lithium-ion batteries. *Chemical Society Reviews*, 52(23), 8194–8244. <https://doi.org/10.1039/D3CS00254C>
- [63] Tankou, A., Bieker, G., & Hall, D. (2023). Scaling up reuse and recycling of electric vehicle batteries: Assessing challenges and policy approaches. *International Council on Clean Transportation*. <https://theicct.org/publication/recycling-electric-vehicle-batteries-feb-23/>
- [64] Cerrillo-Gonzalez, M. del M., Villen-Guzman, M., Vereda-Alonso, C., Rodriguez-Maroto, J. M., & Paz-Garcia, J. M. (2024). Towards sustainable lithium-ion battery recycling: Advancements in circular hydrometallurgy. *Processes*, 12(7), 1485. <https://doi.org/10.3390/pr12071485>
- [65] Zhuang, W.-Q., Fitts, J. P., Ajo-Franklin, C. M., Maes, S., Alvarez-Cohen, L., & Hennebel, T. (2015). Recovery of critical metals using biometallurgy. *Current Opinion in Biotechnology*, 33, 327–335. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.03.008>
- [66] Ilyas, S., & Lee, J.-C. (2014). Biometallurgical recovery of metals from waste electrical and electronic equipment: A review. *ChemBioEng Reviews*, 1(4), 148–169. <https://doi.org/10.1002/cben.201400001>
- [67] Skill-Lync. (n.d.). *Mechanical design of battery pack*. <https://skill-lync.com/student-projects/project-1-mechanical-design-of-battery-pack-118>
- [68] Jaguemont, J., Arcos-Vargas, A., Hu, X., & Dubé, Y. (2022). Challenges of second-life concepts for retired electric vehicle batteries. *Cell Reports Physical Science*, 3(9), 100397. <https://www.cell.com/cell-reports-physical-science/fulltext/S2666-3864%2822%2900397-6>
- [69] UK Government. (2023). *Safety of second life batteries in battery energy storage systems*. Department for Business, Energy & Industrial Strategy. <https://www.gov.uk/government/publications/safety-of-second-life-batteries-in-battery-energy-storage-systems>
- [70] Nissan Motor Corporation. (2021, 27 Ocak). *Nissan gives EV batteries a second life*. Nissan Stories.
- [71] BMW Group. (2021). *BMW Group Report 2020*.
- [72] Bobba, S., Podias, A., Di Persio, F., Messagie, M., Tecchio, P., & Cusenza, M. A. (2021). A review on battery market trends, second-life reuse, and recycling. *Batteries*, 2(1), 11. <https://doi.org/10.3390/batteries2010011>
- [73] Capgemini. (2021, 15 Nisan). *Second life batteries: A sustainable business opportunity, not a conundrum*.
- [74] Börner, M. F., Frieges, M. H., Späth, B., Spütz, K., Heimes, H. H., Sauer, D. U., & Li, W. (2022). Challenges of second-life concepts for retired electric vehicle batteries. *Cell Reports Physical Science*, 3(10), 100897. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.100897>
- [75] European Commission. (n.d.). Batteries. Environment. <https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and->

- [76] Cucchiella, F., D'Adamo, I., & Rosa, P. (2023). The sustainable development goals, urban mining, and the circular economy. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 17, 200131. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200131>
- [77] Pistoia, G. (2014). *Lithium-ion batteries: Advances and applications*. Elsevier. <https://books.google.com.tr/books?id=wWciAQAQBAJ>
- [78] Zheng, P., Young, D., Yang, T., Xiao, Y., & Li, Z. (2023). Powering battery sustainability: A review of the recent progress and evolving challenges in recycling lithium-ion batteries. *Frontiers in Sustainable Resource Management*, 2, 1127001. <https://doi.org/10.3389/fsrma.2023.1127001>
- [79] Gaines, L. (2018). Lithium-ion battery recycling processes: Research towards a sustainable future. *Journal of Energy Storage*, 15, 69–85. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>
- [80] Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>
- [81] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). (2021). Elektrik Piyasasında Depolama Faaliyetleri Yönetmeliği. Resmi Gazete, Sayı: 31480. <https://www.resmigazete.gov.tr>
- [82] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). (2022). Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği. Resmi Gazete, Sayı: 31987. <https://www.resmigazete.gov.tr>
- [83] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2015). Atık Yönetimi Yönetmeliği. Resmi Gazete, Sayı: 29314. <https://www.resmigazete.gov.tr>
- [84] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2004). Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü Yönetmeliği. Resmi Gazete, Sayı: 25569. <https://www.resmigazete.gov.tr>
- [85] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2005). Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği. Resmi Gazete, Sayı: 25755. <https://www.resmigazete.gov.tr>
- [86] European Union. (2021). Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 14 July 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 (European Climate Law). Official Journal of the European Union, L 243, 1-17. <https://eur-lex.europa.eu>
- [87] European Union. (2023). Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 28 July 2023 on batteries and waste batteries. Official Journal of the European Union, L 193, 1-110. <https://eur-lex.europa.eu>
- [88] European Union. (2024). Critical Raw Materials Act (CRMA). Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu>
- [89] European Union. (2006). Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH). Official Journal of the European Union, L 396, 1-849. <https://eur-lex.europa.eu>
- [90] Underwriters Laboratories (UL). (2018). UL 1974: Standard for the evaluation of batteries for stationary energy storage systems. UL Standards. <https://www.shopulstandards.com>
- [91] International Electrotechnical Commission (IEC). (2022). IEC 63330: Standard for second-life battery assessment and re-certification. IEC Standards. <https://www.iec.ch>
- [92] International Electrotechnical Commission (IEC). (2017). IEC 62619: Safety requirements for secondary lithium cells and batteries for use in industrial applications. IEC Standards. <https://www.iec.ch>
- [93] UK Government. (2023). *Safety of second life batteries in battery energy storage systems*. Department for Business, Energy & Industrial Strategy. <https://www.gov.uk/government/publications/safety-of-second-life-batteries-in-battery-energy-storage-systems>

ÖNCÜL PROJE PROGRAMI ELEKTROKİMYASAL DIŞI ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİLERİ

ÖN ARAŞTIRMA RAPORU



ttgv.org.tr

TTGV Merkez

Cyberpark B Blok Kat: 5-6, Bilkent
Ankara
0312 265 02 72

TTGV İstanbul Temsilciliği

İTÜ Ayazağa Yerleşkesi Arı Teknokent
Arı II Binası Koruyolu A Blok Kat:7
Maslak-Sarıyer
0212 276 75 60

İletişim için:

info@ttgv.org.tr



#TeknolojiÜretenTürkiye
#İklimÖncüsü

