T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜRKİYE'DE ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ GERİ DÖNÜŞÜM SÜRECİNİN ÇEVRESEL, EKONOMİK ve MEVZUAT AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ömür TEMİZEL ŞAHİN

DANIŞMAN
Prof. Dr. Serdar AYDIN

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Eylül, 2025

Meleğim anneme ve oğlum Ali’ye ithaf ediyorum

BÜTÇE DESTEKLERİ

TÜRKİYE'DE ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ GERİ DÖNÜŞÜM SÜRECİNİN ÇEVRESEL, EKONOMİK ve MEVZUAT AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince gerek yönlendirmeleriyle gerekse de yaptığı bilimsel katkı ve destekleriyle bana yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Serdar AYDIN' a ve lisans dönemimden bu yana desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen hocam Sayın Doç. Dr. Ender ÇETİN' e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, tez sürecinde desteklerini esirgemeyen, AKÜDER' in Yönetim Kurulu Başkanı Sayın Abdurrahman ACAR' a, Genel Sekreteri Sayın Serpil ÖZKAN' a, tüm çalışma arkadaşlarıma ve bana her daim destek olan kıymetli dostlarıma teşekkür ederim.

Hayatımın en özel hediyesi olan canım oğlum Ali'ye, sorumluluklarımı paylaşarak beni her zaman destekleyen sevgili eşime; doğduğum ilk günden bu yana bana inanan, sevgisiyle güç veren meleğim anneme, babama ve kardeşime en içten sevgi ve saygılarımı sunarım.

Eylül 2025 **Ömür TEMİZEL ŞAHİN**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ii
BEYAN iii
BÜTÇE DESTEKLERİ v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİL LİSTESİ xii
TABLO LİSTESİ xiii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ xv
ÖZET xvii
ABSTRACT xviii
1. GİRİŞ 1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE 2
2.1. Elektrikli Araç Bataryaları Hakkında Genel Bilgiler 2
2.1.1. Elektrikli Araç Tanımı 2
2.1.2. Elektrikli Araç Bataryaları 3
2.1.3. Elektrikli Araç Batarya Çeşitleri 3
2.1.3.1. Lityum-İyon (Li-ion) Bataryalar 3
2.1.3.2. Lityum Demir Fosfat (LFP) Bataryalar 4
2.1.3.3. Nikel Kobalt Alüminyum (NCA) Bataryalar 5
2.1.3.4. Nikel Kobalt Manganez (NCM-NMC) Bataryalar 5
2.1.3.5. Sodyum İyon (Na-ion) Bataryalar 6
2.1.3.6. Batarya Özelliklerinin Karşılaştırılması 7
2.1.4. Elektrikli Araç Bataryalarının Yapısal Bileşenleri ve Bu Bileşenlerin İşlevleri 8
2.1.4.1. Elektrotlar (Anot ve Katot) 8
2.1.4.2. Elektrolit 9
2.1.4.3. Ayırıcı (Separatör) 9
2.1.4.4. Koruyucu Katmanlar ve Yapı Tasarımı 9
2.1.4.5. Yapısal Malzemeler ve Isı Yönetimi 10

2.1.4.6. Batarya Ağırlığı ve Yapısal Etkileri 10
2.1.5. Batarya Ömrünü Etkileyen Faktörler 10
2.1.5.1. Şarj-Deşarj Döngüleri ve Kapasite Kaybı 10
2.1.5.2. Termal Yönetim Sistemlerinin Önemi 11
2.1.5.3. Kullanıcı Alışkanlıklarının Batarya Ömrüne Etkisi 12
2.1.6. Elektrikli Araç Bataryalarının Yaşam Döngüsü 12
2.1.6.1. Üretim Süreci ve Hammaddeler 12
2.1.6.2. Kullanım Süreci ve Performans Değişimi 13
2.1.6.3. Atık Aşamasına Geçiş ve İkinci Kullanım Olanakları 13
2.1.7. Batarya Malzemelerinin Tedarik Zinciri ve Kritik Hammaddeler 13
2.1.7.1. Kritik Hammaddelerin Coğrafi Yoğunluğu 14
2.1.7.2. Geri Dönüşümün Tedarik Zincirine Katkısı 15
2.1.7.3. Alternatif Enerji Depolama Malzemeleri ve Teknolojileri 15
2.1.7.4. Tedarik Zinciri İzlenebilirliği ve Dijital Çözümler 15
2.1.8. Batarya Tasarımındaki Yenilikler ve Geri Dönüşüme Etkileri 16
2.1.9. Yeni Nesil Bataryalar ve Geri Dönüşüm 17
3. ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ ÇEVRESEL ETKİLERİ VE GERİ DÖNÜŞÜMÜ 17
3.1. Batarya Atıklarının Çevresel ve İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri 18
3.2. Geri Dönüşüm Yöntemleri ve Verimlilik Analizi 22
3.2.1. Pirometalurjik Süreçler (Yüksek Sıcaklıkta Geri Dönüşüm) 22
3.2.2. Hidrometalurjik Süreçler (Kimyasal Çözme Yöntemleri) 22
3.2.3. Doğrudan Geri Dönüşüm Teknikleri 23
3.2.4. Mevcut Geri Dönüşüm Tesisleri ve Kapasiteleri 24
3.2.5. Türkiye'de Geri Kazanım Oranları ve Çevresel Etkileri 24
3.2.5.1. Türkiye'de Geri Kazanım Süreçlerinin Geleceği ve Öneriler 26
3.2.5.2. Uluslararası İş Birlikleri ve İyi Uygulama Örneklerinden Yararlanma 27
3.3. Dünya Genelindeki Uygulamalar 27
3.3.1. Almanya'da Batarya Geri Dönüşüm Uygulamaları 28
3.3.2. Çin'de Batarya Geri Kazanım Uygulamaları 29
3.3.3. Amerika Birleşik Devletleri'nde Batarya Geri Kazanım Uygulamaları 30
3.3.4. Japonya'da Batarya Geri Kazanım Uygulamaları 31
3.3.5. Enerji Tüketimi ve Kaynak Kullanımı 32
3.3.6. Türkiye'deki Durum ve Karbon Ayak İzi 33
3.3.7. Ulaşım Lojistiğinde Karbon Ayak İzinin Azaltılması 35

3.4. Batarya Atıklarının İnsan Sağlığına Etkileri 36
3.5. Geri Dönüşüm Tesislerinde İşçi Sağlığı ve Güvenliği 36
3.6. Risk Yönetimi ve Acil Durum Planları 37
4. EKONOMİK AÇIDAN ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ GERİ KAZANIMI 38
4.1. Elektrikli Araç Bataryalarında Kullanılan Materyallerin Ekonomik Değeri 38
4.1.2. Hammadde İthalatına Olan Bağımlılığı Azaltma 40
4.1.3. Bataryaların İkinci Kullanımı 40
4.2. Türkiye ve Dünyada Batarya Geri Dönüşümü: Teşvikler, Politikalar ve Ekonomik Modeller 41
5. MEVZUAT VE POLİTİKALAR 43
5.1. Türkiye'de Elektrikli Araç Bataryaları ile İlgili Mevzuat 43
5.2. Avrupa Birliği'nde Batarya Yönetmeliği ve Uyum Süreci 44
5.3. AB Batarya Yönetmeliği Uygulama Takvimi ve Türkiye'ye Etkileri 44
5.4. Depozito Sistemi Önerisi 46
5.5. Stratejik Değerlendirme 47
5.6. Elektrikli Araç Bataryalarının Geri Kazanımı ile İlgili Düzenleyici Kurumlar 47
6. TÜRKİYE'DE ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ GERİ KAZANIM SÜRECİNİN ANALİZİ 48
6.1. Türkiye'de Elektrikli Araç Bataryalarının Geri Dönüşümü: Durum Analizi 48
6.2. Türkiye'de Elektrikli Araç Bataryalarının Geri Kazanımının Değerlendirilmesi 49
6.3. Elektrikli Araç Bataryalarının Mevcut Durumu 50
7. YÖNTEM 52
7.1. Senaryo Metodolojisi ve Literatür İncelemesi 52
7.1.1. Uluslararası Senaryo Yöntemleri (AB, Çin, ABD Örnekleri) 54
7.1.2. Türkiye'ye Uygun Model Seçimi ve Varsayımlar 54
7.1.3. Kullanılan Veri Kaynakları ve Tahmin Yaklaşımları 55
8. BULGULAR 56
8.1. Senaryo 1: G20 Ülkelerinde Elektrikli Araç Bataryalarının Geri Kazanımı Türkiye'nin Yeri ve Kritik Metal Potansiyeli 56
8.1.1. G20 Ülkeleri Batarya Üretim Kapasitesi ve Atık Miktarları (2025–2040) 56
8.1.2. Türkiye'nin Geri Kazanım Potansiyeli ve Stratejik Konumu 57
8.1.3. Geri Kazanım Yöntemleri ve Türkiye'deki Mevcut Durum 57
8.1.4. İkinci Yaşam Uygulamaları ve Potansiyeli 58
8.1.5. Senaryo Kabulleri 58

8.1.6. Ekonomik Değerlendirme: Geri Kazanımın Maliyeti ve Katma Değeri 59
8.1.7. Çevresel Değerlendirme: Karbon Emisyonu Etkisi 59
8.1.8. Genel Değerlendirme ve Politika Sonuçları 60
8.2. Senaryo 2: Türkiye'de Elektrikli Araç Bataryalarının Geri Kazanımı (2020–2040) . 60
8.2.1. Atık Batarya Miktarlarının Yıllara Göre Dağılımı 60
8.2.2. Geri Kazanılabilir Lityum, Kobalt, Nikel Miktarları 61
8.2.3. Ekonomik Değer Hesaplamaları 62
8.2.4. Geri Kazanım Teknolojilerinin Teknik ve Çevresel Değerlendirmesi 62
8.2.5. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) Bulguları 63
8.2.6. Türkiye Özelinde Karbon Ayak İzi (2020–2040) — Metodoloji ve Varsayımlar .. 64
8.2.7. Kritik Hammaddeler Bağımlılığı ve Kaynak Güvenliği 65
8.2.8. Karar Destek ve Simülasyon Modelleri (MFA, LCA, ABM) 65
8.2.9. Ekonomik Modelleme: Geri Kazanımın Makroekonomik Etkileri 66
8.2.10. Uluslararası Uygulamalar ve Türkiye için Kıyaslama 66
8.3. Senaryo 3: Türkiye'de Elektrikli Araç Bataryalarının 2019–2025 Arası Üretimi Ve 10 Yıl Sonra Geri Dönüşüm Durumu 67
8.3.1. Üretim Verilerine Dayalı Geri Dönüşüm Tahmini 67
8.3.2. 2029–2035 Arası Geri Dönüşüm Beklentisi 67
8.3.3. Geri Dönüşüm Teknolojileri ve Yatırım Gerekleri 67
8.3.4. Grafikler, Tablolar ve Tahmin Modeli Çıktıları 68
8.3.4.1. Yıllara Göre Batarya Atık Miktarı Grafikleri 68
8.3.4.2. Geri Kazanılabilir Metal Miktarları ve Dağılımı 68
8.3.4.3. Ekonomik ve Çevresel Fayda Projeksiyonları 69
8.3.5. İkinci Kullanım Batarya Senaryolarının Entegrasyonu 69
8.3.6. Karbon Ayak İzi Değerlendirmesi 70
8.4. Senaryo 4: H_2 Tabanlı Geri Kazanım Süreci (2026–2035) 71
8.4.5. Giriş ve Gerekçe 71
8.4.2. Teknoloji Tanımı ve Süreç Akışı 71
8.4.3. Senaryo Varsayımları ve Hedefler 72
8.4.4. Çevresel Etki ve LCA Değerlendirmesi 73
8.4.5. Ekonomik Değerlendirme 74
8.4.6. Riskler ve Güvenlik 75
8.4.7. Yöntem ve Performans Göstergeleri 75
8.4.8. Sonuç Özeti 75
9. TARTIŞMA 76

9.1. Batarya Toplama ve Lojistik Yönetimi 76
9.2. Çevresel Etki ve Teknolojik Uygulamalar 76
9.3. Türkiye'nin Konumu ve Uluslararası Karşılaştırmalar 77
10. SONUÇ VE ÖNERİLER 78
10.1. Genel Değerlendirme 78
10.2. Politika Önerileri 79
10.2.1. Kurumsal Sorumluluk ve Görev Dağılımı 79
10.2.2. Uygulama Zaman Çizelgesi 80
10.2.3. Teşvik Mekanizmaları 80
10.3. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler 81
10.3.1. Saha Araştırmaları ve Veri Analizleri 81
10.3.2. Tüketici Davranışlarına Yönelik Çalışmalar 81
10.3.3. Yeni Teknolojilerin Uygulanabilirliğine Yönelik Analizler 82
10.3.4. Mevzuat Etki Analizleri ve Uluslararası Uyum 82
10.3.5. Yaşam Döngüsü ve Karbon Ayak İzi Değerlendirmeleri 82
11. KAYNAKLAR 84
12. İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 90
13. ETİK KURUL İZİN YAZISI 91
14. KURUM İZNİ YAZILARI 92
15. ÖZGEÇMİŞ 93

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1.3.1. Lityum iyon batarya hücresi yapısı 4

Şekil 2.1.3.2. Lityum Demir Fosfat ($LiFePO_4$) batarya hücresinin yapısı 4

Şekil 2.1.3.3. Nikel Kobalt Alüminyum (NCA) batarya hücresinin yapısı. 5

Şekil 2.1.3.4. Nikel Kobalt Manganez (NCM/NMC) batarya hücresi yapısı 6

Şekil 2.1.3.5. Sodyum iyon batarya yapısı 6

Şekil 2.1.7.1. 2021 yılına ait lityum, kobalt, nikel ve grafit üretim dağılımı 14

Şekil 8.2.1. 2025–2040 yılları arasında Türkiye'de batarya atık miktarının senaryolara göre projeksiyonu 61

Şekil 8.3.4.1. Yıllara göre Türkiye'de atık batarya miktarları 68

Şekil 8.3.4.2. Yıllara göre geri kazanılabilir metal miktarları 68

Şekil 8.3.4.3. 2030-2050 Arası Geri Kazanımın Ekonomik Değeri 69

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1.1. Elektrik araç türleri özellikleri karşılaştırılması 3

Tablo 2.1.3.6. Batarya özellikleri karşılaştırması 7

Tablo 3.1. Doğrudan Geri Dönüşüm, Pirometalurjik ve Hidrometalurjik Yöntemlerin Karbon Salımı ve Çevresel Etki Karşılaştırması 21

Tablo 3.2.3. Geri dönüşüm yöntemleri ve verimlilik 23

Tablo 3.2.5. SWOT Analizi: Türkiye'de elektrikli araç bataryalarının geri dönüşümü 25

Tablo 3.2.5.2. Türkiye'de batarya geri kazanım süreçlerinin geleceği için stratejik öneriler .. 27

Tablo 4.1. Elektrikli araç bataryalarında kritik materyallerin 2025 yılı itibarıyla piyasa fiyatları, bataryadaki ortalama ağırlıkları, ekonomik değerleri ve toplam maliyetteki payları 39

Tablo 6.3. Türkiye elektrikli araç satışları ve trafikteki ev sayısı (2020–2025) 51

Tablo 6.3.1. Türkiye'de elektrikli araçlara ait batarya stoğu (2020–2030) 51

Tablo 8.1.1. G20 Ülkeleri batarya üretimi, atık projeksiyonu ve geri kazanım potansiyeli 56

Tablo 8.1.7. Geri kazanımın karbon emisyonu üzerindeki etkisi 59

Tablo 8.2.1. 2020-2040 döneminde elektrikli araç bataryası atık miktarları 60

Tablo 8.2.2. 2040 yılında geri kazanılabilir kritik metaller (OPS senaryosu) 61

Tablo 8.2.3. 2040 yılı için geri kazanımın ekonomik değeri (OPS senaryosu) 62

Tablo 8.2.4. Batarya geri kazanım teknolojilerinin GHG (sera gazı) emisyonu, enerji tüketimi ve teknik özellikleri 63

Tablo 8.2.6. Geri kazanım teknolojilerine göre süreç emisyonları 64

Tablo 8.3.6. Türkiye'de batarya geri dönüşümünün karbon ayak izi azaltım potansiyeli 71

Tablo 8.4.3. Türkiye'de Elektrikli Araç Batarya Geri Dönüşüm Tesis Kapasite Projeksiyonu (2026–2035)…….72

Tablo 8.4.4. Türkiye için yıllık karbon tasarrufu projeksiyonu (H_2 Tabanlı, 2035) 73

Tablo 9.1. Türkiye'de batarya toplama altyapısının geliştirme ihtiyaçları 76

Tablo 9.3. Uluslararası Geri Dönüşüm Politikaları ve Türkiye'nin Konumu 77

Tablo 10.1.Türkiye'de Elektrikli Araç Bataryası Geri Kazanımına Yönelik Senaryo Karşılaştırması 78

Tablo 10.2.2. Zaman Dilimi Hedefler ve Faaliyetler 80

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

CO_2/kWh : Üretilen enerji başına karbondioksit emisyonu (kg CO_2/kWh)
CO_2-eq/kg Co : 1 kg kobalt geri kazanımı başına eşdeğer karbondioksit emisyonu
GW : Gigawatt – enerji üretim kapasitesi birimi
GWh : Gigawatt-saat – enerji üretim veya tüketim miktarı
Kg CO_2 : Karbondioksit emisyon miktarı (kilogram cinsinden)
kWh : Kilowatt-saat – elektrik enerjisi birimi
tCO_2 : Ton cinsinden karbondioksit emisyonu

Kısaltmalar **Açıklama**

ABM : Ajans Tabanlı Modelleme (Agent-Based Modeling)
BEV : Bataryalı Elektrikli Araç (Battery Electric Vehicle)
BMS : Batarya Yönetim Sistemi (Battery Management System)
DPS : Düşük Penetrasyon Senaryosu
EA : Elektrikli Araç (Electric Vehicle)
EPR : Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (Extended Producer Responsibility)
GHG : Sera Gazı (Greenhouse Gas)
GSYİH : Sera Gazı (Greenhouse Gas)
GSYİH : Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
HEV : Hibrit Elektrikli Araç (Hybrid Electric Vehicle)
LCA : Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (Life Cycle Assessment)
$LiFePO_4$: Lityum Demir Fosfat Batarya
LMT : Hafif Ulaşım Araçları (Light Means of Transport)
MFA : Malzeme Akış Analizi (Material Flow Analysis)
NCA : Nikel-Kobalt-Alüminyum Batarya Kimyası
NCM / NMC : Nikel-Kobalt-Manganez Batarya Kimyası
OPS : Orta Penetrasyon Senaryosu

PHEV : Şarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araç (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
SLI : Marş–Aydınlatma–Ateşleme Aküleri
SWOT : Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar, Tehditler Analiz
TMS : Termal Yönetim Sistemi (Thermal Management System)
YPS : Yüksek Penetrasyon Senaryosu

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TÜRKİYE'DE ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ GERİ DÖNÜŞÜM SÜRECİNİN ÇEVRESEL, EKONOMİK VE MEVZUAT AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ömür TEMİZEL ŞAHİN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Prof. Dr. Serdar AYDIN

Elektrikli araçlar (EV), karbon emisyonlarını azaltmak ve fosil yakıtlara bağımlılığı düşürmek açısından önemlidir. Ancak bataryaların kullanım ömrü sonunda geri dönüşüm süreçleri; çevresel kirlilik, ekonomik kayıplar ve mevzuat eksiklikleri gibi sorunlar doğurmaktadır.

Bu çalışma, Türkiye'de elektrikli araç bataryalarının geri dönüşümünü çevresel etkiler, ekonomik fizibilite ve mevzuat uyumu açısından değerlendirmektedir. Literatür ve mevzuat analizi yapılmış; AB düzenlemeleri ile Türkiye uygulamaları karşılaştırılmış, senaryolarla süreçler analiz edilmiştir.

Bulgular, altyapının gelişmekte olduğunu ve sektörde yüksek potansiyel bulunduğunu göstermektedir. Mevzuatın güçlendirilmesi, teşviklerin artırılması ve teknik kapasitenin geliştirilmesi sürdürülebilir geri dönüşüm için gereklidir

Eylül 2025 , 112 sayfa.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araç bataryaları, geri dönüşüm, çevresel etki, ekonomik analiz, mevzuat, sürdürülebilirlik, Türkiye, senaryo analizi, karbon ayak izi

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

EVALUATİON OF THE RECYCLİNG PROCESS OF ELECTRİC VEHİCLE BATTERİES İN TERMS OF ENVİRONMENTAL, ECONOMİC AND LEGİSLATİON İN TÜRKİYE

Ömür TEMİZEL ŞAHİN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Environmental Engineering

Environmental Engineering, Master of Science Program with Thesis

Supervisor : Prof. Dr. Serdar AYDIN

Electric vehicles (EVs) help reduce carbon emissions and fossil fuel dependence. However, end-of-life battery recycling poses challenges such as environmental risks, economic losses, and regulatory gaps.

This study evaluates EV battery recycling in Türkiye in terms of environmental impact, economic feasibility, and legal alignment. Literature and regulatory reviews were conducted; EU regulations were compared with Turkish practices, and scenario-based analyses were applied.

Findings show growing infrastructure and strong sectoral potential. Strengthening legislation, increasing incentives, and improving technical capacity are essential for sustainable recycling.

September 2025, 111 pages.

Keywords: Electric vehicle batteries, recycling, environmental impact, economic analysis, legislation, sustainability, Türkiye, scenario analysis, carbon footprint

1. GİRİŞ

Elektrikli araçlar (EV'ler), fosil yakıtlı araçlara kıyasla daha düşük karbon emisyonları ve enerji verimliliği ile çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlamaktadır. Ancak, EV bataryalarının kullanım ömrünü tamamlamasıyla ortaya çıkan atık yönetimi, çevresel ve ekonomik açıdan önemli zorlukları beraberinde getirmektedir. Özellikle, bu bataryaların içerdikleri lityum, kobalt ve nikel gibi değerli metallerin geri dönüşümü hem çevresel kirlenmenin önlenmesi hem de ekonomik değer yaratılması açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Bataryaların uygun şekilde geri dönüştürülmemesi durumunda, içerdikleri toksik maddeler nedeniyle toprak, su ve hava kirliliğine yol açabilmektedir. Bu kirlilik hem çevresel hem de insan sağlığı açısından ciddi olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Ayrıca, geri dönüşüm süreçlerinin etkinliği, bataryalardaki değerli metallerin yeniden kazanılması ve ekonomiye kazandırılması açısından da büyük önem taşımaktadır.

Avrupa Birliği, batarya üretimi ve geri dönüşümü konusunda sürdürülebilirlik ve şeffaflık gerekliliklerini içeren yeni mevzuatlar geliştirmiştir. Bu kapsamda, lityum içerikli bataryalarda geri dönüşüm verimlilik hedefi 2025 yılı sonu için %65, 2030 yılı sonu için ise %70 olarak belirlenmiştir (Avrupa Komisyonu, 2025). Türkiye'de ise batarya geri dönüşümüne yönelik altyapı henüz gelişmektedir.

Bu çalışma, Türkiye'de elektrikli araç bataryalarının geri dönüşüm süreçlerini çevresel, ekonomik ve mevzuat açısından değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Araştırma kapsamında, literatür taraması ve mevzuat analizi gerçekleştirilerek, batarya geri dönüşüm süreçlerinin çevresel etkileri, ekonomik fizibilitesi ve mevzuat çerçevesi incelenecektir. Ayrıca, farklı geri dönüşüm senaryoları oluşturularak bu süreçler karşılaştırmalı olarak ele alınacaktır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Elektrikli Araç Bataryaları Hakkında Genel Bilgiler

2.1.1. Elektrikli Araç Tanımı

Elektrikli araçlar (EA), içten yanmalı motor yerine elektrik enerjisi ile çalışan motorlara sahip araçlardır. Bu araçlar, bataryalarında depolanan elektrik enerjisini kullanarak hareket eder ve fosil yakıt tüketimine alternatif bir ulaşım çözümü sunar. Elektrikli araçlar, bataryalı elektrikli araçlar (BEV), şarj edilebilir hibrit elektrikli araçlar (PHEV) ve hibrit elektrikli araçlar (HEV) olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Ehsani ve ark., 2018).

Elektrikli araçların avantajları arasında düşük karbon salınımı, enerji verimliliği ve uzun vadede daha düşük işletme maliyetleri bulunmaktadır (Hadjipaschalis ve ark., 2009). Ancak, batarya maliyetleri, şarj altyapısının gelişmemiş olması ve menzil kaygısı gibi bazı dezavantajları da vardır. Elektrikli araç türlerinin teknik ve çevresel özellikleri Tablo 2.1.1.'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur (RF Wireless World, 2025; PCMag, 2024).

Özellik	**BEV (Bataryalı Elektrikli Araç)**	**PHEV (Sarj Edilebilir Hibrit Elektrikli Araç)**	**HEV (Hibrit Elektrikli Araç)**
Güç Kaynağı	Sadece Batarya	Batarya + İçten Yanmalı Motor	İçten Yanmalı Motor + Küçük Batarya
Emisyon	Sıfır Emisyon	Düşük Emisyon (Karışık kullanım)	Orta Emisyon
Menzil (km)	300-600 km	40-80 km (Elektrik) + 500-800 km (Benzin)	500-900 km
Şarj Süresi	30 dk - 12 saat (hızlı/normal)	1-4 saat (harici şarj)	Şarj Gerektirmez (Kendini şarj eder)
Bakım Maliyeti	Düşük (Daha az hareketli parça)	Orta (İçten yanmalı motor nedeniyle)	Yüksek (İçten yanmalı motor ve elektrik sistemi)
Yakıt Verimliliği	Yüksek (Sadece elektrik kullanımı)	Orta (Kısa mesafede elektrik, uzun mesafede benzin)	Orta (Elektrik destekli yakıt)
İlk Satın Alma Maliyeti	Yüksek (Batarya maliyeti nedeniyle)	Orta-Yüksek (Çift sistem nedeniyle)	Orta (Çift sistem ve karmaşık yapı nedeniyle)

Çevresel Etki	Düşük karbon ayak izi (Yenilenebilir enerjiye bağlı)	Orta (Elektrik ve fosil yakıt kullanımı)	Orta-Yüksek (Yakıt tüketimi nedeniyle)
Kullanım Esnekliği	Sınırlı (Şarj altyapısına bağlı)	Yüksek (Hem elektrik hem yakıt esnekliği)	Çok Yüksek (Yakıt istasyonlarına bağlı)

Tablo 2.1.1. Elektrik araç türleri özellikleri karşılaştırılması

(Veriler, EEA (2022); IEA Global EV Outlook (2023); Dolu batarya (2025) çalışmalarından uyarlanmıştır.)

2.1.2. Elektrikli Araç Bataryaları

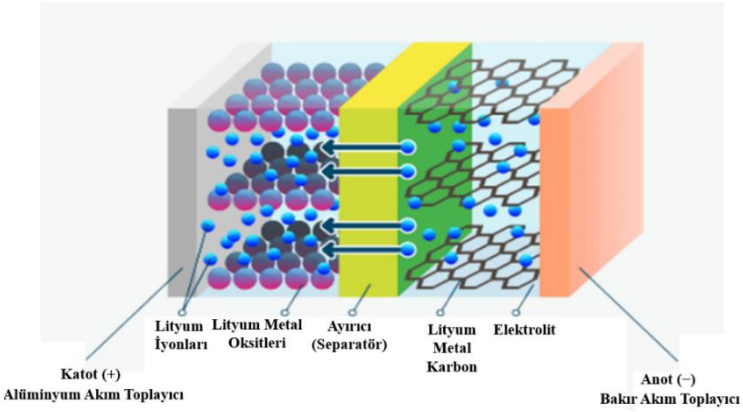
Elektrikli araçların en kritik bileşenlerinden biri enerji depolama sistemleridir. Günümüzde bu alanda en yaygın kullanılan teknoloji lityum-iyon bataryalardır (Nykvist ve Nilsson, 2015). Bu bataryalar, anot, katot, elektrolit ve ayırıcı gibi temel bileşenlerden oluşur ve performans, güvenlik ile maliyet açısından sürekli olarak geliştirilmektedir.

Bununla birlikte, farklı kimyasal bileşimlere sahip batarya türleri de elektrikli araç teknolojilerinde kullanılmakta ve gelişmektedir. Aşağıdaki alt başlıklarda, lityum demir fosfat (LFP), nikel kobalt alüminyum (NCA), nikel kobalt manganez (NCM/NMC) ve sodyum-iyon (Na-ion) gibi alternatif batarya teknolojileri teknik özellikleri, çevresel etkileri ve geri dönüşüm potansiyelleri açısından ele alınacaktır.

2.1.3. Elektrikli Araç Batarya Çeşitleri

2.1.3.1. Lityum-İyon (Li-ion) Bataryalar

Lityum iyon bataryalar, elektrikli araçlarda en yaygın olarak kullanılan batarya türüdür. Yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve hafiflik gibi özellikleri sayesinde elektrikli araçlarda tercih edilmektedir. Bu bataryaların en önemli avantajı, yüksek enerji yoğunluğu sayesinde uzun menzil sunabilmesidir (Nagaoka ve ark., 2020) Ayrıca, hızlı şarj olabilme kapasiteleri ve düşük ağırlıkları, bu teknolojiyi elektrikli araçlar için ideal hale getirmektedir. Lityum-iyon bataryaların temel hücre yapısı Şekil 2.3.1'de gösterilmektedir (Holo Battery, 2025).

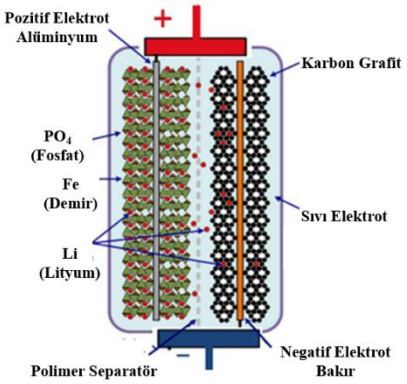


Şekil 2.1.3.1. Lityum iyon batarya hücresi yapısı
Kaynak: Holo Battery (2025)

Şekil 2.1.3.1.' de Lityum-iyon batarya hücresi; anot, katot, elektrolit ve ayırıcıdan (separatör) oluşan temel bileşenlerden meydana gelir. Elektrolit, lityum iyonlarının elektrotlar arasında hareketini sağlayarak şarj ve deşarj süreçlerini mümkün kılar. Katot genellikle lityum metal oksitlerden, anot ise lityum-karbon bileşiklerinden oluşur. Ayırıcı, elektrotların fiziksel temasını engellerken iyon geçişine izin verir.

2.1.3.2. Lityum Demir Fosfat (LFP) Bataryalar

Lityum demir fosfat bataryaları, lityum-iyon bataryaların bir alt türü olup genellikle daha uzun ömürlü ve güvenli olmalarıyla öne çıkar. Her ne kadar enerji yoğunlukları nispeten düşük olsa da termal kararlılıkları ve çevresel açıdan daha az risk barındırmaları, önemli avantajlar sunmaktadır (Zhao ve ark., 2021) Ayrıca, daha düşük maliyetli olmaları nedeniyle özellikle ekonomik sınıf elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

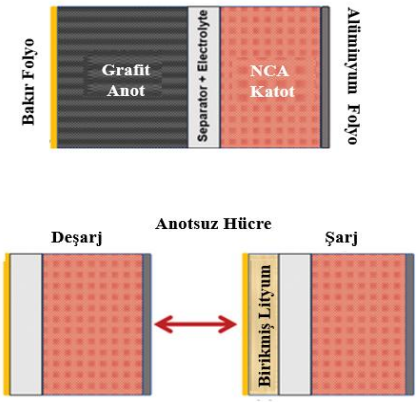


Şekil 2.1.3.2. Lityum Demir Fosfat ($LiFePO_4$) batarya hücresinin yapısı
Kaynak: Atakale Forum (2025)

Şekil 2.1.3.2. ‘de Pozitif elektrot (alüminyum üzerine $LiFePO_4$), negatif elektrot (bakır üzerine grafit), sıvı elektrolit ve polimer separatörden oluşan LFP batarya hücresinin şematik yapısı.

2.1.3.3. Nikel Kobalt Alüminyum (NCA) Bataryalar

Nikel kobalt alüminyum bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun menzil sağlama özellikleriyle özellikle yüksek performans gerektiren elektrikli araçlarda kullanılmaktadır. (Liu ve ark., 2022) Ancak, nadir metaller içermeleri nedeniyle üretim maliyetleri görece yüksektir.



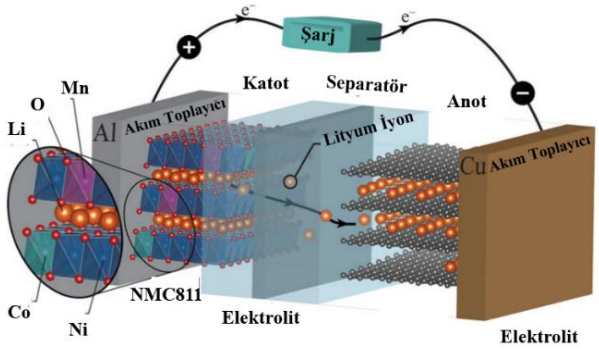
Şekil 2.1.3.3. Nikel Kobalt Alüminyum (NCA) batarya hücresinin yapısı

Kaynak: (Nanda, Gupta ve Manthiram, (2020).

Şekil 2.1.3.3.’de grafit anot (bakır folyo üzerinde), NCA katot (alüminyum folyo üzerinde), sıvı elektrolit ve polimer ayırıcıdan oluşan lityum-iyon batarya hücresi görülmektedir. Alt diyagramlarda, anotsuz hücre tasarımında şarj ve deşarj süreçlerinde lityum birikimi gösterilmiştir. Bu yapı, enerji yoğunluğunu artırırken batarya ağırlığını azaltma potansiyeli taşır.

2.1.3.4. Nikel Kobalt Manganez (NCM-NMC) Bataryalar

Nikel-kobalt-manganez bataryaları, yüksek enerji yoğunluğu ile dengeli performans özellikleri sunan yaygın batarya türlerinden biridir. Özellikle sıcaklık yönetimi ve şarj-deşarj döngüsü açısından verimli performans sergilemektedirler (Wang ve ark., 2019). Şekil 2.1.3.4’te, NMC811 katot kullanılan bir lityum-iyon batarya hücresinin yapısı ve iyon hareketleri şematik olarak gösterilmektedir (Taghikhani ve ark., 2021).

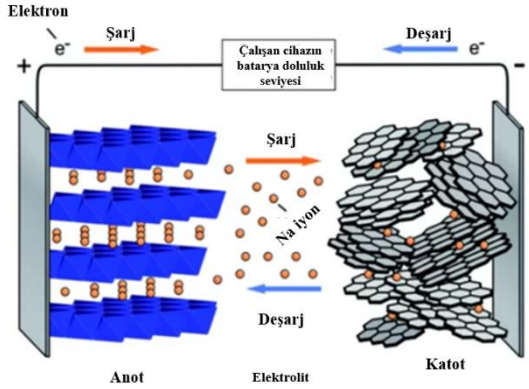


Şekil 2.1.3.4. Nikel Kobalt Manganez (NCM/NMC) batarya hücresi yapısı

Kaynak : Taghikhani, Weddle, Berger ve Kee (2021)

2.1.3.5. Sodyum İyon (Na-ion) Bataryalar

Sodyum iyon bataryaları, lityum-iyon teknolojisine alternatif olarak geliştirilen yeni nesil batarya türlerindendir. Sodyum elementinin doğada daha bol bulunması ve daha düşük maliyetli olması, bu teknolojiyi potansiyel olarak cazip kılmaktadır. Ancak günümüzde, enerji yoğunlukları açısından lityum-iyon bataryaların gerisindedirler (Yuan ve ark., 2020). Bu nedenle, hâlihazırda daha çok düşük maliyetli uygulamalar için değerlendirilmekte ve araştırma-geliştirme aşamasındadırlar. Elektrikli araçlarda henüz yaygın olarak kullanılmamakla birlikte, özellikle hafif araçlar ve soğuk iklim koşullarına uygun modeller için potansiyel bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Beefull, 2025; Dolubatarya, 2025).



Şekil 2.1.3.5. Sodyum iyon batarya yapısı

Kaynak: CM Batteries (2025)

Şekil 2.1.3.5 'te, anot ve katot arasında elektrolit aracılığıyla gerçekleşen Na^+ iyonlarının hareketi ve elektron akışı gösterilmektedir. Şarj sırasında lityum benzeri iyonların anot yüzeyinde birikimi, deşarj sırasında ise enerji aktarımı sağlanmaktadır. (CM Batteries, 2025)

Sonuç olarak, elektrikli araçlarda kullanılan batarya teknolojileri; performans, maliyet, güvenlik ve çevresel etki gibi çeşitli kriterlere göre farklılık göstermektedir. Lityum-iyon bataryalar halen en yaygın teknoloji olarak öne çıkarken, lityum nikel manganez kobalt oksit (NMC) ve lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA) gibi yüksek enerji yoğunluklu türler, genellikle üst segment araçlarda tercih edilmektedir. Öte yandan, lityum demir fosfat (LFP) ve sodyum iyon (Na-ion) bataryalar ise güvenlik, çevresel sürdürülebilirlik ve maliyet avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Bu teknolojik çeşitlilik, elektrikli araç pazarının farklı kullanım senaryolarına ve beklentilerine yönelik esnek çözümler sunmaktadır.

2.1.3.6. Batarya Özelliklerinin Karşılaştırılması

Farklı batarya teknolojilerinin teknik performansları, çevresel etkileri ve kullanım alanları, elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemleri açısından kritik karar noktaları sunmaktadır. Aşağıda yer alan Tablo 2.1.3.6' da, enerji yoğunluğu, ömür döngüsü, güvenlik, maliyet ve karbon ayak izi gibi temel parametreler üzerinden Li-ion, LFP, NCA, NMC ve Na-ion batarya türlerini karşılaştırmalı biçimde sunarak değerlendirme sürecine katkı sağlamaktadır.

Özellik	**Lityum-İyon (Li-ion)**	**Lityum Demir Fosfat (LFP)**	**Nikel-Kobalt-Alüminyum (NCA)**	**Nikel-Kobalt-Manganez (NMC)**	**Sodyum-İyon (Na-ion)**
Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Yüksek (100-265)	Düşük (90-160)	Çok Yüksek (200-260)	Orta (150-220)	Düşük (100-160)
Ömür Döngüsü (Şarj-Deşarj)	1000-3000	2000-5000	1000-2000	1500-3000	1000-2000
Güvenlik	Orta (Isı kaynaklı riskler)	Yüksek (Termal stabilite)	Düşük (Isınmaya duyarlı)	Orta (Gelişmiş termal stabilite)	Yüksek (Yanıcı değil)
Maliyet	Yüksek	Orta	Çok Yüksek	Yüksek	Düşük
Çevresel Etki	Orta (Sınırlı geri dönüşüm)	Düşük (Daha az toksik malzeme)	Yüksek (Kobalt kullanımı)	Orta-Yüksek (Kobalt içeriği)	Düşük (Çevre dostu)
Kullanım Alanları	Elektrikli araçlar, tüketici elektroniği	Elektrikli araçlar, enerji depolama	Yüksek performanslı elektrikli araçlar	Elektrikli ve hibrit araçlar	Enerji depolama, potansiyel elektrikli araçlar

Karbon Ayak İzi	Yüksek (Enerji yoğun üretim)	Düşük (Daha bol ve çevre dostu malzeme)	Çok Yüksek (Enerji yoğun madencilik)	Yüksek (Enerji yoğun işleme)	Düşük (Enerji tasarruflu üretim)

Tablo 2.1.3.6. Batarya özellikleri karşılaştırması

(Veriler, Sri-on ve ark. (2024); Tran ve ark. (2021); Brand ve ark. (2013); Beefull (2025); Dolubatarya (2025) çalışmalarından uyarlanmıştır.)

2.1.4. Elektrikli Araç Bataryalarının Yapısal Bileşenleri ve Bu Bileşenlerin İşlevleri

2.1.4.1. Elektrotlar (Anot ve Katot)

Bataryaların enerji depolayan ve enerji salan bileşenleridir. Elektrikli araç bataryalarında genellikle iki tür elektrot kullanılır: pozitif elektrot (katot) ve negatif elektrot (anot).

Anot

Elektrikli araç bataryalarında en yaygın kullanılan anot malzemesi grafittir. Grafit, yaklaşık 372 mAh/g teorik kapasiteye sahip olup, yüksek çevrim kararlılığı ve uygun maliyeti sayesinde ticari lityum-iyon bataryalarda standart hale gelmiştir (Nitta ve ark., 2015). Grafitin katmanlı yapısı, lityum iyonlarının yerleşmesine olanak tanıyarak iyi bir şarj-deşarj döngüsü performansı sunar.

Bununla birlikte, artan enerji yoğunluğu ihtiyacı doğrultusunda silisyum bazlı anotlar üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Silisyumun teorik kapasitesi yaklaşık 4200 mAh/g olup, grafite kıyasla yaklaşık on kat daha fazladır (Obrovac & Chevrier, 2014). Bu yüksek kapasite potansiyeli, özellikle uzun menzil hedefleyen elektrikli araçlar için büyük avantaj sağlamaktadır. Ancak silisyum anotlar, şarj sırasında hacimsel olarak %300'e kadar genişleyebildiği için yapısal bozulmalar ve elektrot stabilitesi açısından teknik zorluklar barındırmaktadır (Zhang ve ark., 2019).

Katot

Elektrikli araç bataryalarında kullanılan pozitif elektrot, yani katot, bataryanın enerji yoğunluğu, çevrim ömrü, güvenlik profili ve çevresel etkisi üzerinde doğrudan belirleyici bir rol oynar. Lityum-iyon batarya teknolojisinde, batarya türleri büyük ölçüde kullanılan katot malzemesine göre sınıflandırılmaktadır (Rosellón Inclán & Wicke, 2023; Brand ve ark., 2013).

Günümüzde elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan katot bileşikleri şunlardır:

- **Lityum Demir Fosfat (LFP)**: Düşük enerji yoğunluğuna rağmen yüksek termal stabilite, uzun çevrim ömrü ve düşük maliyet avantajı sunar. Özellikle güvenlik öncelikli uygulamalarda tercih edilmektedir (Zecar, 2023).

- **Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA)**: Yüksek enerji yoğunluğu ve hafif yapısıyla uzun menzilli elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılır. Ancak termal yönetim açısından dikkat gerektirir (Brand ve ark., 2013).

- **Nikel Kobalt Manganez Oksit (NMC)**: Dengeli enerji yoğunluğu, çevrim ömrü ve maliyet profili ile hem tam elektrikli hem de hibrit araçlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Kobalt içeriği azaltılmış versiyonları çevresel etkiyi düşürme amacıyla geliştirilmektedir (Rosellón Inclán ve Wicke, 2023).

2.1.4.2. *Elektrolit*

İyonların elektrotlar arasında hareket etmesini sağlayan iletken çözücüdür. Elektrikli araç bataryalarında en yaygın olarak kullanılan elektrolit türü, lityum tuzları içeren sıvı elektrolitlerdir. Lityum-iyon bataryalarında kullanılan elektrolit, genellikle lityum heksafluorofosfat ($LiPF_6$) tuzunu içerir (Chen ve ark., 2020). Elektrolit, bataryaların şarj ve deşarj döngülerini düzenler ve aynı zamanda bataryaların güvenliğini sağlamak için sıcaklık ve voltaj sınırlarını kontrol eder.

2.1.4.3. Ayırıcı (Separatör)

Elektrotların birbirine değmesini engelleyerek kısa devreyi önler ve iyonların elektrotlar arasında geçişini sağlar. Ayırıcılar, mikro gözenekli polimer malzemelerden yapılmaktadır. En yaygın kullanılan malzeme polietilen (PE) veya polipropilen (PP) bazlı polimerlerdir (Liu ve ark., 2021). Bu malzemeler, yüksek mekanik dayanıklılığa ve kimyasal stabiliteye sahiptir.

2.1.4.4. Koruyucu Katmanlar ve Yapı Tasarımı

Elektrikli araç bataryaları, yüksek güvenlik ve verimlilik sağlamak için genellikle çok hücreli yapılandırmalara sahiptir. Batarya hücreleri, paralel ve seri bağlantılarla birbirine bağlanarak, bataryanın toplam voltaj ve kapasitesi belirlenir. Batarya yönetim sistemi (BMS), bataryanın şarj ve deşarj işlemlerini izler ve yönetir. Bu sistem, bataryanın hücre sıcaklıklarını, voltajını ve genel sağlığını izler, böylece bataryanın ömrünü uzatır ve güvenliğini artırır (Xu ve ark., 2021).

2.1.4.5. Yapısal Malzemeler ve Isı Yönetimi

Elektrikli araç bataryalarının verimli çalışabilmesi için ısı yönetimi kritik öneme sahiptir. Bataryalar şarj olurken ısınır ve bu ısının doğru şekilde yönetilmesi, bataryanın ömrünü uzatır ve güvenliği sağlar. Batarya gövdeleri genellikle alüminyum veya çelik gibi ısıyı yayabilen malzemelerden yapılır. Bataryaların içine yerleştirilen ısı yönetim sistemleri, bataryanın aşırı ısınmasını engellemek için soğutma sıvıları veya hava akışları kullanır (Yuan ve ark., 2020).

2.1.4.6. Batarya Ağırlığı ve Yapısal Etkileri

Elektrikli araç bataryalarının ağırlığı, batarya kapasitesine, hücre kimyasına ve yapısal bileşenlerin yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Ortalama bir batarya paketi 250 ila 600 kg arasında bir ağırlığa sahiptir. Örneğin, 40 kWh kapasiteli bir batarya yaklaşık 300 kg**,** 100 kWh kapasiteli bir batarya ise 500–600 kg civarındadır (Batmaz, 2022; Tesla Inc., 2025). Bu ağırlık, aracın toplam kütlesinin %20–30'unu oluşturabilir ve menzil, enerji tüketimi ile güvenlik tasarımını doğrudan etkiler (Abdulvahitoğlu ve ark., 2022). Batarya ağırlığı, aynı zamanda geri dönüşüm süreçleri ve çevresel etki analizleri açısından da önemli bir parametredir (Nissan Motor Co., 2025).

2.1.5. Batarya Ömrünü Etkileyen Faktörler

Elektrikli araç bataryaları, kullanım koşullarına bağlı olarak genellikle 2 ila 10 yıl arasında hizmet verebilmektedir (Ulusoy, 2023)

Bataryaların ömrü, sadece teknolojik özelliklerine değil, aynı zamanda kullanım şekline, çevresel koşullara ve bakım süreçlerine de bağlıdır. Şarj-deşarj döngüleri, termal yönetim sistemleri ve kullanıcı alışkanlıkları bu konuda belirleyici unsurlar arasında yer almaktadır. Aşağıda bu faktörler detaylı olarak incelenmektedir.

2.1.5.1. Şarj-Deşarj Döngüleri ve Kapasite Kaybı

Elektrikli araç bataryalarının ömrü büyük ölçüde şarj-deşarj döngülerine bağlıdır. Her tam şarj ve ardından gelen deşarj işlemi, bir döngü olarak kabul edilir ve zamanla bataryanın kapasitesinde azalmaya yol açar. Bu azalma, "kapasite kaybı" olarak adlandırılır ve bataryanın menzilinin düşmesine neden olur. Lityum-iyon bataryalar genellikle 1000 ila 2000 tam döngü arasında etkin şekilde çalışabilir; ancak bu sayı kullanım koşullarına göre değişebilir (Dubarry ve ark., 2010)

Kapasite kaybının başlıca nedenleri arasında, anot ve katot aktif malzemelerinde zamanla meydana gelen kimyasal bozunmalar, elektrolit bileşenlerinde oluşan yapısal bozulmalar ve lityumun aktif olmayan forma dönüşmesi yer almaktadır. Özellikle yüksek akımlarla gerçekleştirilen şarj ve deşarj işlemleri, hücre içi sıcaklığın artmasına neden olarak bu bozunma süreçlerini hızlandırmakta ve batarya yapısının termal olarak daha hızlı yıpranmasına yol açmaktadır (Wang ve ark., 2011)

Bu nedenle, bataryaların ömrünü uzatmak için kısmi şarj-deşarj döngülerinin tercih edilmesi, hızlı şarj kullanımının sınırlanması ve bataryaların aşırı şarj veya aşırı deşarja maruz bırakılmaması önerilmektedir. Yapılan araştırmalar, bataryaların %20 ila %80 şarj seviyeleri arasında kullanıldığında, kapasite kaybının önemli ölçüde yavaşladığını göstermektedir (Peterson ve ark., 2012)

2.1.5.2. Termal Yönetim Sistemlerinin Önemi

Lityum iyon bataryaların performansı ve ömrü, çalışma sıcaklığına doğrudan bağlıdır. Bataryaların optimal performans göstermesi ve güvenli bir şekilde çalışması için genellikle 15°C ile 35°C arasındaki sıcaklık aralığı ideal kabul edilmektedir (Li ve ark., 2023) Bu sıcaklık aralığının dışına çıkıldığında, batarya performansı düşebilir, kapasite kaybı hızlanabilir ve güvenlik riskleri artabilir.

Termal yönetim sistemleri (TMS), bataryaların bu ideal sıcaklık aralığında çalışmasını sağlamak için geliştirilmiş teknolojilerdir. Bu sistemler, batarya hücrelerinin aşırı ısınmasını veya soğumasını engelleyerek, performans kaybını ve termal kaçak gibi güvenlik risklerini minimize eder (Zhao ve ark., 2023) Özellikle yüksek enerji yoğunluklu bataryalara sahip tam elektrikli araçlarda, sıvı soğutmalı veya hibrit soğutma sistemlerinin kullanılması önerilmektedir (Wang ve ark., 2023)

Sıvı soğutmalı sistemler, batarya modüllerinin etrafına yerleştirilen soğutma kanalları sayesinde ısıyı etkin bir şekilde dağıtarak sıcaklık dengesini sağlar. Bu sayede batarya hücreleri daha eşit koşullarda çalışır ve hücreler arası yaşlanma farkı azalır (Chen ve ark., 2023) Böylece hem batarya ömrü uzar hem de sistem güvenliği artar.

Özellikle yüksek sıcaklıklarda meydana gelebilecek termal kaçak durumunun önlenmesi, elektrikli araç güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Araştırmalar, etkili bir termal

yönetim sistemi kullanılmadığında batarya sıcaklığının kontrolsüz bir şekilde yükselerek yangın veya patlamaya yol açabileceğini ortaya koymaktadır (Cyber Switching, 2023)

Sonuç olarak, batarya termal yönetim sistemleri, elektrikli araçların performansı, güvenliği ve batarya ömrü açısından vazgeçilmezdir. Bu sistemlerin etkinliği, elektrikli araç teknolojisinin sürdürülebilir gelişimi için temel bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

2.1.5.3. Kullanıcı Alışkanlıklarının Batarya Ömrüne Etkisi

Kullanıcıların batarya kullanım alışkanlıkları, batarya ömrü üzerinde doğrudan etkilidir. Örneğin, bataryaların sürekli olarak tam kapasiteye kadar şarj edilmesi ve tamamen deşarj edilmesi, batarya ömrünü kısaltabilir. Ayrıca, yüksek hızlı şarj yöntemlerinin sık kullanımı, batarya hücrelerinde ısı birikimine ve dolayısıyla kapasite kaybına yol açabilir. Bu nedenle, kullanıcıların bataryalarını düzenli aralıklarla ve önerilen şarj seviyelerinde şarj etmeleri, aşırı sıcak veya soğuk ortamlardan kaçınmaları ve hızlı şarjı yalnızca gerektiğinde kullanmaları tavsiye edilir.

2.1.6. Elektrikli Araç Bataryalarının Yaşam Döngüsü

Elektrikli araç bataryalarının yaşam döngüsü, üretimden kullanım ve nihai bertarafa kadar çeşitli aşamalardan oluşur. Aşağıda, bu süreçler detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

2.1.6.1. Üretim Süreci ve Hammaddeler

Elektrikli araç bataryalarının üretimi, temel olarak lityum, kobalt, nikel ve manganez gibi stratejik öneme sahip metallerin çıkarılması ve işlenmesi süreçlerine dayanmaktadır. Bu hammaddelerin madenciliği, yüksek enerji tüketimi ve su kullanımı gerektiren, dolayısıyla önemli çevresel etkilere yol açan bir faaliyettir. Özellikle kobalt madenciliği, habitat tahribatı, toprak ve su kirliliği ile toksik atık oluşumu gibi ciddi çevresel sorunlara neden olabilmektedir (Dunn ve ark., 2015) Ayrıca bu süreçler, tedarik zincirinde karbon ayak izinin önemli bir kısmını oluşturmakta ve iklim değişikliğine katkıda bulunmaktadır (Gaines, 2014)

Bu olumsuz etkilerin azaltılması amacıyla, batarya üreticileri ve hammadde tedarikçileri sürdürülebilir madencilik uygulamalarını benimsemeye yönelmektedir. Buna ek olarak, geri dönüştürülmüş malzemelerin batarya üretiminde kullanım oranının artırılması da çevresel etkilerin azaltılmasında etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Harper ve ark., 2019) Geri dönüşüm yoluyla elde edilen metallerin yeniden kullanılması, doğal kaynakların tükenmesini yavaşlatmakta ve üretim süreçlerinin çevresel yükünü azaltmaktadır.

Bu doğrultuda, Avrupa Birliği Batarya Tüzüğü kapsamında bataryalarda geri dönüştürülmüş içerik kullanımına yönelik zorunlu hedefler belirlenmiştir. Tüzüğe göre, 2031 yılı itibarıyla bataryalarda geri dönüştürülmüş kobalt (%16), lityum (%6) ve nikel (%6) kullanımı zorunlu hale getirilmiş; 2036 yılı itibarıyla bu oranlar sırasıyla %26, %12 ve %15 olarak güncellenmiştir (Avrupa Parlamentosu ve Konsey, 2023/1542)

2.1.6.2. Kullanım Süreci ve Performans Değişimi

Elektrikli araçların kullanım aşamasında, bataryaların performansı zamanla azalabilir. Şarj-deşarj döngüleri, sıcaklık dalgalanmaları ve yüksek hızlı şarj gibi faktörler, batarya kapasitesinin düşmesine neden olabilir. Bununla birlikte, elektrikli araçlar, kullanım sırasında doğrudan egzoz emisyonu üretmezler. Ancak, şarj için kullanılan elektriğin üretim kaynağı, toplam karbon ayak izi üzerinde belirleyici bir faktördür. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrikle şarj edilen araçlar, fosil yakıtlardan elde edilen elektriğe kıyasla daha düşük karbon emisyonlarına sahiptir.

2.1.6.3. Atık Aşamasına Geçiş ve İkinci Kullanım Olanakları

Bataryaların kullanım ömrü sona erdiğinde, atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçleri devreye girmektedir. Geri dönüşüm, değerli metallerin yeniden kazanılmasını sağlayarak yeni batarya üretiminde hammadde ihtiyacını azaltmakta ve çevresel etkileri önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, ömrünü tamamlamış bataryalar genellikle orijinal depolama kapasitelerinin %70–80' ine sahip olmaya devam etmektedir. Bu kapasite elektrikli araç kullanımı için yeterli olmasa da elektrik şebekelerinde güç dengelemesi gibi ikincil uygulamalarda kullanılabilir (Çınar ve ark., 2018) Bu tür ikinci kullanım senaryoları, bataryaların toplam yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

2.1.7. Batarya Malzemelerinin Tedarik Zinciri ve Kritik Hammaddeler

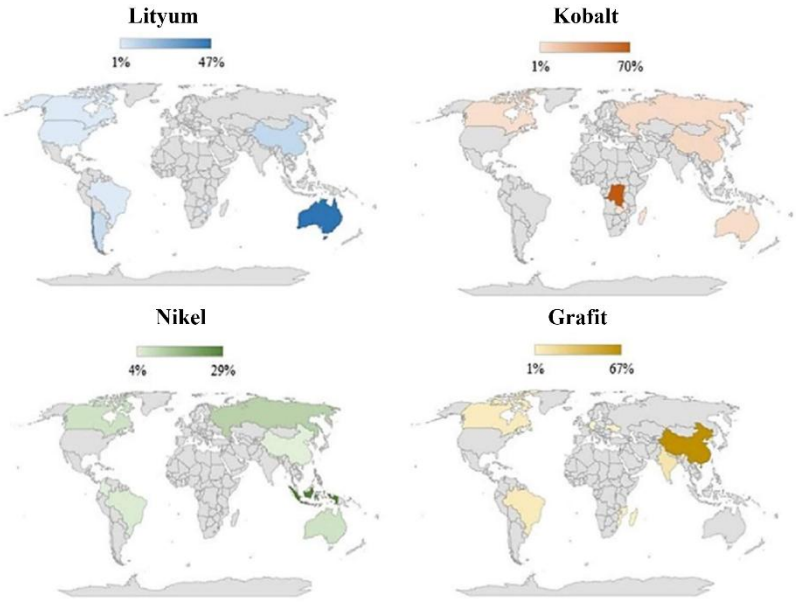
Elektrikli araç bataryalarının üretimi için kritik öneme sahip lityum, kobalt, nikel, manganez ve grafit gibi hammaddelerin arzı, coğrafi ve jeopolitik risklere bağlı olarak kırılganlık taşımaktadır. Bu durum, tedarik zincirlerinin sürdürülebilirliğinin ekonomik, etik ve çevresel boyutlarda değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Ayrıca, kritik hammaddelerin geri dönüşümü, döngüsel ekonomi açısından büyük önem taşımaktadır (Harper ve ark., 2019; IRENA, 2022; World Bank, 2020).

2.1.7.1. Kritik Hammaddelerin Coğrafi Yoğunluğu

Elektrikli araç bataryalarının temel bileşenlerini oluşturan lityum, kobalt, nikel ve grafit gibi hammaddelerin küresel arzı, sınırlı sayıda ülkeye coğrafi olarak yoğunlaşmış durumdadır. Bu durum, tedarik zincirlerinin planlanması ve sürdürülebilirliği açısından dikkate alınması gereken stratejik bir unsur hâline gelmektedir.

Örneğin, küresel kobalt üretiminin yaklaşık %70'i Kongo Demokratik Cumhuriyeti tarafından karşılanmakta; bu ülke, kobalt madenciliğinde açık ara lider konumdadır. Lityum üretiminde ise Avustralya, %47 ile en büyük paya sahiptir; onu Şili ve Çin takip etmektedir. Nikel üretiminde Endonezya, %29 ile öne çıkarken; Filipinler ve Rusya gibi ülkeler de önemli üreticiler arasında yer almaktadır. Grafit üretiminde ise Çin, %67 ile küresel arzın büyük kısmını sağlamaktadır.

Bu tür coğrafi yoğunlaşmalar, doğal kaynaklara dayalı üretim süreçlerinin belirli bölgelerde merkezileşmesine neden olmakta; jeopolitik gelişmeler, ticaret politikaları veya çevresel sınırlamalar gibi dışsal faktörler karşısında tedarik zincirlerinde esneklik ihtiyacını artırmaktadır. Elektrikli araçlara yönelik artan küresel talep doğrultusunda, bu hammaddelere olan ihtiyaç da hızla yükselmekte ve bu eğilim, arz güvenliği ile kaynak çeşitlendirme politikalarının önemini artırmaktadır (IEA, 2022; Roskill, 2021; USGS, 2021).



Şekil 2.1.7.1. 2021 yılına ait lityum, kobalt, nikel ve grafit üretim dağılımı

Kaynak: P. ve Stampone, N., (2023)

2.1.7.2. Geri Dönüşümün Tedarik Zincirine Katkısı

Batarya geri dönüşüm süreçleri, özellikle lityum, kobalt ve nikel gibi metallerin yeniden kazanımı açısından büyük önem taşımaktadır. Geri kazanılan bu metallerin tekrar batarya üretiminde kullanılması hem çevresel etkiyi azaltmakta hem de yeni kaynak arayışını sınırlamaktadır (Gaines, 2014; Harper ve ark., 2019). Geri dönüşümle elde edilen ikincil metaller, stratejik arz risklerini dengeleyici bir unsur haline gelmektedir. (Gaines, 2018)

Gelişmiş ülkeler, 2030 sonrası batarya hammaddesi ihtiyacının %25–30'unun geri dönüşümden sağlanabileceğini öngörmektedir (IEA, 2022).

2.1.7.3. Alternatif Enerji Depolama Malzemeleri ve Teknolojileri

Kritik hammaddelere olan bağımlılığı azaltmak amacıyla alternatif batarya kimyaları geliştirilmektedir. Özellikle kobalt içeriği azaltılmış katotlar (örneğin LFP – Lityum Demir Fosfat) ve sodyum-iyon bataryalar, daha bol bulunan ve düşük maliyetli hammaddelerle sürdürülebilirlik avantajı sunmaktadır (Li ve ark., 2020). Sodyum-iyon bataryalar, lityumun sınırlı rezervlerine alternatif oluşturabilecek potansiyele sahiptir (Slater ve ark., 2013). Bu gelişmeler, tedarik zincirinde malzeme ikamesi yoluyla esneklik sağlamayı mümkün kılmaktadır.

Batarya teknolojileri dışında kalan bazı enerji depolama çözümleri de kritik hammadde bağımlılığını azaltma potansiyeli taşımaktadır. Bu kapsamda, elektroliz yoluyla üretilen yeşil hidrojen, özellikle uzun vadeli enerji depolama ve ağır sanayi uygulamalarında bataryalara tamamlayıcı bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (IRENA, 2022). Hidrojenin bu rolü, elektrikli araçlar ve enerji sistemlerinde kaynak çeşitliliği ile tedarik zinciri esnekliği açısından stratejik katkı sunmaktadır.

2.1.7.4. Tedarik Zinciri İzlenebilirliği ve Dijital Çözümler

Kritik hammadde tedarikinin etik, şeffaf ve denetlenebilir olması amacıyla dijital çözümler geliştirilmektedir. Özellikle blockchain tabanlı izleme sistemleri, bataryaların içerdiği metallerin kaynağını ve transfer geçmişini kayıt altına alarak sürdürülebilirlik denetimlerine katkı sunmaktadır (World Economic Forum, 2021). Bu kapsamda geliştirilen dijital batarya pasaportu, tedarik zinciri şeffaflığında yeni bir standart oluşturmayı hedeflemektedir (Battery Pass, 2023).

Avrupa Birliği Batarya Tüzüğü'ne göre, 2 kWh üzeri kapasiteye sahip elektrikli araç ve endüstriyel bataryalar için dijital batarya pasaportu taşıma zorunluluğu, 2025 itibariyle yürürlüğe girmiştir (Avrupa Komisyonu, 2023). Her batarya, QR kod aracılığıyla dijital pasaportuna erişim sağlayacak şekilde etiketlenmekte; bu pasaportta batarya içeriği, karbon ayak izi, geri dönüştürülmüş materyal oranı, kullanım ömrü ve teknik özellikler gibi bilgiler yer almaktadır (Battery Regulation, 2023).

Ayrıca, Avrupa Birliği'nin Döngüsel Ekonomi hedefleri doğrultusunda geliştirilen Dijital Ürün Pasaportu (DPP) uygulamaları, batarya dışı bileşenler ve diğer ürün grupları için de izlenebilirlik ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir araç sunmaktadır (European Environment Agency, 2022). Bu sistemler, özellikle Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında zorunlu hâle gelen çevresel raporlama süreçlerini kolaylaştırmakta ve üretici-tüketici arasında veri şeffaflığını artırmaktadır (Avrupa Komisyonu, 2020)

2.1.8. Batarya Tasarımındaki Yenilikler ve Geri Dönüşüme Etkileri

Batarya tasarımı yalnızca performans ve verimlilik açısından değil, aynı zamanda geri dönüşüm süreci üzerindeki etkisi açısından da büyük önem taşımaktadır. Geleneksel batarya tasarımlarında kullanılan farklı bileşenlerin ayrıştırılması oldukça zordur ve bu da mekanik ve kimyasal geri dönüşüm süreçlerinin verimliliğini azaltmaktadır (Harper ve ark., 2019) Bu nedenle, "dönüşüm için tasarım" ilkesi, yeni batarya teknolojilerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Örneğin, modüler batarya yapıları, geri söküm işlemlerini kolaylaştırmakta; bağlayıcı malzeme olarak kullanılan reçinelerin termal olarak kolayca ayrılabilir yapılarda tasarlanması, geri dönüşümü süreçlerini hızlandırmaktadır (Gaines, 2018) Ayrıca, bataryaların dijital pasaportlarla izlenmesi, içerdiği malzemelerin önceden bilinmesini ve doğru geri dönüşüm yönteminin seçilmesini mümkün kılmaktadır.

Batarya üreticilerinin, çevresel etkiyi azaltmak amacıyla daha az kobalt içeren veya tamamen kobaltsız yeni katot kimyası üzerine çalışmalar yürüttükleri görülmektedir. Bu da batarya tasarımı ile geri dönüşüm arasındaki ilişkinin giderek daha stratejik hâle geldiğini göstermektedir.

2.1.9. Yeni Nesil Bataryalar ve Geri Dönüşüm

Yeni nesil batarya teknolojileri, elektrikli araçların menzilini, güvenliğini ve çevresel performansını artırmayı hedeflemektedir. Ancak bu teknolojilerin geri dönüşümle uyumluluğu da en az teknik performansları kadar önemlidir. Katı hâl bataryalar, geleneksel sıvı elektrolitli bataryalara göre daha güvenli olmakla birlikte, geri dönüşüm süreçlerinde farklı işlem adımları gerektirmektedir (Janek ve Zeier, 2016)

Sodyum-iyon bataryalar**,** düşük maliyetli ve daha yaygın bulunabilir malzemelerle üretilebildiği için geri dönüşüm açısından daha sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Ayrıca, kobalt gibi kritik hammaddelere olan bağımlılığı azaltmaları bakımından stratejik avantaj sağlamaktadırlar (Li ve ark., 2020)

Yeni nesil teknolojilerin yaygınlaşması, geri dönüşüm altyapısının da bu teknolojilere uygun şekilde güncellenmesini gerektirir. Batarya türüne göre ayrıştırma, yeniden kullanım potansiyeli değerlendirme ve metal geri dönüşümü gibi süreçlerin optimize edilmesi, çevresel etkinin minimize edilmesi açısından gereklidir.

Bu bölümde batarya teknolojisinin temel bileşenleri ele alınmıştır. Bir sonraki bölümde bu teknolojilerin çevresel etkileri ve geri dönüşüm süreçleri değerlendirilecektir.

3. ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ ÇEVRESEL ETKİLERİ VE GERİ DÖNÜŞÜMÜ

Batarya geri dönüşümü, kullanım ömrünü tamamlamış ya da işlevini yitirmiş bataryaların içerisindeki değerli ve/veya çevreye zararlı bileşenlerin ayrıştırılarak yeniden kullanılabilir hale getirilmesini ifade eder. Bu süreç, lityum, kobalt, nikel ve kurşun gibi stratejik öneme sahip metallerin geri dönüşümünü sağlayarak hem ekonomik fayda üretmekte hem de çevresel etkileri azaltmaktadır (Gaines, 2014) Geri dönüşüm işlemi yalnızca kaynak verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda bataryaların düzensiz şekilde bertaraf edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek çevre ve insan sağlığı risklerini de minimize eder (Harper ve ark., 2019)

Giderek artan elektrikli araç kullanımıyla birlikte batarya atıklarının da önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir. Bu durum, döngüsel ekonomi yaklaşımı çerçevesinde etkin geri dönüşüm süreçlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Peters ve ark., 2021) Batarya geri kazanımı aşağıdaki temel aşamalardan oluşur:

- **Toplama:** Kullanım ömrü sona ermiş bataryaların güvenli biçimde toplanması ve geçici depolama alanlarına taşınması.
- **Sınıflandırma:** Bataryaların kimyasal yapısına ve türlerine (örneğin lityum-iyon, kurşun-asit, nikel-kadmiyum vb.) göre ayrılması.
- **Ayrıştırma:** Bataryaların mekanik olarak parçalanması, iç bileşenlerinin (elektrotlar, elektrolitler, metal folyo vb.) ayrıştırılması.
- **İşleme ve Yeniden Kullanım:** Ayrılan değerli malzemelerin pirometalurjik (yüksek sıcaklıkta ergitme), hidrometalurjik (asit çözeltisiyle çözme) ya da mekanik işlemlerle saflaştırılarak yeniden hammadde haline getirilmesi (Li ve ark., 2013)
- **Atık Yönetimi:** Geri kazanımı mümkün olmayan veya çevreye zarar verebilecek bileşenlerin mevzuata uygun şekilde bertaraf edilmesi.

Batarya geri kazanımı, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği değil, aynı zamanda kaynak güvenliğini de desteklemektedir. Özellikle Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri ve Çin gibi bölgelerde bu konuda kapsamlı düzenlemeler yapılmakta ve kapalı döngü sistemlerine geçiş teşvik edilmektedir (European Commission, 2020)

3.1. Batarya Atıklarının Çevresel ve İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri

Kullanım ömrünü tamamlamış bataryalar, içerdiği ağır metaller ve toksik maddeler nedeniyle çevre ve insan sağlığı açısından önemli riskler taşımaktadır. Bu atıkların uygun şekilde yönetilmemesi, toprak, su ve hava kalitesinin bozulmasına neden olarak ekosistemlerin dengesini olumsuz etkiler ve halk sağlığını tehdit eder (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018) . Batarya atıklarının kontrolsüz biçimde doğaya bırakılması, toksik maddelerin çevreye yayılması ve besin zincirine dahil olması sonucunda kalıcı sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Ayrıca, batarya atıkları yalnızca çevresel bir sorun olmamakla birlikte, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasında da önemli engeller oluşturur. Bu atıkların doğal ortamlarda birikmesi, doğal kaynakların tükenmesine, ekosistem bozulmalarına ve biyoçeşitliliğin azalmasına neden olarak toplumların uzun vadeli refahını riske atmaktadır.

Bataryalarda bulunan cıva, kurşun, kadmiyum, nikel, lityum ve kobalt gibi ağır metaller yüksek toksisiteye sahiptir ve çevrede uzun süre kalıcı olabilir. Örneğin, cıva su ekosistemlerinde metil cıva formuna dönüşerek sinir sistemine zarar verebilir (Saydaş Plastik, 2024). Kadmiyum, toprak ve yeraltı sularına karıştığında bitkiler aracılığıyla besin zincirine girer ve uzun vadede kanser riskini artırabilir (Malkara Belediyesi, 2023) Kurşun ise solunum ve sindirim yoluyla vücuda alındığında merkezi sinir sistemi, böbrek ve karaciğer gibi organlarda toksik etkiler yaratır (Saydaş Plastik, 2024) Bu toksik maddelerin birikimi, bireysel düzeyde hemen görülmese de toplumsal sağlık açısından önemli riskler barındırır. Bu nedenle, batarya atıklarının geri kazanımı, çevrenin yanı sıra halk sağlığını koruma açısından kritik öneme sahiptir.

Kontrolsüz şekilde doğaya bırakılan atık bataryalar, içerdiği ağır metallerin toprak ve su kaynaklarına sızmasına yol açar. Lityum, kurşun, kadmiyum ve cıva gibi elementlerin çevresel ortama yayılması, ekosistem ve insan sağlığını çok boyutlu şekilde tehdit eder (Malkara Belediyesi, 2023) Topraktaki metal birikimi tarımsal üretkenliği azaltırken, su kaynaklarının kirlenmesine ve ekolojik dengenin bozulmasına neden olur. Bu metaller, bitki ve hayvan dokuları aracılığıyla besin zincirine dahil olarak insan organizmasına kadar ulaşabilir (Mol-E, 2023). Literatürde, bu kontaminasyonların nörolojik bozukluklar, böbrek fonksiyon kayıpları ve bazı kanser türleriyle ilişkili olduğu belirtilmektedir (Mol-E, 2023; Malkara Belediyesi, 2023) Bu veriler, batarya atıklarının etkin yönetimi ve geri dönüşümünün önemini ortaya koymaktadır. Uygun yönetilmeyen batarya atıkları, kısa vadede fark edilmese de uzun vadede çevresel ve sağlık açısından kalıcı zararlar doğurabilir.

Bu doğrultuda, batarya atıklarının yönetimi, çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirmek amacıyla bütünleşmiş ve sürdürülebilir yaklaşımlar çerçevesinde ele alınmalıdır. Atıkların uygun şekilde toplanması, taşınması, sınıflandırılması ve geri kazanım teknolojilerine tabi tutulması, çevresel kirliliğin önlenmesi ve döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda kaynak verimliliğinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Etkin bir batarya atığı yönetimi, çevresel sürdürülebilirliğin yanı sıra toplumsal ve ekonomik faydalar da sağlamaktadır; ancak bu sürecin başarıyla işlemesi endüstri ve toplumun bilinçli iş birliğine bağlıdır.

Elektrikli araç bataryalarının geri kazanım süreçleri, döngüsel ekonomi açısından fayda sağlarken, aynı zamanda çevresel etkiler de yaratmaktadır. Bu etkiler arasında en

önemlilerinden biri karbon ayak izidir. Karbon ayak izi, bir ürün ya da sürecin doğrudan ve dolaylı olarak neden olduğu sera gazı emisyonlarının karbondioksit eşdeğeri (CO_2-eq) cinsinden ölçümüdür ve iklim değişikliğine katkıda bulunan tüm sera gazlarını kapsamaktadır (Wiedmann ve Minx, 2008) Elektrikli araç bataryalarının geri kazanımında kullanılan teknolojiler, süreç boyunca enerji tüketimi, kimyasal kullanımı ve lojistik faaliyetlerin yoğunluğuna bağlı olarak karbon emisyonları üretmektedir (Dunn ve ark., 2012; Peters ve ark., 2021)

Batarya geri kazanımı; pirometalurjik, hidrometalurjik ve doğrudan geri kazanım yöntemleri olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır. Pirometalurjik yöntemler, yüksek sıcaklıklarda eritme esasına dayandığından fosil yakıt tüketimi nedeniyle yüksek karbon emisyonu oluşturur (Dunn ve ark., 2012). Örneğin, pirometalurjik işlemle 1 kWh kapasiteli bataryanın geri dönüşümü sırasında yaklaşık 8–10 kg CO_2 eşdeğeri emisyon oluşmaktadır (Peters ve ark., 2021). Bu yöntem nikel, kobalt ve bakır gibi metallerin geri kazanımında etkin olmasına karşın, lityum gibi hafif metallerin geri kazanımında sınırlı kalmaktadır (Georgi-Maschler ve ark., 2012).

Hidrometalurjik yöntemler, kimyasal çözeltiler kullanarak metallerin seçici ayrıştırılması ve geri kazanımını sağlar. Düşük sıcaklıklarda çalıştığı için enerji tüketimi ve karbon ayak izi pirometalurjik yöntemlere göre daha düşüktür. Ortalama karbon salımı 3–5 kg CO_2-eq/kWh arasında değişmekte olup, lityum ve alüminyum gibi hafif metallerin verimli geri kazanımını mümkün kılar (Lv ve ark., 2022; Wang ve ark., 2021)

Doğrudan geri dönüşüm yöntemleri ise, aktif elektrot malzemelerinin yapısını bozmadan yeniden kullanıma sunulmasını hedeflemektedir. Bu yöntem, yüksek sıcaklık veya agresif kimyasal kullanımı gerektirmediği için enerji tüketimi ve karbon salımı açısından oldukça avantajlıdır (Xu ve ark., 2020; Yang ve ark., 2021). Özellikle lityum demir fosfat (LFP), nikel kobalt manganez (NCM) ve nikel kobalt alüminyum (NCA) gibi hücre tiplerinde uygulanabilen doğrudan geri kazanım hem birincil hammadde ihtiyacını azaltmakta hem de çevresel etkiyi en aza indirmektedir. Literatürde, bu yöntemin karbon ayak izi açısından diğer yöntemlere kıyasla 5 ila 10 kat daha düşük emisyon ürettiği belirtilmektedir (Li ve ark., 2022).

Geri kazanım süreçlerinde kullanılan enerji kaynağının türü, toplam karbon ayak izi üzerinde doğrudan belirleyici bir etkiye sahiptir. Fosil yakıt temelli enerjiyle çalışan geri dönüşüm tesislerinde sera gazı emisyonları yüksek seviyelerde gerçekleşirken, yenilenebilir enerji

kaynaklarının kullanımı bu çevresel etkiyi önemli ölçüde azaltabilmektedir (Tsiropoulos ve ark., 2018). Bu durum, geri dönüşüm teknolojilerinin çevresel sürdürülebilirliğini değerlendirirken enerji altyapısının dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Ayrıca, geri kazanılan metallerin yeni batarya üretiminde kullanılması, birincil hammadde çıkarımına olan bağımlılığı azaltarak dolaylı emisyonların düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle geri kazanılmış lityumun, madencilik yoluyla elde edilen lityuma kıyasla karbon ayak izi açısından 3 ila 10 kat daha düşük çevresel etki yarattığı raporlanmıştır (Gaines ve ark., 2014). Bu bulgular, döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda batarya geri dönüşümünün yalnızca atık yönetimi değil, aynı zamanda iklim değişikliğiyle mücadelede stratejik bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, elektrikli araç bataryalarının geri kazanımında kullanılan teknolojilerin çevresel performansı ve karbon ayak izleri göz önünde bulundurularak, daha sürdürülebilir ve düşük emisyonlu yöntemlerin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Yöntem	Karbon Salımı	Enerji Tüketimi	Çevresel Etki	Avantajları	Dezavantajları
Doğrudan Geri Dönüşüm	Çok Düşük	Çok Düşük	Çok düşük – kimyasal kullanılmaz	Malzemeyi yeniden kullanmak için en çevreci yöntemdir	Yalnızca hasarsız yapılarda uygulanabilir.
Pirometalurjik	Yüksek	Yüksek (yüksek sıcaklık)	Yüksek – CO_2 ve toksik gaz salımı (SOx, NOx)	Hızlı, her tür atık için uygulanabilir	Yüksek enerji, yüksek karbon salımı, hava kirliliği riski vardır.
Hidrometalurjik	Orta	Orta	Orta – asidik / kimyasal atık oluşturabilir	Seçici metal kazanımı, düşük sıcaklık	Kimyasal atık arıtımı gerekir, çevresel risk taşıyabilir.

Tablo 3.1. Doğrudan Geri Dönüşüm, Pirometalurjik ve Hidrometalurjik Yöntemlerin Karbon Salımı ve Çevresel Etki Karşılaştırması

(Veriler, Li ve ark., 2015 ve Georgi-Maschler ve ark., 2012 çalışmalarından uyarlanmıştır.)

3.2. Geri Dönüşüm Yöntemleri ve Verimlilik Analizi

Batarya geri dönüşüm yöntemleri, doğal kaynakların korunması ve ekonomik değer yaratılması açısından kritik bir role sahiptir. Bu yöntemlerin verimliliği ve çevresel etkileri değerlendirilirken, kritik hammaddelerin sürdürülebilir kullanımı büyük önem taşımaktadır.

3.2.1. Pirometalurjik Süreçler (Yüksek Sıcaklıkta Geri Dönüşüm)

Pirometalurjik yöntemler, metallerin yüksek sıcaklıklarda eritilerek geri kazanılmasını sağlayan bir süreçtir (Eskici, 2016) Lityum-iyon bataryalar gibi karmaşık yapılı bataryaların geri dönüşümünde yaygın olarak kullanılan bu yöntem, metallerin ayrıştırılmasında etkilidir (Gaines, 2014) Ancak, pirometalurjik yöntemlerin en büyük zorlukları, yüksek enerji tüketimi ve çevresel açıdan sera gazı emisyonlarının artmasıdır (Harper ve ark., 2019) Bu süreçler, geri dönüşümün maliyetlerini artırmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı zorlaştırır. Ayrıca, bazı değerli metallerin kaybı yaşanabilir ve pirometalurjik süreç sonrası ortaya çıkan cürufun bertarafı, ek çevresel sorunlara yol açabilir (Eskici, 2016)

Pirometalurjik süreçlerin çevresel etkilerini ve maliyetlerini göz önünde bulundurursak, bu yöntemlerin sürdürülebilirliği daha fazla sorgulanmaya başlanmaktadır. Bu tür yöntemlerin daha çevre dostu hale gelmesi, geri dönüşümün etkinliğini artırmak için kritik öneme sahiptir. Özellikle, daha düşük enerji tüketimine sahip alternatif teknolojilerin geliştirilmesi, pirometalurjik işlemlerin daha verimli ve çevre dostu hale gelmesini sağlayacaktır.

3.2.2. Hidrometalurjik Süreçler (Kimyasal Çözme Yöntemleri)

Hidrometalurjik yöntemler, metallerin asitler veya bazlar gibi kimyasal çözücülerle çözündürülerek geri kazanılmasını sağlayan bir süreçtir (Özdemir & Şahin, 2021). Bu yöntem, özellikle lityum-iyon bataryaların geri dönüşümünde düşük enerji tüketimi ve yüksek geri kazanım oranları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir (Espinosa ve ark., 2004). Lityum ve kobalt gibi stratejik öneme sahip metallerin geri kazanımında hidrometalurjik süreçler oldukça etkili sonuçlar verebilmektedir (Xiao ve ark., 2017).

Ancak bu yöntemlerin çevresel sürdürülebilirliği, kullanılan kimyasal çözücüler ve ortaya çıkan atık suyun yönetimi açısından dikkatli bir değerlendirme gerektirir. Wang ve diğerlerinin (2020) çalışmasında da vurgulandığı üzere, bu süreçler çevresel riskler barındırmakta ve etkin

bir atık su arıtma altyapısı gerektirmektedir. Bu nedenle, daha çevre dostu çözücülerin geliştirilmesi ve ileri düzey atık su arıtma teknolojilerinin entegrasyonu, hidrometalurjik yöntemlerin sürdürülebilirliğini artırmak açısından kritik öneme sahiptir.

Pirometalurjik yöntemlere kıyasla daha düşük enerji tüketimi ve daha yüksek metal geri kazanım verimi sunan hidrometalurjik süreçler, döngüsel ekonomi hedefleri doğrultusunda daha avantajlı bir geri dönüşüm stratejisi olarak değerlendirilmektedir.

3.2.3. Doğrudan Geri Dönüşüm Teknikleri

Doğrudan geri dönüşüm teknikleri, malzemeleri kimyasal olarak çözündürmeden veya yüksek sıcaklıklarda işlemden geçirmeden doğrudan tekrar kullanılabilir hale getirmeyi amaçlar (Gaines, 2014) Bu yöntem, özellikle lityum-iyon bataryaların katot malzemelerinin yeniden işlenmesi için geliştirilmiştir (Xiao ve ark., 2017) Doğrudan geri dönüşüm, enerji tüketimi açısından oldukça avantajlıdır ve minimal çevresel etkiye sahiptir (Yang ve diğerleri, 2018). Ancak, karmaşık batarya bileşimlerinde ve bozunmuş malzemelerde sınırlı etkililik göstermektedir (Gaines, 2014)

Doğrudan geri dönüşümün sağladığı avantajlar, enerji verimliliği ve çevresel etkilerin minimize edilmesi açısından oldukça önemlidir. Ancak, bu yöntem karmaşık batarya yapıları için sınırlı etki gösteriyor. Bu nedenle, bu yöntemin daha esnek hale gelmesi ve daha karmaşık bataryaların geri dönüşümünde daha verimli hale getirilmesi büyük önem taşımaktadır. Gelecekte, doğrudan geri dönüşüm yöntemlerinin daha fazla iyileştirilmesi, çevresel etkileri daha da azaltabilir.

Kriter	Pirometalurjik Süreçler	Hidrometalurjik Süreçler	Doğrudan Geri Dönüşüm Teknikleri
Enerji Tüketimi	Yüksek	Düşük	Çok Düşük
Maliyet	Yüksek	Orta	Düşük
Çevresel Etki	Yüksek	Orta	Düşük
Geri Kazanım Oranı	Yüksek	Yüksek	Orta

Tablo 3.2.3. Geri dönüşüm yöntemleri ve verimlilik analizi

(Veriler, Eskici, 2016; Espinosa ve ark., 2004; Gaines, 2014; Harper et al., 2019; Li et al., 2018; Özdemir ve Şahin, 2021; Wang ve ark., 2020; Xiao ve ark., 2017; Yang ve ark.., 2018 çalışmalarından uyarlanmıştır)

3.2.4. Mevcut Geri Dönüşüm Tesisleri ve Kapasiteleri

Türkiye'de batarya geri dönüşümüne yönelik altyapının gelişiminde önemli bir adım, 2017 yılında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) iş birliğiyle Kocaeli'nde kurulan bir geri kazanım tesisinin faaliyete geçmesidir. Bu tesis, batarya geri dönüşümünün teknik olarak uygulanabilirliğini gösteren erken örneklerden biri olarak çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir rol üstlenmiştir (Tübitak Mam, 2017).

Elektrikli araç bataryalarının geri kazanımı; lityum, nikel, kobalt gibi kritik malzemelerin ayrıştırılmasını, yüksek sıcaklıkta işlem görmesini ve izlenebilirlik esaslı beyan sistemlerinin kurulmasını gerektirmektedir. Bu doğrultuda, Türkiye'de elektrikli araç bataryalarına özel, endüstriyel ölçekli tesislerin geliştirilmesi; AB Batarya Yönetmeliği'ne uyum ve döngüsel ekonomi hedefleri açısından stratejik önem taşımaktadır.

3.2.5. Türkiye'de Geri Kazanım Oranları ve Çevresel Etkileri

Türkiye'de batarya geri kazanım oranları, özellikle Avrupa ülkelerine kıyasla oldukça düşüktür. 2022 yılı itibarıyla, Türkiye'de toplanan atık bataryaların geri kazanım oranı %5-10 arasında gerçekleşmiştir (TAP, 2023) Bu oran, batarya geri dönüşümünde ciddi bir potansiyelin olduğu ancak mevcut süreçlerin henüz yeterince etkin bir şekilde uygulanmadığını göstermektedir. Avrupa'daki yüksek geri kazanım oranları, Türkiye için bir model teşkil edebilir, ancak bunun için sadece teknoloji değil, aynı zamanda toplumsal farkındalık ve eğitim de gerekmektedir.

Atık bataryaların içeriğinde bulunan lityum, nikel ve kobalt gibi stratejik metallerin geri kazanımı, doğal kaynakların korunması ve ekonomik değer yaratılması açısından kritik öneme sahiptir (Espinosa ve ark., 2004) Bu metallerin geri kazanılması hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de ülkenin döngüsel ekonomi hedeflerine katkı sağlayacaktır. Ancak, bu metallerin geri kazanımı sırasında kadmiyum (Cd) ve lityum (Li) gibi toksik maddelerin çevreye yayılması riski de mevcuttur (Wang ve ark., 2020) Bu kimyasallar, ekosistem üzerinde toksik etkiler yaratırken, insan sağlığı açısından da ciddi tehditler oluşturabilir (Zeng ve diğerleri, 2014) Türkiye'nin bu sorunu aşabilmesi için, geri dönüşüm süreçlerinin daha dikkatli yönetilmesi ve kullanılan teknolojilerin çevre dostu olması gerekmektedir.

Türkiye'de lityum-iyon bataryaların geri kazanımı, madenciliğe göre %81 daha çevre dostu olup, enerji tüketimini %77 ila %89, su tüketimini ise %72 ila %88 oranında azaltmaktadır (Yeşil haber, 2024). Bu veriler, batarya geri dönüşümünün çevresel etkilerinin madenciliğe

kıyasla ne kadar az olduğunu göstermektedir. Lityum-iyon bataryaların geri kazanımı, doğal kaynakların korunmasına da katkı sağlar, çünkü bu bataryaların üretimi sırasında büyük miktarda enerji ve su tüketimi söz konusu olmaktadır. Bu, geri dönüşümün hem çevre hem de ekonomik açıdan faydalı bir alternatif olduğunu gösteriyor. Bu noktada Türkiye'nin batarya geri dönüşümünü teşvik eden politikalar geliştirmesi, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayabilir.

Stratejik Değerlendirme

Türkiye'deki batarya geri dönüşüm süreçlerinin stratejik olarak değerlendirilmesi amacıyla SWOT analizi uygulanmıştır. Bu yöntem, mevcut altyapının güçlü ve zayıf yönlerini belirlemenin yanı sıra, çevresel tehditleri ve mevzuat temelli fırsatları sistematik biçimde ortaya koyarak politika geliştirme ve teknolojik yatırım kararlarına yön verebilir (Zhu ve Chen, 2018; Sithoumphalath, 2024)

Kategori	Açıklama
Güçlü Yönler	• Mevcut tesis altyapısının oluşmaya başlaması) • Lityum-iyon bataryaların geri dönüşümünün madenciliğe göre %81 daha çevre dostu olması • Enerji ve su tüketiminde ciddi azalma (%77–89 enerji, %72–88 su)
Zayıf Yönler	• Geri kazanım oranlarının düşük olması (%5–10) • Toplumsal farkındalık ve eğitim eksikliği • Toksik maddelerin çevresel ve sağlık riskleri (Cd, Li) • Mevzuatın uygulama ve denetim eksiklikleri
Fırsatlar	• AB geri dönüşüm modellerinden faydalanma • Döngüsel ekonomi hedeflerine katkı • Stratejik metallerin (Li, Ni, Co) geri kazanımıyla ekonomik değer yaratımı • Çevre dostu teknolojilerin entegrasyonu
Tehditler	• Toksik kimyasalların ekosistem ve insan sağlığı üzerindeki etkileri • Geri dönüşüm süreçlerinin yetersiz yönetimi • Yatırım eksikliği ve teknolojik geri kalmışlık • Sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşamama riski

Tablo 3.2.5. SWOT Analizi: Türkiye'de elektrikli araç bataryalarının geri dönüşümü

(Veriler, TÜBİTAK MAM, 2017; Wang et al., 2020; Zeng et al., 2014; Gaines, 2014; Espinosa et al., 2004; Zhu & Chen, 2018; Sithoumphalath, 2024; Guo et al., 2022 çalışmalarından uyarlanmıştır)

3.2.5.1. Türkiye'de Geri Kazanım Süreçlerinin Geleceği ve Öneriler

Elektrikli araç bataryalarının sürdürülebilir yönetimi, mevcut teknolojilerin ötesinde; stratejik yatırımlar, AB uyumlu mevzuat, toplumsal bilinç ve ekonomik teşviklerin bir arada değerlendirildiği bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir. Türkiye'de geri dönüşüm oranlarının artırılması için öncelikle altyapının modernizasyonu, stratejik bölgelerde yeni tesislerin kurulması ve bölgesel toplama noktalarının yaygınlaştırılması hayati önemdedir (Yeşiltepe ve Sesen, 2018). Bu bağlamda, kamu–özel sektör iş birliklerinin teşviki, finansal etkinlik ve sektörel kapasitenin geliştirilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Teknoloji boyutunda, özellikle doğrudan geri dönüşüm yöntemleri; batarya malzemelerinin mekanik ve kimyasal ayrıştırılması yoluyla enerji tüketimini ve çevresel etkileri önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Chen ve ark. (2020) ile Li ve ark. (2021), bu yöntemlerin katot malzemelerinin yüksek saflıkta geri kazanımında ticari uygulanabilirlik sunduğunu ortaya koymuş; ayrıca pirometalurjik ve hidrometalurjik proseslere kıyasla daha düşük karbon ayak izi ve maliyet avantajlarına sahip olduğunu göstermişlerdir.

Mevzuat açısından Türkiye, AB'nin Regülasyon (EU) 2023/1542'ye uyum sağlayarak kapsamlı bir geri dönüşüm ve izlenebilirlik sistemi kurma potansiyeline sahiptir. Bu regülasyon, 18 Şubat 2024'te yürürlüğe girmiş olup; portatif bataryalarda %63'lük toplama hedefini 2027'ye, %73'ü 2030'a; hafif ulaşım araçlarında (Light Means of Transport – LMT) ise %51'i 2028'e ve %61'i 2031'e kadar yükseltilmesini öngörmektedir. Ayrıca kobalt, kurşun, nikel ve lityum için 2027–2028 itibarıyla %90–95 oranında geri kazanım hedefleri belirlenmiştir (Avrupa Parlamentosu ve Konsey, 2023).

Toplumsal farkındalık açısından, geri dönüşüm zincirinin başarısı geniş halk katılımına bağlıdır. Kamuya yönelik eğitim kampanyaları ve okul müfredatına geri dönüşüm konularının entegrasyonu; bataryaların doğru ayrıştırılmasını, toplanmasını ve çevresel etkilerin azaltılmasını kolaylaştıracaktır.

Son olarak, ekonomik teşvik mekanizmaları vergi indirimleri, düşük faizli krediler ve yeşil finansman geri dönüşüm alanındaki yatırımları artırabilir. Türkiye, Avrupa Yeşil Mutabakat kaynaklarından yararlanarak sektördeki rekabet gücünü ve sürdürülebilirlik kapasitesini geliştirme potansiyeline sahiptir.

3.2.5.2. Uluslararası İş Birlikleri ve İyi Uygulama Örneklerinden Yararlanma

Avrupa ülkelerinde başarıyla uygulanan batarya geri dönüşüm sistemlerinin incelenmesi, Türkiye'deki süreçlerin etkinliğini artırma potansiyeli taşımaktadır. Özellikle üretici sorumluluğu ilkesi, gelişmiş toplama stratejileri ve ileri geri kazanım teknolojileri, bu alanda örnek teşkil eden uygulamalar arasında yer almaktadır. Almanya, Hollanda ve İsveç gibi ülkelerde geliştirilen bütüncül yaklaşımlar; mevzuat, altyapı ve tüketici farkındalığı boyutlarında dikkat çekici sonuçlar üretmiştir (OECD, 2016). Türkiye'nin bu deneyimlerden faydalanabilmesi için uluslararası iş birliklerine açık olması ve bilgi paylaşımına dayalı platformlarda aktif rol üstlenmesi önem arz etmektedir.

Strateji Alanı	Öneri	Amaç / Hedef
Altyapı ve Lojistik	Yeni tesislerin kurulması, mevcut tesislerin modernizasyonu	Toplama ve işleme kapasitesinin artırılması
Teknolojik Gelişim ve Ar-Ge	Hidrometalurjik ve doğrudan geri dönüşüm teknolojilerine yatırım	Enerji verimliliği sağlamak ve çevresel etkiyi azaltmak
Mevzuat ve Uyum	AB Batarya Direktifi 'ne uygun ulusal mevzuat geliştirilmesi	Yasal netlik sağlamak, üretici sorumluluğunu artırmak
Toplumsal Farkındalık	Eğitim kampanyaları, yerel yönetim iş birlikleri	Atıkların doğru toplanması ve ayrıştırılması
Ekonomik Teşvikler ve Finansman	Vergi indirimi, düşük faizli kredi, yeşil finans kaynaklarının kullanımı	Özel sektör yatırımlarını teşvik etmek
Uluslararası İş Birlikleri ve Transfer	Avrupa'daki iyi uygulama örneklerinin uyarlanması	Türkiye'nin kurumsal ve teknik kapasitesini geliştirmek

Tablo 3.2.5.2. Türkiye'de batarya geri kazanım süreçlerinin geleceği için stratejik öneriler

(Veriler, European Parliament and Council (2023); Gaines, 2014; Harper ve ark., 2019; Wang ve ark., 2020; Tübitak MAM, 2017 çalışmalarından uyarlanmıştır).

3.3. Dünya Genelindeki Uygulamalar

Elektrikli araç bataryalarının geri kazanımı, sürdürülebilirlik ve çevresel etkilerin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Almanya, Çin, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) gibi ülkeler, bu alanda çeşitli politikalar ve uygulamalar geliştirmiştir. Aşağıda, bu ülkelerdeki batarya geri kazanım politikaları ve uygulamaları detaylı bir şekilde incelenmektedir.

3.3.1. Almanya'da Batarya Geri Dönüşüm Uygulamaları

Almanya, Avrupa Birliği'nin çevre politikalarının şekillendirilmesinde öncü bir ülke olarak, elektrikli araç bataryalarının geri kazanımı konusunda da kapsamlı ve yenilikçi uygulamalar geliştirmiştir. Bu çerçevede Almanya, 2006/66/EC sayılı Batarya Direktifi' nin yerini alan ve 18 Ağustos 2023 tarihinde yürürlüğe giren Regulation (EU) 2023/1542 kapsamında yasal ve kurumsal düzenlemelerini güncelleyerek, batarya geri dönüşümünü döngüsel ekonomi hedeflerinin merkezine yerleştirmiştir. Yeni Tüzük, bataryaların tüm yaşam döngüsünü düzenleyen bağlayıcı hükümler içerdiğinden, Almanya'da üreticilerden geri dönüşüm tesislerine kadar tüm paydaşlar üzerinde etkili reformlar yaratmıştır (Avrupa Parlamentosu ve Konsey, 2023/1542, madde 1–4)

Regülasyon kapsamında Almanya, elektrikli araç bataryalarının çevresel etkilerini azaltmak amacıyla karbon ayak izi raporlama, geri dönüştürülmüş içerik zorunlulukları, ürün pasaportu ve asgari geri kazanım oranları gibi hükümlere uyum sağlamak için hem mevzuat hem de altyapı düzeyinde kapsamlı önlemler almıştır. Özellikle 2027 itibarıyla bataryaların belirli oranlarda geri dönüştürülmüş kobalt (%16), lityum (%6) ve nikel (%6) içermesi zorunlu hale gelecek; 2031'de bu oranlar daha da artırılacaktır (Avrupa Parlamentosu ve Konsey, 2023/1542, madde 8, 70–72). Bu bağlamda Almanya, geri dönüşüm sektörünü güçlendirmek amacıyla yeni yatırımlara yönelmiştir.

Bu çerçevede Almanya'da, 2023 yılında Baden-Württemberg eyaletinde kurulan yıllık 2.500 ton kapasiteli bir geri dönüşüm tesisi, kapalı döngü modelinin sanayiye entegrasyonuna örnek teşkil etmektedir. Tesiste lityum, nikel ve kobalt gibi değerli metallerin geri kazanımıyla elde edilen hammaddeler, doğrudan yeni batarya üretiminde kullanılmaktadır. Bu uygulama, Regulation (EU) 2023/1542 kapsamında tanımlanan "kapalı döngü" sisteminin sahadaki yansıması olarak değerlendirilmektedir (Avrupa Parlamentosu ve Konsey, 2023).

Ayrıca Almanya'da üretici sorumluluğu ilkesi doğrultusunda, batarya üreticileri yalnızca satış öncesi değil, kullanım sonrası süreçlerde de aktif rol üstlenmek zorundadır. Alman Federal Çevre Ajansı (UBA), bu kapsamda üretici kayıt sistemini güçlendirmiş; piyasaya sürülen bataryaların izlenmesini sağlayacak dijital sistemlerin, yani ürün pasaportlarının geliştirilmesine öncülük etmiştir (Schmid ve ark., 2023) Bu sayede her bataryanın kimyasal içeriği, karbon ayak izi ve geri kazanım geçmişi dijital olarak takip edilebilir hale gelmiş, bu da Tüzük 'ün şeffaflık ve sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu bir yapı oluşturmuştur.

Regülasyon aynı zamanda toplama hedefleri de getirmektedir. Almanya bu doğrultuda, yerel yönetimler ve özel sektör iş birlikleriyle batarya atıklarının evsel atıklardan ayrıştırılmasını sağlayan yaygın toplama noktaları kurmuş, tüketici farkındalığını artırmaya yönelik eğitim kampanyaları düzenlemiştir. Özellikle elektrikli araç bataryaları gibi büyük boyutlu atıklar için lisanslı toplama ve taşıma sistemleri geliştirilmektedir. Bu sistemler, bataryaların çevreye zarar vermeden taşınmasını ve güvenli koşullarda geri dönüşüme kazandırılmasını sağlamaktadır.

Ek olarak Almanya, batarya tedarik zincirinde sosyal sorumluluk standartlarını da ön planda tutmaktadır. Tüzük uyarınca, hammaddelerin sürdürülebilir ve etik kaynaklardan sağlanması zorunlu hale geldiğinden, Almanya'da üreticiler çocuk işçiliği, zorla çalıştırma ve insan hakları ihlallerine karşı detaylı beyanlarda bulunmakta ve denetim mekanizmaları kurmaktadır (Avrupa Parlamentosu ve Konsey, 2023/851, madde 39–45).

Diğer taraftan, batarya teknolojilerinin gelişimini desteklemek amacıyla Fraunhofer Enstitüsü ve Helmholtz Topluluğu gibi araştırma merkezleri aracılığıyla Ar-Ge projelerine kamu fonları tahsis edilmektedir. Bu projelerde pirometalurjik, hidrometalurjik ve doğrudan geri dönüşüm yöntemlerinin etkinliği karşılaştırılmakta, süreç optimizasyonları yapılmaktadır (Schmid ve ark., 2023)

Son olarak, Almanya Ekonomi Bakanı Robert Habeck, elektrikli araçlara olan talebi artırmak amacıyla vergi teşvikleri ve şarj altyapısı yatırımlarını hızlandırma çağrısında bulunmuştur. Bu yaklaşım, elektrikli araç kullanımını teşvik ederken aynı zamanda uzun vadede batarya geri kazanım hacmini de artırmaktadır (Taxi Heute, 2023)

Tüm bu gelişmeler ışığında Almanya, sadece Avrupa Birliği müktesebatına uyum sağlayan bir üye devlet olmanın ötesine geçerek, batarya geri kazanımında teknoloji, çevre ve toplumsal sorumluluk ekseninde bütüncül ve öncü bir model oluşturmaktadır.

3.3.2. Çin'de Batarya Geri Kazanım Uygulamaları

Çin, elektrikli araç bataryalarının geri dönüşümünde küresel ölçekte lider konumundadır ve bu alanda kapsamlı mevzuat ile uygulamalar geliştirmiştir. 2018 yılında yayımlanan Yeni Enerji Araçları Batarya Geri Dönüşüm Yönetmeliği ile batarya üreticilerine ve geri dönüşüm şirketlerine yasal sorumluluklar yüklenmiş; bataryaların belirli oranlarda geri kazanılması ve çevre dostu yöntemlerle işlenmesi zorunlu hale getirilmiştir (MIIT, 2018).

Geri dönüşüm süreçlerinin etkin biçimde denetlenebilmesi amacıyla merkezi bir veri tabanı oluşturulmuş; üretici ve geri dönüşüm firmalarının faaliyetleri bu sistem üzerinden izlenmektedir (Xu ve ark., 2020). Çin'de benimsenen hibrit model, üreticiler ile geri dönüşüm şirketlerinin ortak sorumluluk üstlenmesini öngörmektedir. Bu kapsamda üreticiler, geri kazanımı kolaylaştıracak şekilde batarya tasarımı yaparken; geri dönüşüm şirketleri toplama ve işleme süreçlerinde aktif rol almaktadır (Zhou ve ark., 2021).

Yerel yönetimlerin sürece dahil edilmesiyle şehir bazlı geri dönüşüm stratejileri geliştirilmiş; toplama oranlarını artırmak amacıyla halkı bilinçlendirmeye yönelik kampanyalar düzenlenmiştir (Liu ve ark., 2021). Aynı zamanda Çinli firmalar, doğrudan geri dönüşüm yöntemlerinin yaygınlaştırılması ve maliyetlerin düşürülmesi amacıyla Ar-Ge yatırımlarına ağırlık vermektedir (Xu ve ark., 2020). Gelişen teknolojiler sayesinde batarya bileşenleri daha yüksek verimlilikle geri kazanılmakta, çevresel etkiler azaltılmaktadır (Yuan ve ark., 2022).

Çin'in geri dönüşüm stratejileri, büyük tesislerin yanı sıra küçük ölçekli birimlerin de sürece dahil edilmesini sağlayarak sistemin her aşamasında verimlilik yaratmaktadır. Ayrıca uluslararası iş birlikleriyle geri dönüşüm teknolojilerinin küresel standartlara ulaşması hedeflenmekte; bu yaklaşım Çin'in elektrikli araç endüstrisindeki liderliğini pekiştirmektedir (Liu ve ark., 2021).

3.3.3. Amerika Birleşik Devletleri'nde Batarya Geri Kazanım Uygulamaları

Amerika Birleşik Devletleri, elektrikli araç bataryalarının geri kazanımı konusunda son yıllarda önemli adımlar atmış; kamu-özel sektör iş birliğini güçlendirerek geri dönüşüm kapasitesini artırmayı hedeflemiştir. Federal hükümet, Enflasyon Azaltma Yasası (IRA) kapsamında elektrikli araçlar için sunulan 3.750 dolarlık vergi kredisiyle, bataryalarda kullanılan kritik minerallerin belirli bir yüzdesinin ABD'de veya serbest ticaret anlaşması bulunan ülkelerde işlenmiş ya da geri dönüştürülmüş olmasını şart koşmaktadır. Bu oranın 2029 yılına kadar %80'e çıkarılması planlanmaktadır (Baker Donelson, 2023).

ABD Enerji Bakanlığı, batarya geri dönüşüm maliyetlerini azaltmak ve teknolojik gelişmeleri desteklemek amacıyla 37 milyon dolarlık bir fon sağlamıştır (ABD Enerji Bakanlığı, 2023a) Bu yatırımlar, bataryaların taşınması, sökülmesi ve işlenmesinde daha ekonomik yöntemlerin geliştirilmesini amaçlamaktadır. 2023 yılı itibarıyla sekiz projeye toplamda 44,8 milyon dolar

değerinde destek sağlanmış; bu projelerle hem ikinci kullanım senaryolarının hem de geri dönüşüm süreçlerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir (ABD Enerji Bakanlığı, 2023b).

Özel sektör kuruluşları da bu alanda aktif rol üstlenmekte; geri dönüşüm tesisleri kurmak, kritik minerallerin geri kazanımını artırmak ve yeni batarya üretiminde bu malzemeleri kullanmak üzere çeşitli yatırımlar gerçekleştirmektedir (Time, 2024; Reuters, 2024). Bu yatırımlar, geri dönüşüm kapasitesinin artırılmasına ve döngüsel ekonomiye geçişin hızlandırılmasına katkı sağlamaktadır.

Enerji Bakanlığı tarafından desteklenen projeler arasında batarya ayırma, tehlikeli madde temizleme, otomatik sökme sistemleri ve batarya sağlığı değerlendirme teknolojileri gibi yenilikçi uygulamalar yer almaktadır (BIC Magazine, 2023). 2023 itibarıyla ABD'de yıllık yaklaşık 35.500 ton batarya malzemesi işleyebilecek kapasiteye sahip geri dönüşüm tesisleri bulunmakta olup, önümüzdeki 2–4 yıl içinde bu kapasitenin 76.000 ton daha artırılması planlanmaktadır (ABD Enerji Bakanlığı, 2024).

Eyalet düzeyinde ise özellikle Kaliforniya, batarya atık yönetimi konusunda öncülük yapmakta; lityum-iyon bataryalar için yeniden kullanım ve geri dönüşüm stratejileri geliştirmektedir (Energy Metal News, 2022). Tüm bu gelişmeler, ABD'nin elektrikli araç batarya geri kazanımı alanında hem çevresel sürdürülebilirliği sağlama hem de ekonomik bağımsızlığı güçlendirme yönündeki stratejik hedeflerini yansıtmaktadır.

3.3.4. Japonya'da Batarya Geri Kazanım Uygulamaları

Japonya, batarya atıklarının yönetimi ve geri dönüşümü konusunda dünya çapında önemli uygulamalara sahiptir. Batarya geri dönüşüm politikaları, Japonya'nın çevresel sürdürülebilirlik ve kaynak verimliliği hedefleri doğrultusunda şekillenmiş ve bu alandaki stratejiler, hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlamak amacıyla tasarlanmıştır (Asari et al., 2013) Japonya'daki geri dönüşüm sistemi, bataryaların toplanması ve geri kazanılması sürecinde yerel yönetimler ile özel sektörün iş birliğini teşvik eden kapsamlı bir yasal çerçeveye dayanmaktadır. Bu çerçeve, geri dönüşüm oranlarını artırmak için toplumsal ve teknik altyapıyı birlikte ele almaktadır (Asari ve ark., 2011)

Lityum-iyon bataryalar, taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara kadar geniş bir kullanım alanına sahip olup, bu bataryaların geri kazanımı, çevresel etkilerin azaltılmasının yanı sıra ekonomik kazançlar da sağlamaktadır. Ancak, Japonya'da kobalt, nikel ve lityum gibi

değerli metallerin geri kazanım oranları, geri dönüşüm altyapısının mevcut kapasitesinin ötesine geçememektedir. Yine de bu bataryaların geri dönüşüm süreçlerinin daha verimli hale getirilmesi amacıyla yeni teknolojilerin geliştirilmesi gerekliliği vurgulanmaktadır (Yano ve ark., 2022)

Japonya'da batarya atıklarının toplanabilmesi ve geri dönüştürülebilmesi için teknik altyapı kadar, halkın bilinçlendirilmesi de kritik bir rol oynamaktadır. Yapılan araştırmalarda, Japon halkının batarya atıkları konusunda yeterli bilgiye sahip olmadığı ve bataryaların çoğunlukla yanlış şekilde atıldığı gözlemlenmiştir (Asari ve ark., 2013) Bu durum, batarya geri dönüşüm sistemlerinin etkinliğini sınırlayan bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Halkın çevresel bilinç seviyesinin artırılması, geri dönüşüm oranlarının yükseltilmesinde belirleyici bir faktör olabilmektedir (Asari ve ark., 2011)

Son yıllarda, Japonya, dijital izleme teknolojilerini batarya geri dönüşüm süreçlerine entegre etmeye yönelik adımlar atmıştır. Bu teknolojiler, bataryaların yaşam döngüsünü izlemeyi ve geri dönüşüm süreçlerini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Özellikle, elektrikli araç bataryalarının ikinci kullanım fırsatları, bu bataryaların ömrü sona erdikten sonra yeniden değerlendirilebilmesi için önemli bir çözüm sunmaktadır. Böylece, batarya üretiminde kullanılan hammaddelerin verimli bir şekilde yeniden kullanılması sağlanmakta ve çevresel etkiler en aza indirilmektedir (Yano ve ark., 2022)

Japonya'daki batarya geri dönüşüm politikaları, yalnızca teknik yenilikler ile değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle de desteklenmektedir. Ancak, geri dönüşüm oranlarını artırmak için yalnızca teknolojik ilerlemeler değil, aynı zamanda halk eğitimi ve farkındalık kampanyalarına yönelik yatırımlar da gereklidir. Bu bağlamda, Japonya’nın geri dönüşüm stratejileri, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirliği de sağlamayı amaçlayan kapsamlı bir yaklaşımı temsil etmektedir.

3.3.5. Enerji Tüketimi ve Kaynak Kullanımı

Elektrikli araç (EA) bataryalarının üretim süreci, yüksek enerji gereksinimi ve doğal kaynak kullanımı nedeniyle önemli çevresel etkiler barındırmaktadır. Özellikle lityum-iyon bataryaların üretiminde kullanılan hammadde çıkarımı, işlenmesi ve batarya hücrelerinin üretimi aşamalarında yoğun enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Bu süreçler, karbon ayak izinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır (Dunn ve ark., 2015)

Lityum, kobalt, nikel ve grafit gibi kritik minerallerin çıkarımı sırasında mekanik kazı, kimyasal işlem ve ısıl işlem gibi enerji yoğun işlemler uygulanmaktadır. Örneğin, yalnızca 1 ton lityum karbonat üretimi için yaklaşık 70-80 GJ (gigajoule) enerji harcandığı bildirilmektedir (Dai ve ark., 2019) Bu miktar, elektrikli araç bataryalarının üretiminde kullanılan enerjinin önemli bir bölümünü teşkil etmektedir. Ayrıca, bu enerjinin kaynağı genellikle fosil yakıtlar olduğunda, batarya üretiminin karbon ayak izi daha da artmaktadır.

Batarya üretim tesislerinin bulunduğu coğrafyaların enerji altyapısı, karbon ayak izi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Örneğin, Çin'de fosil yakıt ağırlıklı enerjiyle çalışan üretim tesisleri, aynı bataryayı İsveç gibi yenilenebilir enerji ağırlıklı ülkelerdeki tesislere göre çok daha yüksek sera gazı emisyonları üretmektedir (Romare ve Dahllöf, 2017) Bu durum, üretim sürecinin enerji kaynağına bağlı olarak çevresel etkilerinde büyük farklılıklar olabileceğini göstermektedir.

Kaynak kullanımı açısından bakıldığında, elektrikli araç bataryalarının üretiminde kullanılan bazı minerallerin sınırlı rezervlere sahip olduğu ve bu nedenle sürdürülebilir kaynak yönetiminin önem kazandığı görülmektedir. Kobalt gibi minerallerin büyük bölümü Demokratik Kongo Cumhuriyeti gibi politik açıdan kırılgan bölgelerden temin edilmektedir; bu durum çevresel etkinin yanı sıra sosyal sürdürülebilirlik açısından da endişe yaratmaktadır (Alves Dias ve ark., 2018)

Sonuç olarak, elektrikli araç bataryalarının karbon ayak izi üzerinde enerji tüketimi ve kaynak kullanımı önemli etkenlerdir. Karbon ayak izinin azaltılması için yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretim yapılması, düşük karbonlu üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ve kritik minerallerin geri kazanımının artırılması gerekmektedir.

3.3.6. Türkiye'deki Durum ve Karbon Ayak İzi

Türkiye'de elektrikli araç bataryalarının geri kazanım süreçlerine ilişkin endüstriyel ekosistem hâlen gelişme aşamasındadır. Batarya geri dönüşümüne yönelik özel tesis sayısı sınırlı olmakla birlikte, son yıllarda bu alanda kamu ve özel sektör yatırımlarında artış gözlemlenmektedir. Özellikle lityum-iyon bataryaların kullanım ömrünü tamamlamasının ardından gerçekleştirilen geri kazanım faaliyetleri, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik değer yaratımı açısından stratejik önem taşımaktadır. Bu bataryaların içerdiği kobalt, nikel ve lityum gibi kritik

metallerin geri kazanımı; doğal kaynakların korunmasına ve karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Geri kazanım süreçleri genellikle üç temel aşamadan oluşmaktadır:

1. bataryaların ayrıştırılması ve geri kazanıma uygun bileşenlerin seçilmesi,

2. zararlı materyallerin kimyasal işlemlerle bertaraf edilmesi,

3. geri kazanılabilir metallerin yeniden üretim süreçlerine kazandırılması. Bu işlemler sırasında kullanılan enerji kaynağı, geri dönüşümün karbon ayak izini doğrudan etkilemektedir. Türkiye'de elektrik üretiminin yaklaşık %52'si hâlen fosil kaynaklara dayalıdır; bu da geri kazanım tesislerinin çevresel etkisini artıran bir faktördür (TEİAŞ, 2023).

Yaşam döngüsü analizleri (LCA), batarya geri kazanımının çevresel etkilerini değerlendirmede önemli bir araçtır. Ancak Türkiye'de elektrikli araç bataryalarının geri kazanımına yönelik yerel LCA çalışmaları oldukça sınırlıdır. Bu eksiklik, geri kazanım teknolojilerinin çevresel performansını ölçmede ve sektörel planlamalarda bilimsel temelli kararlar alınmasında zorluk yaratmaktadır (Lv ve ark., 2022).

Öte yandan, Türkiye'de geri kazanım alanında olumlu gelişmeler de gözlemlenmektedir. Özellikle bazı belediyeler ve özel firmalar tarafından kurulan tesislerde, elektrikli araç bataryalarının geri kazanımına yönelik pilot uygulamalar yürütülmektedir. Bu tesislerde geri kazanılan bataryalar, enerji depolama sistemlerinde, güneş enerjisi altyapılarında ve yedek güç kaynaklarında yeniden kullanılabilmektedir. Ayrıca, batarya geri kazanımında kullanılan hidrometalurjik yöntemler, 1 kWh başına yaklaşık 4 kg CO_2 eşdeğeri emisyon üretmekte olup, bu değer üretim aşamasına kıyasla daha düşük bir çevresel yük oluşturmaktadır (Lv ve ark., 2022).

Türkiye'nin yenilenebilir enerji kapasitesindeki artış, geri kazanım tesislerinin daha düşük karbonlu elektrikle çalışmasını sağlayarak çevresel etkileri azaltma potansiyeli sunmaktadır. Bu bağlamda, geri kazanım süreçlerinin enerji verimliliği ve karbon ayak izi açısından optimize edilmesi, sürdürülebilir batarya yönetimi için temel bir strateji olarak değerlendirilmelidir (Dunn ve ark., 2015).

Örnek Karbon Ayak İzi Hesaplaması

Örnek olarak, 1 kWh kapasiteli bir elektrikli araç bataryasının karbon ayak izini hesaplamak için aşağıdaki parametreler kullanılabilir:

- **Batarya üretimi:** 1 kWh için ortalama 200 kg CO_2 eşdeğeri emisyon (Dunn ve ark., 2012)
- **Kullanım aşaması**: Elektrikli araç kullanımı sırasında sıfır emisyon kabul edilir.
- **Geri Dönüşüm:** Batarya geri dönüşümü için kullanılan hidrometalurjik yöntem, 1 kWh başına 4 kg CO_2 eşdeğeri emisyon yaratmaktadır (Lv ve ark., 2022)

Hesaplama:

- **Üretim:** 200 kg CO_2/kWh
- **Kullanım:** 0 kg CO_2 (sıfır emisyon)
- **Geri dönüşüm:** 4 kg CO_2/kWh

Toplam karbon ayak izi:

200 kg CO_2 (Üretim) + 0 kg CO_2 (Kullanım) + 4 kg CO_2 (Geri dönüşüm) = 204 kg CO_2/kWh

Bu hesaplamaya göre, 1 kWh kapasiteli bir elektrikli araç bataryasının toplam karbon ayak izi yaklaşık olarak 204 kg CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanabilir. Bu hesaplama, batarya üretimi, kullanım ve geri dönüşüm süreçlerini dikkate alarak yapılmış bir örnektir ve batarya türüne, kullanılan enerji kaynaklarına ve geri dönüşüm teknolojilerine göre değişiklik gösterebilir.

3.3.7. Ulaşım Lojistiğinde Karbon Ayak İzinin Azaltılması

Bataryaların üretim hammaddeleri ve atık bataryaların geri dönüşüm tesislerine taşınması süreci, önemli miktarda karbon salımına neden olmaktadır. Bu nedenle lojistik planlamasının optimize edilmesi, karbon emisyonlarını azaltma stratejileri arasında yer almaktadır.

- **Yerel geri dönüşüm ağlarının oluşturulması**, taşınma mesafelerini azaltarak yakıt tüketimini düşürür.

- **Elektrikli veya düşük emisyonlu taşıma filoları**, taşıma sürecindeki karbon salımını azaltır.
- **Lojistik yazılımlarla rota optimizasyonu**, yakıt kullanımını %10–15 oranında azaltma potansiyeline sahiptir (Li ve ark., 2021)

Ayrıca, batarya taşımalarında kullanılan paketleme ve konteyner sistemlerinin yeniden kullanılabilir ve hafif materyallerden yapılması da taşımadan kaynaklanan emisyonları azaltıcı etki yaratmaktadır.

3.4. Batarya Atıklarının İnsan Sağlığına Etkileri

Elektrikli araç bataryalarının kullanım ömrünü tamamlamasının ardından uygun şekilde yönetilmemesi, ciddi insan sağlığı sorunlarına yol açabilmektedir. Lityum-iyon bataryaların içinde bulunan ağır metaller (kobalt, nikel, mangan gibi) ve toksik elektrolitler, özellikle sızıntı, yangın veya patlama durumlarında çevreye yayılabilir ve doğrudan insanlarla temas edebilir (Gaines, 2014) maddeler solunum, cilt teması veya su kaynakları aracılığıyla insan vücuduna girebilir.

Özellikle kobalt maruziyeti, akciğer hastalıkları ve dermatolojik sorunlar gibi sağlık problemleri ile ilişkilendirilmiştir (Xu ve ark., 2020) Lityumun yüksek dozda alımı sinir sistemi üzerinde toksik etkilere neden olabilirken, nikel ve mangan gibi metallerin kronik maruziyeti nörotoksisite riski taşımaktadır (Chen ve ark., 2019)

Batarya atıklarının çevresel ortamlarda kontrolsüz bir şekilde birikmesi veya yakılması sonucu açığa çıkan gazlar, özellikle düşük gelirli bölgelerde yaşayan insan grupları için daha büyük bir tehdit oluşturmaktadır (Velázquez-Martínez ve ark., 2019) Bu durum, çevresel adalet ilkeleri açısından da değerlendirilmelidir.

3.5. Geri Dönüşüm Tesislerinde İşçi Sağlığı ve Güvenliği

Batarya geri dönüşüm tesislerinde çalışan işçiler, kimyasal, fiziksel ve ergonomik risklere maruz kalmaktadır. Özellikle pirometalurjik ve hidrometalurjik işlemler sırasında yüksek sıcaklık, toksik gaz salınımı ve aşındırıcı kimyasallar ile temas olasılığı artmaktadır (Harper ve ark., 2019)

İşçiler, kobalt, nikel ve lityum tozları gibi metalik partiküllerin solunması sonucu solunum yolu hastalıkları riskiyle karşı karşıyadır. Ayrıca, hidroflorik asit gibi aşındırıcı maddelerin kullanıldığı kimyasal işlemler göz ve cilt için ciddi riskler oluşturur (Espinosa ve ark., 2004) Tesislerde uygun havalandırma sistemlerinin bulunmaması, kişisel koruyucu donanım (KKD) kullanımının yetersiz olması ve iş güvenliği eğitiminin eksikliği bu riskleri artırmaktadır.

İş sağlığı ve güvenliği (İSG) açısından batarya geri dönüşüm tesislerinde tehlike tanımlama, risk değerlendirme, maruziyet sınırlarının belirlenmesi ve periyodik sağlık kontrolleri gibi uygulamalar hayati önemdedir. Avrupa Kimyasallar Ajansı (ECHA), geri dönüşüm süreçlerinde kullanılan kimyasallara dair mesleki maruziyet sınırlarının belirlenmesini ve bu sınırların düzenli izlenmesini önermektedir (ECHA, 2021)

3.6. Risk Yönetimi ve Acil Durum Planları

Elektrikli araç bataryalarının geri kazanımı sürecinde ortaya çıkabilecek çevresel ve sağlık risklerinin önlenebilmesi için etkili bir risk yönetimi stratejisi gereklidir. Bu strateji; risklerin tanımlanması, önleyici tedbirlerin alınması, sürekli izleme mekanizmaları ve acil durumlara hazırlık gibi unsurları içermelidir.

Batarya geri dönüşüm tesislerinde yangın ve patlama riski önemli bir tehlike olarak öne çıkmaktadır. Özellikle bataryaların termal kaçak durumuna geçmesi sonucu oluşabilecek zincirleme reaksiyonlar, ciddi hasara ve iş gücü kaybına yol açabilir (Zhang ve ark., 2022) Bu nedenle tesislerde yangın algılama ve söndürme sistemlerinin etkinliği büyük önem taşımaktadır.

Acil durum planlaması kapsamında; personelin yangın, kimyasal sızıntı veya patlama gibi olaylara karşı nasıl hareket edeceği, tahliye prosedürleri, ilk yardım müdahaleleri ve dış destek mekanizmaları (itfaiye, sağlık hizmetleri vb.) net olarak belirlenmelidir.

ISO 45001 İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi, bu tür tesislerde risklerin sistematik olarak yönetilmesini ve sürekli iyileştirme döngüsünü destekleyen bir çerçeve sunmaktadır.

Uluslararası uygulamalar, Türkiye için yol gösterici olabilir. Örneğin, Almanya'da batarya geri dönüşüm tesislerinde yangın riski, kimyasal sızıntı ve patlama gibi durumlara karşı özel acil durum müdahale protokolleri oluşturulmuştur. Bu kapsamda işletmelerin, risk analizi temelinde

periyodik tatbikatlar ve senaryo bazlı eğitimler yürütmesi yasal zorunluluktur (UBA, 2021) Çin'de ise, özellikle lityum-iyon bataryaların geri dönüşümüne ilişkin tesisler için özel yangın yönetmelikleri ve tehlikeli madde depolama kılavuzları yayınlanmıştır. Bu önlemler, Türkiye'de uygulanabilecek acil durum yönetim sistemleri için örnek teşkil etmektedir (MIIT, 2020)

Bu tür iyi uygulama örneklerinin dikkate alınması, Türkiye'de batarya geri dönüşümüne ilişkin altyapıların güçlendirilmesi ve çevresel risklerin en aza indirilmesi açısından önem arz etmektedir.

4. EKONOMİK AÇIDAN ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ GERİ KAZANIMI

4.1. Elektrikli Araç Bataryalarında Kullanılan Materyallerin Ekonomik Değeri

Elektrikli araç (EA) bataryalarının üretiminde kullanılan materyaller, toplam üretim maliyetlerinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Özellikle kobalt, nikel, lityum, manganez ve grafit gibi aktif materyaller, bataryanın enerji yoğunluğu ve performansında kritik rol oynamaktadır. Bunun yanında bakır, alüminyum, demir ve çelik gibi yapısal ve iletken materyaller, batarya modüllerinin mekanik dayanıklılığı ve elektrik iletkenliğinin sağlanmasında önemli işlevlere sahiptir.

Bu materyallerin küresel piyasa fiyatları, arz-talep dengesi, jeopolitik koşullar ve madencilik maliyetlerine bağlı olarak dalgalanmaktadır (Gaines, 2014; Harper et al., 2019). 2025 yılı itibarıyla ortalama piyasa fiyatları ve bataryalardaki ortalama ağırlıkları dikkate alındığında, her bir materyalin ekonomik değeri Tablo 4.1'de sunulmuştur. Bu veriler, batarya geri dönüşüm süreçlerinin ekonomik potansiyelini ve kritik materyallerin yeniden kazanımının stratejik önemini ortaya koymaktadır.

Materyal	Ortalama Piyasa Fiyatı (2025, USD/kg)	Bataryadaki Ortalama Ağırlık (kg)	Ekonomik Değer (USD/kg batarya)	Toplam Maliyetteki Pay (%)
Lityum	68	6	408.0	25.9
Kobalt	32	8	256.0	16.2
Nikel	19	29	551.0	35.0
Grafit	1.2	52	62.4	4.0
Bakır	8.5	20	170.0	10.8
Manganez	2.3	10	23.0	1.5
Alüminyum	2.5	35	87.5	5.6
Çelik	0.9	20	18.0	1.1
Demir	0.12	5	0.6	0.04
Toplam	—	**185**	**1,576.5**	**100**

Tablo 4.1. Elektrikli araç bataryalarında kritik materyallerin 2025 yılı itibarıyla piyasa fiyatları, bataryadaki ortalama ağırlıkları, ekonomik değerleri ve toplam maliyetteki payları

(Veriler, Trading Economics, 2025; Daily Metal Price, 2025; IMARC Group, 2025; Shanghai Metal Market, 2025; BusinessAnalityq, 2025 çalışmalarından uyarlanmıştır.)

Tabloda da görülebileceği üzere, özellikle kobalt ve nikel bataryanın toplam ekonomik değerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Kobalt hem yüksek piyasa fiyatı hem de sınırlı tedarik kaynakları nedeniyle stratejik bir öneme sahiptir. Bu materyallerin arz güvenliği, fiyat istikrarı ve sürdürülebilirlik açısından geri dönüşüm kritik bir role sahiptir.

Batarya geri dönüşüm teknolojileri, özellikle hidrometalurjik ve pirometalurjik yöntemlerle, bu değerli metallerin yüksek oranda geri kazanılmasını mümkün kılmaktadır (Lv ve ark., 2022; Dunn ve ark., 2012) Geri kazanılan materyaller, birincil kaynaklardan temin edilenlere kıyasla daha düşük çevresel maliyet ve karbon ayak izi ile üretime yeniden kazandırılır (Harper ve ark., 2019)

Geri dönüşümün ekonomik katkıları sadece maliyet düşürmekle kalmaz, aynı zamanda hammadde tedarik zincirlerinde dışa bağımlılığı azaltarak piyasa dalgalanmalarına karşı dayanıklılığı artırır (Wang ve ark., 2021) Avrupa Komisyonu'nun 2022 raporuna göre, sadece Avrupa'da batarya geri dönüşüm potansiyeli yıllık yaklaşık 3 milyar Euro değerinde kritik materyal içermektedir (Avrupa Komisyonu 2022)

Bu çerçevede, ülkemiz gibi hammadde zengini olmayan ülkelerde batarya geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması hem ekonomik kalkınma hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için stratejik bir gerekliliktir.

4.1.2. Hammadde İthalatına Olan Bağımlılığı Azaltma

EV bataryalarının geri dönüşümü, lityum, kobalt ve nikel gibi kritik hammaddelerin yeniden kazanılmasını sağlayarak, yeni maden çıkarma ihtiyacını ve dolayısıyla ithalat bağımlılığını azaltmaktadır. Bu durum, tedarik zincirlerini güçlendirirken, çevresel etkileri de minimize etmektedir.

Çin'de EV bataryalarının geri dönüşümünün, hammadde talebini ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir. Çalışmada, geri dönüşümün, batarya üretiminde kullanılan hammaddelerin yeniden kullanımını sağlayarak, yeni maden çıkarma ihtiyacını azalttığı belirtilmiştir. (Jiang ve ark., 202

Uluslararası Temiz Ulaşım Konseyi (ICCT) tarafından yayımlanan bir raporda, EV batarya geri dönüşümünün, hammadde ithalatına olan bağımlılığı azaltırken, yerel istihdam ve ekonomik değer yarattığı vurgulanmıştır. Raporda, geri dönüşüm süreçlerinin, çevresel ve sosyal etkileri azaltarak, sürdürülebilir bir tedarik zinciri oluşturduğu belirtilmiştir. (Tankou, Bieker ve Hall, 2023).

4.1.3. Bataryaların İkinci Kullanımı

Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan lityum-iyon bataryalar, kullanım süresi boyunca kapasite kaybına uğrasa da ömürlerinin sonunda hâlâ anlamlı enerji depolama kapasitesine sahiptir. Bu durum, bataryaların otomotiv sektöründeki birincil görevlerini tamamladıktan sonra, enerji depolama gibi ikincil uygulamalarda yeniden kullanılmasına olanak tanır (Neubauer ve Pesaran, 2011). İkinci kullanım batarya uygulamaları, yenilenebilir enerji sistemleriyle entegrasyon, enerji şebekesi dengeleme hizmetleri, acil yedek güç sistemleri ve kırsal alanlarda enerji erişimi gibi pek çok alanda değerlendirilmektedir (Casals ve ark., 2017). Bu uygulamalar çevresel sürdürülebilirliği desteklerken ekonomik açıdan da yeni fırsatlar sunmaktadır (Ahmadi ve ark., 2014). Ayrıca, ikinci ömür senaryoları geri dönüşüm süreçlerinin geciktirilmesini sağlayarak hammadde tüketimini azaltmakta, karbon ayak izini düşürmekte ve döngüsel ekonomiye katkıda bulunmaktadır (Harper ve ark., 2019). Ancak, bu uygulamaların yaygınlaşması önünde teknik uygunluk, performans değerlendirme standartları, güvenlik

riskleri ve hukuki düzenlemeler gibi önemli engeller bulunmaktadır; bataryaların sağlık durumunun değerlendirilmesi ve kalan ömrünün belirlenmesi gibi işlemler standart prosedürler gerektirmektedir (Casals ve ark., 2017).

İkinci kullanım bataryalar, yeni batarya sistemlerine kıyasla daha düşük sermaye maliyetleriyle şebeke uygulamalarında kullanılabilmekte; frekans düzenlemesi, talep tepkisi yönetimi, pik yük dengelemesi ve enerji arbitrajı gibi işlevlerde enerji sistemlerinin esnekliğini artırarak enerji arz güvenliğine katkı sağlamaktadır (Casals ve ark., 2017). Ayrıca, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının düzensiz üretim karakteristikleri nedeniyle enerji depolama çözümlerine olan ihtiyaç, ikinci kullanım bataryalarla karşılanarak üretim fazlası enerjinin depolanması ve talep anında kullanımı mümkün olmaktadır. Bu sayede yenilenebilir enerji kullanım oranı artmakta ve karbon salınımı azalmakta (Martinez-Laserna ve ark., 2018) ekonomik analizler ise ikinci kullanım bataryaların sermaye maliyetlerinin yeni sistemlere kıyasla %30 ila %70 oranında daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle gelişmekte olan ülkelerde enerji erişiminin artırılması ve mikro şebeke sistemlerinde ekonomik enerji depolama kapasitesinin genişletilmesi açısından önemli fırsatlar yaratmaktadır (Neubauer ve ark., 2015). Bununla birlikte, ikinci kullanım bataryalar, batarya atıklarının azaltılması ve kaynakların daha verimli kullanılması açısından döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu bir yaklaşım sunmaktadır.

4.2. Türkiye ve Dünyada Batarya Geri Dönüşümü: Teşvikler, Politikalar ve Ekonomik Modeller

Çevresel sürdürülebilirlik ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi amacıyla, dünya genelinde çeşitli finansal ve yapısal destek mekanizmaları uygulanmaktadır. Bu mekanizmalar arasında devlet teşvikleri, sübvansiyonlar, araştırma-geliştirme (Ar-Ge) destekleri, düşük faizli krediler ve vergisel avantajlar yer almakta, özellikle enerji verimliliği, geri dönüşüm teknolojileri ve yeşil inovasyon alanlarındaki yatırımları artırarak çevresel etkilerin azaltılmasını hedeflemektedir. Türkiye'de de benzer uygulamalar yürürlüktedir ve bu desteklerin, özellikle batarya geri dönüşümü gibi stratejik öneme sahip alanlarda etkili olduğu gözlemlenmektedir.

Türkiye'de elektrikli araç batarya geri kazanımı alanında doğrudan tanımlanmış teşvik mekanizmaları sınırlı olmakla birlikte, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın yatırım teşvik sistemi kapsamında batarya üretimi ve enerji depolama gibi stratejik alanlara sağlanan KDV muafiyeti,

gümrük vergisi istisnası ve diğer destekler, geri kazanım yatırımlarının da proje bazlı olarak bu kapsamda değerlendirilebilmesine olanak tanımaktadır.

TÜBİTAK, yeşil dönüşüm ve döngüsel ekonomi kapsamında Ar-Ge projelerine hibe ve destek sağlayarak geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesini teşvik etmektedir (Tübitak, 2023). T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ise atık yönetimi ve geri kazanım projelerine yönelik mali destek mekanizmaları sunmakta, bu çerçevede batarya geri dönüşüm projeleri de dolaylı olarak desteklenebilmektedir (T.C. ÇŞİDB, 2022)

Türkiye Ulusal Enerji Planı (2020–2035), batarya enerji depolama kapasitesinin 2035 yılına kadar 7,5 GW'a ulaşmasını hedeflemekte; bu doğrultuda enerji depolama yatırımlarıyla birlikte batarya geri dönüşüm ihtiyacı da artmaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023; Şura, 2024; TSKB, 2023). Ticaret Bakanlığı'nın Yeşil Mutabakat Eylem Planı ise döngüsel ekonomi ve atık yönetimi alanlarında eylemler içermekle birlikte, batarya geri dönüşümünü dolaylı biçimde ele almaktadır (Ticaret Bakanlığı, 2021).

Uluslararası düzeyde, Avrupa Birliği 2023'te yürürlüğe giren Yeni Batarya Yönetmeliği (Regulation (EU) 2023/1542) ile üreticilere geri dönüşüm oranı hedefleri ve zorunlu geri kazanım yükümlülükleri getirmiştir (Avrupa Parlamentosu ve Konseyi, 2023).

Horizon Europe programı kapsamında batarya geri dönüşüm teknolojilerine yönelik Ar-Ge projeleri desteklenmekte ve sınır ötesi iş birlikleri teşvik edilmektedir (Flash Battery, 2023).

ABD'de 2022 yılında yürürlüğe giren Inflation Reduction Act (IRA), temiz enerji teknolojileri ile batarya üretim ve geri dönüşüm altyapısına yönelik milyarlarca dolarlık sübvansiyon ve vergi indirimi sağlamaktadır. ABD Enerji Bakanlığı (Department of Energy – DOE) ise bu kapsamda özel destek programları yürütmekte, batarya geri kazanım teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik Ar-Ge ve yatırım teşvikleri sunmaktadır (ABD Kongresi, 2022; ABD Enerji Bakanlığı, 2023).

Çin, üreticilere geri dönüştürülmüş hammadde kullanma zorunluluğu getirerek pilot geri dönüşüm tesisleri kurmuştur (Xu ve ark., 2021). Güney Kore ise K-Circular Economy stratejisi kapsamında, lityum-iyon bataryaların yeniden kullanımı ve geri dönüşümünü teşvik eden fonlar ile vergi kolaylıkları sunmaktadır (Kang, Park ve Lee, 2022).

Batarya geri dönüşüm süreçlerinin ekonomik fizibilitesi, teknoloji, batarya tipi, geri kazanılan metal içeriği ve lojistik faktörlere bağlıdır.

Pirometalurjik yöntemler yüksek enerji tüketimi ve tesis maliyeti nedeniyle başlangıçta yüksek maliyetli iken, geri kazanım verimliliği açısından avantajlıdır.

Hidrometalurjik yöntemler daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiğinden enerji maliyetleri daha düşüktür, ancak kimyasal kullanımı maliyetleri artırabilir.

Doğrudan geri dönüşüm yöntemleri, özellikle ikinci kullanım potansiyeli olan hücreler için daha düşük maliyetli bir alternatif sunmaktadır (Harper ve ark., 2019; Melin, 2022).

Ekonomik modelleme çalışmalarında kurulum maliyetleri, operasyonel giderler, amortisman süresi, net bugünkü değer (NPV), iç verim oranı (IRR) ve geri ödeme süresi gibi kriterler analiz edilmektedir.

Örneğin, Çin'de 10.000 ton/yıl kapasiteli bir tesisin kurulum maliyeti yaklaşık 20 milyon dolar olup, yedi yıl içinde geri ödeme sağlanmaktadır (Xu ve ark., 2021). Türkiye'de TÜBİTAK ve özel sektör iş birliğiyle yürütülen projeler veri üretimini artırmaktadır (Tübitak, 2023).

5. MEVZUAT VE POLİTİKALAR

5.1. Türkiye'de Elektrikli Araç Bataryaları ile İlgili Mevzuat

Türkiye'de elektrikli araç bataryalarının geri kazanımıyla ilgili özel bir yönetmelik henüz yayımlanmamış olmakla birlikte, mevcut düzenlemeler genel çevre ve atık yönetimi mevzuatı çerçevesinde şekillenmektedir. Bu çerçeve, batarya atıklarının toplanması, taşınması ve geri kazanımı süreçlerine ilişkin temel ilkeleri belirlemekte; çevresel etkilerin azaltılması ve kaynakların etkin kullanımı hedeflenmektedir.

Elektrikli araç bataryalarının geri kazanımına yönelik yatırımlar, doğrudan mevzuatla tanımlanmasa da mevcut teşvik sistemleri kapsamında desteklenebilmektedir. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın yatırım teşvik sistemi**,** batarya üretimi ve enerji depolama gibi stratejik alanlara sağladığı KDV muafiyeti**,** gümrük vergisi istisnası ve yer tahsisi gibi desteklerle, geri

kazanım tesislerinin de proje bazlı olarak bu kapsamda değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2024).

Ayrıca TÜBİTAK**,** Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve Ticaret Bakanlığı**,** batarya geri dönüşüm teknolojilerine yönelik Ar-Ge projelerine hibe ve mali destek sağlayarak, teknik kapasitenin geliştirilmesini ve mevzuat uyumunun hızlandırılmasını teşvik etmektedir (Tübitak, 2024; T.C. ÇŞİDB, 2023; Ticaret Bakanlığı, 2023).

5.2. Avrupa Birliği'nde Batarya Yönetmeliği ve Uyum Süreci

Avrupa Birliği, elektrikli araç bataryalarının üretimi, kullanımı ve bertarafı süreçlerini döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda düzenleyen kapsamlı bir mevzuat geliştirmiştir. 2023 yılında yürürlüğe giren Regulation (EU) 2023/1542 sayılı Batarya Yönetmeliği, bataryaların yaşam döngüsü boyunca çevresel sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu şekilde yönetilmesini hedeflemektedir (Avrupa Komisyonu, 2023).

Yönetmelik;

- Karbon ayak izi hesaplamaları,
- Asgari geri kazanım oranları,
- İkinci ömür değerlendirme sistemleri,
- Dijital pasaport ve QR kod uygulamaları gibi yenilikçi düzenlemeler içermektedir.

Bu düzenlemeler yalnızca AB üyesi ülkeleri değil, aynı zamanda AB ile ticaret ilişkisi bulunan ülkeleri de doğrudan etkilemektedir. Türkiye'de batarya üretimi yapan ve ürünlerini AB pazarına sunan firmalar, yönetmeliğin belirlediği sürdürülebilirlik ve şeffaflık kriterlerine uyum sağlamak zorundadır. Karbon ayak izi bildirimi, yeniden kullanım potansiyelinin raporlanması ve geri dönüşüm verimliliği gibi kriterler, Türk üreticilerin rekabet gücünü doğrudan etkilemektedir (Yılmaz ve Kaya, 2024).

5.3. AB Batarya Yönetmeliği Uygulama Takvimi ve Türkiye'ye Etkileri

Avrupa Birliği Batarya ve Atık Bataryalar Tüzüğü (Regulation (EU) 2023/1542), batarya türlerine göre farklı teknik yükümlülükler ve kademeli uygulama tarihleri öngörmektedir. Karbon ayak izi beyanı, dijital pasaport, geri dönüştürülmüş içerik oranları, etiketleme, QR kod,

toplama hedefleri ve geri dönüşüm verimliliği gibi yükümlülükler, ilgili takvim doğrultusunda aşamalı olarak yürürlüğe girecektir.

- **Karbon Ayak İzi Yükümlülüğü:** AB Batarya Yönetmeliği kapsamında, elektrikli araç, endüstriyel, LMT ve harici depolamalı bataryalar için karbon ayak izi beyanı, performans sınıflandırması ve maksimum eşik değerleri ürün türüne göre farklı tarihlerde yürürlüğe girecektir. Elektrikli araç bataryaları için beyan yükümlülüğü 18 Şubat 2025 itibarıyla başlarken, diğer batarya türleri için bu tarih 2026–2030 arasında kademeli olarak uygulanacaktır. Avrupa Komisyonu, hesaplama metodolojisini ve etiketleme formatını belirleyen uygulama eylemlerini ilgili tarihlerde kabul edecek olup, üreticilerin bu teknik esaslara uyum sağlaması zorunlu hale gelecektir.
- **Geri Dönüştürülmüş İçerik Yükümlülükleri:** Elektrikli araç, endüstriyel, SLI (Starting–Lighting–Ignition Batteries (Marş–Aydınlatma–Ateşleme Aküleri) ve LMT (Light Means of Transport Batteries (Hafif Ulaşım Araçları Aküleri) bataryaları için 2031 ve 2036 yıllarında kademeli olarak artırılacak geri dönüştürülmüş içerik oranları (%26 kobalt, %85 kurşun, %12 lityum, %15 nikel) ve bilgilendirme belgesi zorunluluğu, Türkiye'deki üreticiler açısından malzeme izlenebilirliği ve belge altyapısının geliştirilmesini gerektirmektedir. Avrupa Komisyonu'nun bu alandaki metodoloji kabulü 18 Ağustos 2026 itibarıyla tamamlanacak olup, bu tarihten itibaren içerik beyanlarının teknik esaslara dayalı biçimde sunulması zorunlu hale gelecektir.
- **Atıkların Toplama Yükümlülükleri:** AB Batarya Yönetmeliği'nin 59–60–61. maddeleri kapsamında taşınabilir, LMT, SLI, endüstriyel ve elektrikli araç bataryaları için aşamalı toplama hedefleri ve üretici yükümlülükleri tanımlanmıştır. Türkiye'deki üreticiler açısından bu hükümler, toplama altyapısının geliştirilmesi ve ayrı toplama sistemlerinin kurulması gerekliliğini doğurmaktadır.

  Taşınabilir Bataryalar:

  - %45 toplama hedefi: 31 Aralık 2023
  - %63 toplama hedefi: 31 Aralık 2027
  - %73 toplama hedefi: 31 Aralık 2030 Komisyon, toplama oranı metodolojisini değiştirme yetkisini 18 Ağustos 2027 itibarıyla kullanabilir.

LMT Bataryaları:

- %51 toplama hedefi: 31 Aralık 2028
- %61 toplama hedefi: 31 Aralık 2031
- Üreticiler, bu bataryaları ücretsiz ve ayrı şekilde toplamakla yükümlüdür (yürürlük tarihi açık değildir).

SLI, Endüstriyel ve Elektrikli Araç Bataryaları:

- Üreticiler, bu bataryaları ücretsiz ve ayrı şekilde toplamakla yükümlüdür (yürürlük tarihi açık değildir).

- **Dijital Entegrasyon:** 2027 itibarıyla zorunlu olacak dijital pasaport uygulaması, batarya bileşimi ve yeniden kullanım potansiyeline ilişkin bilgilerin güvenli biçimde paylaşılmasını sağlayacak altyapının kurulmasını gerektirmektedir. Bu kapsamda, LMT bataryaları, 2 kWh üzeri endüstriyel bataryalar ve elektrikli araç bataryaları için elektronik batarya pasaportu zorunluluğu 18 Şubat 2027 itibarıyla yürürlüğe girecektir (Madde 77/1). Komisyon, 18 Ağustos 2026 tarihine kadar bu pasaportta yer alan hassas teknik ve ticari bilgilere kimlerin, ne ölçüde ve hangi yollarla erişebileceğini belirleyen uygulama eylemlerini kabul edecektir (Madde 77/9). Bu düzenleme, tamirciler, geri dönüşümcüler, ikinci hayat operatörleri ve enerji piyasası katılımcıları gibi meşru menfaat sahiplerinin bataryaların durumu, bileşimi ve yeniden kullanım potansiyeline ilişkin bilgilere sınırlı ve güvenli erişimini sağlamayı amaçlamaktadır (Madde 77/2-c, Ek XIII/2 ve Ek XIII/4).
- **Geri Dönüşüm ve Malzeme Geri Kazanım Hedefleri:** AB Batarya Yönetmeliği'nin Ek XII Bölüm B ve C'si kapsamında, lityum bazlı, nikel-kadmiyum ve diğer atık bataryalar için geri dönüşüm verimliliği hedefleri ile kobalt, bakır, kurşun, lityum ve nikel gibi kritik malzemeler için geri kazanım oranları belirlenmiştir. Bu hedefler, 2025, 2027, 2030 ve 2031 yıllarında kademeli olarak artırılacak olup, Türkiye'deki geri dönüşüm altyapısının teknik uyumunu zorunlu kılmaktadır.

5.4. Depozito Sistemi Önerisi

Avrupa Birliği Batarya ve Atık Bataryalar Tüzüğü (Regulation (EU) 2023/1542), batarya toplama oranlarını artırmak amacıyla üretici sorumluluğu ilkeleriyle uyumlu depozito iade sistemlerini teşvik etmektedir. Bu sistem, batarya kullanıcılarının ürün ömrü sonunda bataryayı

yetkili toplama noktalarına iade etmeleri karşılığında belirli bir bedelin geri ödenmesini öngörmektedir (Avrupa Parlamentosu ve Konsey, 2023).

Depozito mekanizması, toplama oranlarının artırılması, kayıt dışı bertarafın önlenmesi ve geri kazanım zincirinin izlenebilir hale getirilmesi açısından kritik bir araç olarak değerlendirilmektedir. Avrupa Komisyonu'nun 2023 tarihli teknik bilgilendirme notunda, özellikle yüksek hacimli batarya türleri için depozito temelli modellerin geri dönüşüm verimliliğini artırmada etkili olduğu vurgulanmaktadır (Avrupa Komisyonu, 2023).

Türkiye'de elektrikli araç bataryaları için depozito temelli bir geri alma modeli geliştirilmesi;

- Çevresel sorumluluğun yaygınlaştırılması,
- Geri kazanım verimliliğinin artırılması,
- Toplama altyapısının finansal sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından stratejik bir adım olacaktır.

Bu öneri, AB ile teknik uyumun sağlanmasının yanı sıra, Türkiye'nin döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle de örtüşmektedir (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2023).

5.5. Stratejik Değerlendirme

Türkiye'nin AB Batarya Yönetmeliği'ne uyum süreci yalnızca teknik ve çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve sanayi politikaları açısından da stratejik boyutlar içermektedir. Uyum sağlanması, Türk sanayisinin AB ile entegrasyonunu güçlendirecek, yeşil dönüşüm hedeflerine katkı sunacak ve sürdürülebilir üretim modellerinin benimsenmesini teşvik edecektir. Ancak uyum maliyetleri, teknik altyapı eksiklikleri ve rekabet baskısı gibi unsurlar, sürecin dikkatle yönetilmesini gerektirmektedir.

5.6. Elektrikli Araç Bataryalarının Geri Kazanımı ile İlgili Düzenleyici Kurumlar

Elektrikli araç bataryalarının geri kazanım süreci, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması ve döngüsel ekonomi ilkelerinin hayata geçirilmesi açısından stratejik öneme sahiptir. Türkiye'de bu alanda düzenleyici ve denetleyici sorumluluğa sahip başlıca kurumlar aşağıda özetlenmiştir:

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı

- Bataryaların toplanması, taşınması ve geri kazanımına ilişkin esasları belirler.
- Atık yönetimi mevzuatı kapsamında çevresel etkilerin minimize edilmesini ve kaynakların etkin kullanımını hedefler.
- Batarya atıkları, stratejik ve toksik elementler içerdiği için özel yönetim gerektirir.

Ticaret Bakanlığı

- AB Batarya Yönetmeliği'ne uyum kapsamında üreticilerin çevresel sorumluluklarını artırmaya yönelik çalışmalar yürütür.
- Yeşil Mutabakat Eylem Planı çerçevesinde döngüsel ekonomi ve atık yönetimi alanlarında mevzuat uyumu sağlar.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı

- Elektrikli araç ve batarya teknolojilerinin geliştirilmesi, ithalatı ve üretimi süreçlerinde düzenleyici rol üstlenir.
- Batarya sistemlerinin takibi ve izlenmesiyle ilgili sorumlulukları ithalatçılara yükler.
- Şarj altyapısının yaygınlaştırılması ve geri kazanım yatırımlarına yönelik teşvik programları yürütür.

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı

- Elektrikli araç altyapısının geliştirilmesiyle dolaylı olarak batarya geri kazanım süreçlerini destekler.

6. TÜRKİYE'DE ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARININ GERİ KAZANIM SÜRECİNİN ANALİZİ

6.1. Türkiye'de Elektrikli Araç Bataryalarının Geri Dönüşümü: Durum Analizi

Türkiye'de elektrikli araç bataryalarının geri dönüşüm altyapısı hâlen gelişim sürecindedir. Mevcut tesisler ağırlıklı olarak mekanik ayrıştırma gibi ön işlem basamaklarına odaklanmakta olup; lityum, kobalt, nikel ve mangan gibi stratejik metallerin tam kapsamlı geri kazanımı henüz

sınırlı ölçekte uygulanabilmektedir. Bu durum, ileri geri kazanım teknolojilerinin yaygınlaştırılması ve teknik kapasitenin artırılması yönünde sektörel bir gelişim potansiyeline işaret etmektedir.

2024 yılı itibarıyla Türkiye'de trafiğe kayıtlı elektrikli araç sayısı 183.776'ya ulaşmıştır ve bu artış, batarya kullanımının da hızla yaygınlaştığını göstermektedir (TÜİK, 2025; Cumhuriyet, 2025). Sektörel projeksiyonlara göre, 2030 yılına kadar elektrikli araç sayısının 1 milyonu aşması beklenmektedir (EY Türkiye, 2025). Bu büyüme, elektrikli araç bataryalarının geri dönüşüm kapasitesinin eş zamanlı olarak geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Ancak, elektrikli araç bataryaları için organize bir ulusal toplama ve izleme sistemi henüz oluşturulmamıştır; bu durum, geri kazanım süreçlerinin izlenebilirliği ve verimliliği açısından yapısal bir eksiklik oluşturmaktadır.

Avrupa'da ise geri dönüşüm altyapısı daha ileri düzeydedir. Umicore, Recupyl ve Accurec gibi firmalar, pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemleri entegre biçimde kullanarak yüksek verimli geri kazanım hizmetleri sunmaktadır (Harper ve ark., 2019). Bu uygulamalar, hem stratejik metallerin etkin geri kazanımını sağlamakta hem de karbon ayak izini azaltmaya yönelik çözümler içermektedir. Türkiye'de bu düzeyde bütünleşmiş tesisler henüz kurulmamış olmakla birlikte, teknoloji ve sanayi alanında yatırımlar artmakta; özellikle lityum-iyon batarya üretimi, paketleme ve geri kazanım kapasitesini artırmaya yönelik projeler gündeme gelmektedir (Mobility Foresights, 2024; Energy Evolution Expo, 2024).

Bu bağlamda, Türkiye'nin batarya geri kazanım stratejisinin yalnızca bir atık yönetimi meselesi olarak değil, aynı zamanda yerli üretim, sanayi politikaları ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle bütünleşik biçimde ele alınması gerekmektedir.

6.2. Türkiye'de Elektrikli Araç Bataryalarının Geri Kazanımının Değerlendirilmesi

Türkiye'nin elektrikli araç bataryalarına yönelik geri kazanım altyapısı, Avrupa Birliği'nin 2023 yılında yürürlüğe giren Batarya Yönetmeliği ile uyum sürecindedir. Bu süreç kapsamında, uygulayıcı kurumların görev tanımları, teşvik mekanizmaları ve mevzuat düzenlemeleri şekillenmeye devam etmektedir (OECD, 2023). Geri kazanım sistemlerinin çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle bütünleşmesi, bataryaların yaşam döngüsü boyunca çevresel

etkilerinin azaltılması ve geri dönüştürülmüş içerik kullanımının artırılması açısından stratejik yatırımların ve politika geliştirme çalışmalarının önemini ortaya koymaktadır.

Geri kazanımın başarısı yalnızca teknolojik kapasiteyle değil; aynı zamanda toplama kültürü, tüketici bilinci ve davranışsal faktörlerle doğrudan ilişkilidir. Elektrikli araç sahiplerinin ve genel halkın batarya atıklarının çevresel etkileri konusunda bilinçlendirilmesi, geri kazanım süreçlerinin verimliliğini artıracaktır. Bu bağlamda, pilot projeler, yerel yönetim-özel sektör iş birlikleri ve belediye düzeyinde uygulanan toplama sistemleri, farkındalık oluşturmak ve geri dönüşüm alışkanlıklarını yaygınlaştırmak açısından kritik öneme sahiptir (Tübitak MAM, 2023).

Ayrıca, üreticilerin ve satış noktalarının geri kazanım süreçlerine entegre edilmesi; tüketiciye yönelik bilgilendirme, teşvik ve yönlendirme mekanizmalarıyla desteklenmelidir. Kamu kurumları tarafından yürütülen çevre eğitimi faaliyetleri hem sektörel çalışanlar hem de vatandaşlar için çevre bilinci, güvenlik kültürü ve geri dönüşüm sistemlerine katılımı teşvik etmektedir (Erdem ve Yıldırım, 2020; T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023). Uluslararası literatürde de geri kazanımın teknik boyutunun yanı sıra sosyal katılımın önemine dikkat çekilmektedir (Harper ve ark., 2019).

Bu bütünsel yaklaşım, Türkiye'nin elektrikli araç bataryalarının geri kazanım altyapısını güçlendirecek; çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasını ve döngüsel ekonomiye geçişini hızlandıracaktır.

6.3. Elektrikli Araç Bataryalarının Mevcut Durumu

Türkiye'de elektrikli araç (EV) pazarı son yıllarda dikkat çekici bir büyüme göstermektedir. TÜİK ve EPDK verilerine göre, 2020 yılında trafiğe kayıtlı elektrikli araç sayısı 7.894 iken, bu sayı 2024 yılı sonunda 185.513'e, 2025 yılı temmuz ayı itibarıyla ise 291.775'e ulaşmıştır (TÜİK, 2025; EPDK, 2025). Bu artış, batarya kullanımının hızla yaygınlaştığını ve geri kazanım gerekliliklerinin stratejik önem kazandığını göstermektedir.

Ortalama bir elektrikli araç bataryasının kapasitesi yaklaşık 50 kWh düzeyindedir (TEHAD, 2024). Bu temel üzerinden yapılan hesaplamalara göre, Türkiye'deki EV'lerin toplam batarya kapasitesi 2024 yılı itibarıyla yaklaşık 9,27 GWh seviyesindedir. 2030 yılına kadar EV sayısının 1 milyona ulaşması durumunda toplam batarya stoğunun 50 GWh düzeyine çıkması

beklenmektedir (Mobility Foresights, 2024). Bu projeksiyonlar, Türkiye'nin batarya geri kazanım altyapısının planlanması ve kapasite artırımı açısından kritik bir öneme sahiptir.

Yıl	Trafiğe Kayıtlı EV Sayısı	Yıllık Satış Adedi	Yıllık Artış Oranı (%)
2020	7.894	7.894	-
2021	17.256	9.362	118,6
2022	35.421	18.165	105,2
2023	67.893	32.472	91,7
2024	185.513	117.620	173,3
2025*	291.775	106.262	57,3

Tablo 6.3. Türkiye elektrikli araç satışları ve trafikteki ev sayısı

Kaynaklar: TÜİK (2025), EPDK (2025), Enerji Ajansı (2025), EY Türkiye (2025)

**2025 verisi temmuz ayı itibarıyla güncellenmiştir.*

Yıl	EV Sayısı	Ortalama Batarya Kapasitesi (kWh)	Toplam Enerji Stoğu (GWh)	Ortalama Batarya Ağırlığı (kg)	Toplam Batarya Ağırlığı (kg)
2020	7.894	50	0,39	300	2.368.200
2021	17.256	50	0,86	300	5.176.800
2022	35.421	50	1,77	300	10.626.300
2023	67.893	50	3,39	300	20.367.900
2024	185.513	50	4,97	300	55.653.900
2025*	291.775	50	14,59		87.532.500
2030*	1.000.000	50	50,00	300	300.000.000

Tablo 6.3.1. Türkiye'de elektrikli araçlara ait batarya stoğu

TÜİK (2025), EPDK (2025), TEHAD (2024), Mobility Foresights (2024), EY Türkiye (2025)

**2025 ve 2030 verileri tahmini projeksiyonlara dayanmaktadır. Ortalama batarya ağırlığı ≈ 300 kg (NCM/NCA hücre tipi baz alınmıştır).*

7. YÖNTEM

7.1. Senaryo Metodolojisi ve Literatür İncelemesi

Elektrikli araç (EA) bataryalarının geri kazanım süreçlerinin modellenmesi, atık miktarlarının tahmini, geri dönüşüm verimliliklerinin belirlenmesi ve ekonomik analizlerin gerçekleştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, literatürde yaygın olarak kullanılan metodolojiler, malzeme akış analizi (Material Flow Analysis - MFA), yaşam döngüsü değerlendirmesi (Life Cycle Assessment - LCA) ve ajans tabanlı modelleme (Agent-Based Modeling - ABM) gibi yaklaşımlardır.

Malzeme Akış Analizi (MFA), batarya üretiminden kullanımına ve nihai bertaraf aşamasına kadar malzeme miktarlarının nicel takibini sağlar. Bu yöntem, kaynakların etkin kullanımını değerlendirmeye ve geri kazanım potansiyelini ortaya koymaya olanak verir. MFA'nın Türkiye'ye uyarlanmasında, ulusal üretim, ithalat ve kullanım verileri temel alınmış; eksik veriler ise uluslararası literatürdeki benzer ülke örnekleri ile tamamlanmıştır (Bakker vd., 2014; Harper vd., 2019) Bu yöntem, özellikle Türkiye gibi veri altyapısının gelişmekte olduğu ülkelerde, senaryoların öngörülebilirliğini artırmak açısından uygundur.

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), bataryaların üretimden bertarafa kadar çevresel etkilerinin kapsamlı analizini sunar. LCA, senaryoların çevresel sürdürülebilirlik boyutunu vurgulamak ve karbon ayak izi gibi göstergeleri hesaplamak için tamamlayıcı bir araç olarak kullanılmaktadır (Notter ark., 2010) Türkiye'de LCA uygulamaları, henüz sınırlı olmakla birlikte, mevcut veriler ışığında çevresel performansın izlenmesine olanak vermektedir.

Ajans Tabanlı Modelleme (ABM), üretici, tüketici ve düzenleyici kurumların karar mekanizmalarını simüle ederek sistem içi dinamikleri anlamaya yardımcı olur. ABM, geri dönüşüm süreçlerinde paydaş davranışlarının etkilerini modellemek için potansiyel taşımaktadır ancak Türkiye'de mevcut veri ve altyapı eksiklikleri nedeniyle bu çalışmada öncelikli yöntem olarak kullanılmamıştır (Gilbert ve Troitzsch, 2005)

Türkiye'ye özgü senaryo geliştirme sürecinde, öncelikle TÜİK, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı gibi kurumların sağladığı üretim, kullanım ve atık verileri derlenmiştir. Verilerdeki eksikliklerin giderilmesi için uluslararası referanslar ve akademik

çalışmalar ışığında parametreler uyarlanmıştır. Bu yaklaşım, ülkemizin özgün koşullarına uygun, gerçekçi ve uygulanabilir senaryolar oluşturmayı mümkün kılmıştır.

2030, 2040 ve 2050 yıllarına ilişkin atık batarya miktarı ve geri kazanılabilir metal hesaplamaları aşağıdaki temel matematiksel ifadelerle desteklenmektedir:

$$W_t = P_{t-L} \times (1 - R_{s}) \quad Wt=Pt−L×(1−Rs)$$

Burada;

- W_t : ttt yılında oluşan atık batarya miktarı (ton),
- P_{t-L} : t−Lt - Lt−L yılında piyasaya sürülen batarya miktarı (ton),
- LLL : Batarya ortalama kullanım ömrü (yıl),
- R_{s} : Bataryaların kullanım ömrü sonunda kalan işlevsellik oranı (second life için dikkate alınabilir).

Geri kazanılabilir kritik metal miktarı ise:

$$M_t = W_t \times C \times E \quad Mt=Wt×C×E$$

Burada;

- M_t : Geri kazanılabilir metal miktarı (ton),
- CCC : Batarya içerisindeki metal içeriği oranı (%),
- EEE : Geri kazanım verimliliği (%).

Bu formüller çerçevesinde, Türkiye'nin elektrikli araç bataryaları için öngörülen üretim ve kullanım ömrü verileri kullanılarak, yıllık atık miktarları ve kritik metallerin potansiyel geri kazanımı hesaplanmıştır. Örneğin, Harper ve ark., (2019) tarafından verilen kullanım ömrü ortalaması 8-10 yıl, metal içerik oranları ve geri kazanım verimlilikleri referans alınmıştır.

Bu metodolojik yaklaşım, Türkiye'nin elektrikli araç bataryalarının sürdürülebilir yönetimi ve geri kazanım altyapısının planlanması için sağlam bir temel oluşturmakta; aynı zamanda

politika yapıcılar ve sanayi paydaşları için stratejik karar alma süreçlerinde rehberlik etmektedir.

7.1.1. Uluslararası Senaryo Yöntemleri (AB, Çin, ABD Örnekleri)

Senaryo modelleme yöntemleri genel olarak iki ana gruba ayrılmaktadır: nitel (kestirimsel) ve nicel (sayısal) senaryolar. Bu çalışmada, nicel verilere dayalı olarak geri kazanılabilir batarya miktarları, kritik metallerin potansiyel geri dönüşü, ekonomik değer ve karbon ayak izi gibi çıktılar hedeflenmiştir. Bu nedenle nicel yöntemler esas alınmıştır.

Dünya genelinde en sık kullanılan modelleme yaklaşımları aşağıda özetlenmiştir:

Bottom-up yaklaşımı: Elektrikli araç penetrasyon oranlarına, batarya ömürlerine ve yıllık satış projeksiyonlarına dayanarak atık batarya miktarını hesaplamaya yönelik alt modelleme tekniğidir. Çin'de yapılan bir çalışmada bu yöntemle 2030 yılı için geri dönüşüm ihtiyacı 780 bin ton olarak öngörülmüştür (Gaines ve ark., 2021)

Life Cycle Inventory (LCI) tabanlı senaryolar: Bataryaların üretim, kullanım ve atık aşamalarındaki çevresel etkileri ortaya koyar. Avrupa Birliği tarafından desteklenen Battery 2030+ inisiyatifi, bu yaklaşımla geri kazanımın karbon ayak izi etkisini analiz etmektedir.

Geri kazanım verimliliği temelli hesaplamalar: Bu modelde, her batarya türü için geri kazanılabilir metal oranları (% geri kazanım verimi) belirlenmekte ve yıllık batarya atık miktarı ile çarpılarak toplam potansiyel geri kazanım hesaplanmaktadır (IEA, 2020)

Ekonomik değer senaryoları: Kritik minerallerin birim fiyatı ($/ton) ile geri kazanım potansiyeli çarpılarak ekonomik fayda hesaplanmaktadır. ABD DOE (Department of Energy) tarafından bu türden ekonomik modeller kullanılmıştır.

7.1.2. Türkiye'ye Uygun Model Seçimi ve Varsayımlar

Bu tez kapsamında Türkiye'ye özgü senaryolar oluşturmak amacıyla, yukarıda özetlenen yaklaşımlar birleştirilerek karma bir model benimsenmiştir. Türkiye için veri kısıtları nedeniyle hem literatürdeki bottom-up yaklaşımı hem de madde akış analizi (Material Flow Analysis – MFA) ile desteklenmiş ekonomik ve çevresel hesaplamalar yapılmıştır.

Senaryo modellemesinde esas alınan temel varsayımlar şunlardır:

- 2020–2050 dönemi için Türkiye'deki elektrikli araç satış projeksiyonları,

- Batarya başına ortalama ağırlık: 300 kg (2020'ler için), 250 kg (2030 sonrası),
- Batarya ömrü ortalaması: 8 yıl,

Batarya türlerine göre metal içerikleri:

- **Lityum (Li) :** %1.5
- **Nikel (Ni) :** %6.0
- **Kobalt (Co) :** %1.8

Geri kazanım verimliliği:

- **Lityum (Li):** %70
- **Nikel (Ni):** %95
- **Kobalt (Co):** %90

Metal fiyatları (2025 tahmini):

Lityum – 25.000 $/ton, Kobalt – 35.000 $/ton, Nikel – 18.000 $/ton

Bu veriler ışığında 2030, 2040 ve 2050 yılları için atık batarya miktarları, geri kazanılabilir metal miktarları ve potansiyel ekonomik değer hesaplanacaktır.

7.1.3. Kullanılan Veri Kaynakları ve Tahmin Yaklaşımları

Modelde kullanılan veri kaynakları şunlardır:

- Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçlar Derneği (TEHAD) verileri
- Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) – Global EV Outlook
- AB Battery Regulation Draft (2023)
- Çin ve ABD geri dönüşüm senaryoları (akademik makaleler üzerinden)
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) ve Enerji Bakanlığı raporları

Tahmin yöntemi olarak, yıllara göre araç satış projeksiyonları kullanılarak batarya stoğu hesaplanmış, ardından batarya ömrü dikkate alınarak yıllık atık çıkışı modellenmiştir. Bu atık miktarları geri kazanım oranlarıyla çarpılarak geri kazanılabilir metal miktarı elde edilmiştir. Son olarak, bu miktarlar birim fiyatlarla çarpılarak ekonomik değer belirlenmiş ve sonuçlar grafik/tablo ile görselleştirilecek şekilde yapılandırılmıştır.

8. BULGULAR

8.1. Senaryo 1: G20 Ülkelerinde Elektrikli Araç Bataryalarının Geri Kazanımı Türkiye'nin Yeri ve Kritik Metal Potansiyeli

8.1.1. G20 Ülkeleri Batarya Üretim Kapasitesi ve Atık Miktarları (2025–2040)

Elektrikli araçların yaygınlaşması, batarya üretim kapasitelerinde kayda değer bir artışa neden olmuş; bu da beraberinde önemli bir atık batarya sorununu gündeme getirmiştir. G20 ülkeleri arasında, batarya üretimi konusunda lider konumda bulunan Çin, ABD, Güney Kore, Almanya ve Japonya, aynı zamanda büyük miktarda atık üretme potansiyeline de sahiptir (IEA, 2023; BloombergNEF, 2024). Türkiye ise üretim kapasitesi açısından henüz sınırlı bir düzeyde olsa da, önümüzdeki yıllarda bölgesel bir aktör olma potansiyeline sahiptir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023).

Aşağıdaki tabloda G20 ülkelerinin 2025 yılı üretim kapasiteleri ile 2040 yılı itibarıyla öngörülen yıllık atık batarya miktarları ve bunlardan geri kazanılabilecek kritik metal miktarları özetlenmiştir (Harper et al., 2019; IRENA, 2022)

Ülke	2025 Üretim Kapasitesi (GWh/yıl)	2040 Atık Batarya Tahmini (ton/yıl)	Geri Kazanılabilir Kritik Metaller (ton/yıl)	Başlıca Batarya Kimyası
Çin	~600	~3.000.000	Li: 80.000 Ni: 100.000 Co: 60.000	NMC, LFP
ABD	~200	~1.000.000	Li: 25.000 Ni: 35.000 Co: 20.000	NMC
Güney Kore	~180	~800.000	Li: 20.000 Ni: 30.000 Co: 15.000	NMC
Almanya	~170	~750.000	Li: 18.000 Ni: 27.000 Co: 14.000	NMC, LFP
Japonya	~100	~500.000	Li: 12.000 Ni: 18.000 Co: 10.000	NMC

Tablo 8.1.1. G20 Ülkeleri batarya üretimi, atık projeksiyonu ve geri kazanım potansiyeli 2040 tahmini**

(Veriler, IEA 2023; BloombergNEF 2024; Harper ve ark.,2019; IRENA 2022; T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 2023 çalışmalarından uyarlanmıştır.)

8.1.2. Türkiye’nin Geri Kazanım Potansiyeli ve Stratejik Konumu

Türkiye'nin elektrikli araç bataryaları alanında üretim kapasitesi henüz sınırlı olmakla birlikte, 2040 yılı itibarıyla yılda 100.000 ton seviyesinde atık batarya oluşacağı öngörülmektedir. Bu miktar, batarya başına ortalama 50–60 kWh kapasite ve 8–10 yıllık kullanım ömrü dikkate alınarak projeksiyonlandırılmıştır (IEA, 2023).

Bu atık miktarından geri kazanılabilecek yıllık kritik metal miktarları ise yaklaşık olarak şöyledir:

- **Lityum (Li):** ~3.000 ton (%50 geri kazanım oranı),
- **Nikel (Ni):** ~5.000 ton (%85 geri kazanım oranı),
- **Kobalt (Co):** ~3.000 ton (%90 geri kazanım oranı) (IRENA, 2022; Harper et al., 2019).

Bu değerler, hem iç tedarik güvenliği açısından önem taşımakta hem de Türkiye'nin döngüsel ekonomi hedefleri ile doğrudan ilişkilidir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023).

8.1.3. Geri Kazanım Yöntemleri ve Türkiye’deki Mevcut Durum

Elektrikli araç bataryalarının geri kazanımında dünya genelinde iki yöntem öne çıkmaktadır:

- **Pirometalurjik yöntem:** Yüksek sıcaklıkla metallerin ayrıştırılması,
- **Hidrometalurjik yöntem:** Kimyasal çözücülerle elementlerin ayrılması (Harper et al., 2019; IEA, 2023).

Türkiye’de 2024 itibarıyla elektrikli araç bataryalarına özgü lisanslı geri dönüşüm tesisleri oldukça sınırlıdır. Mevcut tesisler çoğunlukla endüstriyel bataryaların temel metal geri dönüşümüne odaklıdır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, bu eksikliği gidermek için 2022 yılından itibaren yatırım teşvikleri uygulamaya başlamıştır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023).

Ancak halen aşağıdaki alanlarda gelişime ihtiyaç duyulmaktadır:

- Batarya kimyasına özel proses tasarımları,
- Lityum geri kazanımı için AR-GE destekli sistemler,

- Avrupa Birliği regülasyonlarına uyumlu geri dönüşüm altyapısı (Irena, 2022).

8.1.4. İkinci Yaşam Uygulamaları ve Potansiyeli

Elektrikli araç bataryalarının kullanım ömrü sona erdiğinde dahi %70–80 kapasiteye sahip olmaları, bu bataryaların ikinci yaşam uygulamalarında kullanılmasını mümkün kılmaktadır (IEA, 2023). Bu alanlar şunlardır:

- Konut tipi enerji depolama sistemleri,
- Şebeke destek çözümleri,
- Güneş ve rüzgâr santrallerine entegre sistemler.

Türkiye'de bu alanda henüz ticari ölçekte bir uygulama bulunmamaktadır. Ancak Avrupa'da uygulanan modeller, batarya ömrünün %30–40 oranında uzatılabildiğini ve atık oluşumunun geciktirilebildiğini göstermektedir (Irena, 2022).

8.1.5. Senaryo Kabulleri

Bu senaryoda yapılan projeksiyonlar, mevcut literatür ve uluslararası raporlar temelinde aşağıdaki varsayımlara dayanmaktadır:

- Elektrikli araç bataryalarının ortalama ömrü 8–10 yıl (IEA, 2023).
- Batarya başına ortalama kapasite 50–60 kWh (Irena, 2022).
- 2040 yılı itibarıyla Türkiye'de oluşacak atık batarya miktarının yaklaşık 100.000 ton/yıl olacağı varsayılmıştır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023).
- Bataryalardan geri kazanılabilecek kritik metaller ve geri kazanım oranları:
    - **Lityum (Li):** %50
    - **Nikel (Ni):** %85
    - **Kobalt (Co):** %90 (Harper ve ark., 2019).
- Geri dönüşüm tesislerinin %70 kapasiteyle çalışacağı ve Avrupa'daki tesis maliyetlerine yakın maliyet yapısına sahip olacağı varsayılmıştır (IEA, 2023).
- Metal fiyatları ve karbon emisyon katsayıları, 2025 yılı sabit piyasa değerleri üzerinden alınmıştır (BloombergNEF, 2024).

8.1.6. Ekonomik Değerlendirme: Geri Kazanımın Maliyeti ve Katma Değeri

Geri kazanım sistemlerinin ekonomik değerlendirmesi yapılırken, süreç maliyetleri ile geri kazanılan metallerin potansiyel piyasa değerleri karşılaştırılmıştır. Avrupa'daki tesisler esas alındığında, hidrometalurjik yöntemle geri dönüşümün ton başına ortalama maliyeti 2.000–3.500 USD arasında değişmektedir (Harper ve ark., 2019; IEA, 2023).

2040 yılı için Türkiye'de oluşacak 100.000 tonluk atık bataryanın geri kazanımı maliyeti:

Toplam geri kazanım maliyeti: 200–350 milyon USD/yıl

Aynı yıl için geri kazanılabilecek metal miktarları ve piyasa değerleri yaklaşık olarak şu şekildedir (BloombergNEF, 2024)

- Lityum (~3.000 ton) x 20.000 USD/ton = 60 milyon USD
- Nikel (~5.000 ton) x 18.000 USD/ton = 90 milyon USD
- Kobalt (~3.000 ton) x 30.000 USD/ton = 90 milyon USD

Toplam geri kazanım geliri: ~240 milyon USD/yıl

Bu durumda, geri kazanım maliyetinin önemli bir bölümü telafi edilebilmekte; verimlilik ve teknoloji seviyesi geliştikçe net ekonomik kazanç da sağlanabilir**.** Ayrıca, bu metallerin ithalat yerine iç tedarikle elde edilmesi, Türkiye'nin dış ticaret açığına da olumlu katkı sağlayacaktır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023).

8.1.7. Çevresel Değerlendirme: Karbon Emisyonu Etkisi

Birincil madencilik süreçleriyle karşılaştırıldığında, batarya geri dönüşümüyle önemli ölçüde karbon emisyonu tasarrufu sağlanabilmektedir. IRENA' ya (2022) göre, geri kazanım işlemleri, madencilik tabanlı üretime kıyasla %60–90 daha az CO_2 emisyonu üretmektedir.

Metal	Birincil Üretim (tCO_2/ton)	Geri Kazanım (tCO_2/ton)	Türkiye'deki Yıllık Tasarruf (2040)
Lityum	~15	~4	3.000 ton x 11 = **33.000 tCO_2**
Nikel	~9	~2	5.000 ton x 7 = **35.000 tCO_2**
Kobalt	~10	~2	3.000 ton x 8 = **24.000 tCO_2**

Tablo 8.1.7. Geri kazanımın karbon emisyonu üzerindeki etkisi

Toplam karbon emisyonu tasarrufu (2040): ~92.000 ton CO_2/yıl

Bu tasarruf, yaklaşık 20.000 aracın yıllık emisyonuna denk gelmektedir (IEA, 2023; IRENA, 2022).

8.1.8. Genel Değerlendirme ve Politika Sonuçları

Yapılan projeksiyonlar, Türkiye'nin yalnızca batarya üretim kapasitesi değil, aynı zamanda geri kazanım altyapısı, karbon yönetimi ve döngüsel ekonomi politikaları açısından da gelişim potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023).

Bu çerçevede önerilen güncel politika adımları şunlardır:

- Geri kazanım altyapısına yönelik teşviklerin karbon azaltım kriterleriyle bütünleştirilmesi,
- AB'nin 2023 Batarya Regülasyonu' na uyumlu ulusal düzenlemelerin hızla hazırlanması (IEA, 2023),
- Üniversitelerle ortak LCA (yaşam döngüsü analizi) çalışmaları yürütülmesi,
- Metal geri kazanımında enerji verimliliğini esas alan teknolojilere öncelik verilmesi,
- Türkiye'nin bu alandaki yetkinliğinin artırılması için AR-GE ve pilot tesis desteklerinin artırılması.

8.2. Senaryo 2: Türkiye'de Elektrikli Araç Bataryalarının Geri Kazanımı (2020–2040)

8.2.1. Atık Batarya Miktarlarının Yıllara Göre Dağılımı

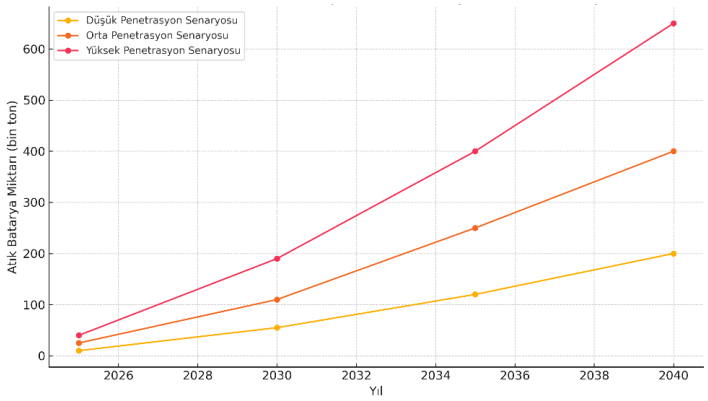
Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte, Türkiye'de 2020-2040 döneminde batarya atık miktarının önemli ölçüde artması beklenmektedir. Bu çalışmada, Jiang ve ark. (2021) tarafından geliştirilen Çin modeli esas alınarak Türkiye'ye özgü pazar yaygınlığı (penetrasyon) senaryoları (Düşük penetrasyon senaryosu (DPS), Orta penetrasyon senaryosu (OPS), Yüksek penetrasyon senaryosu YPS) kullanılmıştır.

Yıl	DPS (bin ton)	OPS (bin ton)	YPS (bin ton)
2025	10	25	40
2030	55	110	190
2035	120	250	400

2040	200	400	650

Tablo 8.2.1. 2020-2040 döneminde elektrikli araç bataryası atık miktarları (Veriler, Jiang ve ark., 2021 uyarlanmıştır).

Bu artışın temel nedeni, bataryaların ortalama 10 yıllık kullanım ömrü sonunda geri dönüşüme tabi tutulmasıdır. İkinci kullanım senaryoları ve bataryaların enerji depolama amaçlı tekrar kullanımı, atık miktarlarını geciktirse de toplamda geri kazanım potansiyelini yükseltecektir.



Şekil 8.2.1. 2025–2040 yılları arasında Türkiye'de batarya atık miktarının senaryolara göre projeksiyonu *(Veriler, Jiang et al., 2021 çalışmasından uyarlanmıştır)*

8.2.2. Geri Kazanılabilir Lityum, Kobalt, Nikel Miktarları

Atık bataryalardan geri kazanılabilecek kritik metallerin miktarı, geri dönüşüm teknolojilerinin etkinliği ve batarya kimyası kompozisyonuna bağlıdır. Orta penetrasyon senaryosu (OPS) dikkate alınarak hesaplanan 2040 yılı değerleri aşağıdaki gibidir:

Metal	Toplam Miktar (ton)	Ortalama Geri Kazanım Verimi (%)	Geri Kazanılabilir Miktar (ton)
Lityum	8,500	90	7,650
Nikel	21,000	85	17,850
Kobalt	6,000	90	5,400

Tablo 8.2.2. 2040 yılında geri kazanılabilir kritik metaller (OPS senaryosu)
(Veriler, Meshram ve ark., 2015; Harper ve ark., 2019 çalışmalarından uyarlanmıştır.)

Geri kazanım oranları, hidrometalurjik ve doğrudan geri kazanım yöntemleriyle %80–95 arasında değişmektedir. Türkiye'nin güçlü kimya altyapısı sayesinde yüksek verim hedeflenmektedir.

8.2.3. Ekonomik Değer Hesaplamaları

Geri kazanılan metallerin ekonomik değeri, 2024 yılı spot fiyatları esas alınarak hesaplanmıştır. Nikel ve kobalt için London Metal Exchange (LME) fiyatları, lityum için ise Bloomberg spot piyasa verileri kullanılmıştır. Bu kaynak seçimi, endüstriyel geçerlilik ve veri erişilebilirliği dikkate alınarak yapılmıştır.

Metal	Geri Kazanılabilir Miktar (ton)	Birim Fiyat (USD/ton)	Toplam Değer (milyon USD)
Lityum	7,650	60.000,00	459
Nikel	17,850	18.000,00	321
Kobalt	5,400	33.000,00	178
Toplam			**958 milyon USD**

Tablo 8.2.3. 2040 yılı için geri kazanımın ekonomik değeri (OPS senaryosu)
(Metal fiyatları: Nikel ve kobalt için LME, lityum için Bloomberg spot verileri; 2024))

Bu ekonomik değer, geri dönüşüm yatırımlarının maliyetlerini karşılama potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, ikinci kullanım bataryalarının enerji depolama alanında yaratacağı ekonomik faydalar da hesaba katıldığında, geri kazanımın Türkiye ekonomisine önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir (IRENA, 2022).

8.2.4. Geri Kazanım Teknolojilerinin Teknik ve Çevresel Değerlendirmesi

Bu bölüm, Türkiye'de uygulanabilir geri kazanım teknolojilerinin (pirometalürji, hidrometalürji, direkt/mekanik geri kazanım, elektrokimyasal ve biyolixiviye) teknik verimlilik, enerji tüketimi, emisyon profili ve ekonomik altyapısını karşılaştırmaktadır.

• **Pirometalürji**: Yüksek sıcaklıkta batarya bileşenlerinden metallerin alaşım fazında toplanması (özellikle Cu, Co, Ni). Li ve çoğu Al genellikle cürufa veya yakıt/indirgen olarak gider; bu nedenle Al geri kazanımı sınırlıdır. Enerji tüketimi yüksek, CO_2 emisyonları fazladır. Karışık hurda akışlarına toleranslıdır ve endüstriyel ölçekte yaygın kullanılır (Gaines & Dunn, 2014; Zeng et al., 2014).

• **Hidrometalürji**: Asidik çözeltilerle Li, Co, Ni gibi metallerin çözdürüldüğü yöntemdir. Bakir üretime kıyasla yaklaşık %40 daha düşük sera gazı (GHG) emisyonu; pirometalürjiye göre ise yaklaşık %20 daha düşük GHG sunar. Kimyasal kullanımı ve atık su yönetimi önemlidir (Boyrazlı, 2023; EY Türkiye, 2025).

• **Doğrudan Geri Dönüşüm**: Batarya bileşenleri doğrudan ayrıştırılır ve aktif katot malzemesi yeniden kullanıma hazırlanır. Enerji tüketiminde %48'e varan azalma sağlar, GHG emisyonları düşük ve ürün değeri yüksektir. Ancak farklı kimyalara uyum sınırlıdır ve teknoloji halen gelişmektedir (ITÜ Polen, 2022).

• **Elektrokimyasal (ECL)**: Özellikle Co geri kazanımında çevresel etkiler minimaldir (~1,2–1,7 kg CO_2-eq/kg Co). GWP, kimyasal liç yöntemlerine kıyasla %80–87 azalabilir. Elektrik kaynağının karbon yoğunluğu sonuçları etkiler (Ekolojik Enerji, 2024).

• **Biyolixiviye**: Mikroorganizmalarla metallerin çözdürülmesi esasına dayanır. Enerji tüketimi düşük, ancak süreç yavaş (haftalar) ve metal toleransı sınırlıdır. GHG değeri yaklaşık 16–19 kg CO_2-eq/kg Co'dur (EY Türkiye, 2025).

Yöntem	GHG (kg CO_2-eq/kg Co)	Enerji	Avantajlar	Dezavantajlar
Pirometalürji	20–150	Yüksek	Karışık hurdaya uyum, Cu/Co/Ni verimliliği yüksek	Yüksek emisyon, yüksek enerji, Li/Al kaybı
Hidrometalürji	30–90	Orta	Li dahil yüksek metal geri kazanım verimi	Kimyasal tüketimi, atık su yönetimi
Doğrudan Geri Dönüşüm	~1 (GHG düşük)	Düşük	Çevre dostu, yüksek değerli ürün	Kimya uyum sınırlı, ölçeklenme aşamasında
Elektrokimyasal (ECL)	1,2–1,7	Düşük	Çevre dostu, yüksek saflıkta Co üretimi	Ölçek sınırlı, elektrik kaynağına bağımlılık
Biyolixiviye	16–19	Düşük	Düşük enerji, düşük sıcaklıkta çalışma	Yavaş süreç, metal toleransı sınırlı

Tablo 8.2.4. Batarya geri kazanım teknolojilerinin GHG (sera gazı) emisyonu, enerji tüketimi ve teknik özellikleri

Veriler, Gaines ve Dunn, 2014; Zeng ve ark., 2014; Boyrazlı, 2023; EY Türkiye, 2025; ITU Polen, 2022; Ekolojik Enerji, 2024 çalışmalarından uyarlanmıştır).

8.2.5. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) Bulguları

Sahadaki LCA çalışmalarından elde edilen tipik aralıklar ve çevresel etkiler aşağıda özetlenmiştir:

- **Hidrometalurji işlemi:** Süreç emisyonları yaklaşık 0,5 ton CO_2-eq / ton batarya düzeyindedir. Bu yöntem, sıvı çözücülerle yapılan geri kazanım süreçlerinde görece düşük emisyon profili sunar.

- **Pirometalurji ve diğer termal yöntemler:** Yüksek sıcaklık ve enerji tüketimi nedeniyle süreç emisyonları genellikle 1 ton CO_2-eq / ton batarya ve üzerindedir.
- **Yeniden kazanım süreçleri:** Bir bataryanın birincil maden çıkarımı ve üretim süreçlerine kıyasla yeniden kazanımı, ton başına 2–4 ton CO_2-eq düzeyinde emisyon tasarrufu sağlayabilir. Bu fark, döngüsel ekonomiye geçişte LCA açısından kritik bir avantaj sunmaktadır.

Not: Emisyon değerleri saha uygulamalarından ve literatürdeki tipik LCA aralıklarından derlenmiştir; teknolojiye, ölçeğe ve bölgesel enerji karışımına göre değişkenlik gösterebilir.

8.2.6. Türkiye Özelinde Karbon Ayak İzi (2020–2040) — Metodoloji ve Varsayımlar

Türkiye ölçeğinde senaryoya dayalı net karbon azaltımı hesapları için kullandığım şeffaf varsayımlar:

1. Atık batarya miktarları: Tablo 8.2.1'deki DPS/OPS/YPS (bin ton olarak verilenler, tablolarda ton olarak kullanıldı).
2. Birincil üretim (madencilik + rafinasyon + üretim) yerine geri kazanımın sağladığı tipik "kaçınılan" emisyon ; 3,0 ton CO_2-eq / ton batarya (literatürde kullanılan ortalama varsayım)
3. Geri dönüşüm teknolojilerinin süreç emisyonları (varsayımsal fakat literatürle uyumlu aralık seçimi):

Teknoloji	Süreç emisyonu (t CO_2-eq / ton batarya)	Açıklama
Pirometalurji	1.50	Yüksek enerji, dolayısıyla daha yüksek süreç emisyonu
Hidrometalurji	0.50	Orta düzey süreç emisyonu (kullanıcı metnindeki 0.5 t/ton ile uyumlu)
Doğrudan geri dönüşüm	0.20	Düşük enerji, düşük süreç emisyonu
Elektrokimyasal (ECL)	0.10	Çok düşük süreç emisyonu (ölçeklendirme sınırlı)
Biyolixiviye	0.80	Düşük enerji ama süreç uzun ve bazı emisyonlar var

Tablo 8.2.6. Geri kazanım teknolojilerine göre süreç emisyonları (t CO_2-eq / ton batarya) (*Veriler, Gaines (2014); Ekolojik Enerji (2024); EY Türkiye (2025); IEA (2023); ITU Polen (2022) çalışmalarından uyarlanmıştır.*

4. Net karbon tasarrufu (t CO_2-eq / ton batarya) = net karbon azaltımı − proses emisyonu

Böylece örnek net değerler:

Pirometalurji: 3.0 − 1.5 = 1.5 tCO_2-eq / ton

Hidrometalurji: 3.0 − 0.5 = 2.5 tCO_2-eq / ton

Doğrudan geri dönüşüm: 3.0 − 0.2 = 2.8 tCO_2-eq / ton

Elektrokimyasal (ECL): 3.0 − 0.1 = 2.9 tCO_2-eq / ton

Biyolixiviye: 3.0 − 0.8 = 2.2 tCO_2-eq / ton.

8.2.7. Kritik Hammaddeler Bağımlılığı ve Kaynak Güvenliği

Elektrikli araç bataryalarının üretiminde kullanılan lityum, kobalt ve nikel gibi metaller, stratejik öneme sahip kritik hammaddeler arasında yer almaktadır. Türkiye, bu hammaddelerin tamamına yakınını ithal etmek zorundadır. Bu durum hem ekonomik hem de jeopolitik açıdan dışa bağımlılığı artırmakta, sürdürülebilir bir EV dönüşümünü risk altına sokmaktadır. Avrupa Birliği bu konuda 2023 yılında yürürlüğe koyduğu Critical Raw Materials Act ile geri kazanım, yerli üretim ve uluslararası tedarik çeşitliliği temelli yeni bir kaynak güvenliği stratejisi geliştirmiştir (Avrupa Komisyonu, 2023). Benzer şekilde, Golev ve arkadaşları (2014), kobalt ve lityum gibi hammaddelerin %60'tan fazlasının belirli birkaç ülkede yoğunlaştığını ve bu yoğunlaşmanın arz kesintisi riskini artırdığını belirtmektedir. Türkiye'de, geri kazanım yoluyla bu metallerin yeniden ekonomiye kazandırılması, 2040'a kadar ithalata olan bağımlılığı %25–30 oranında azaltabilir (IEA, 2024). Dolayısıyla, ömrünü tamamlamış bataryaların stratejik geri kazanımı, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda kaynak güvenliği açısından da ulusal öncelik haline gelmelidir.

8.2.8. Karar Destek ve Simülasyon Modelleri (MFA, LCA, ABM)

Bu tezde, geri kazanım senaryolarının analizi için üç temel modelleme yaklaşımına yer verilmiştir:

MFA (Malzeme Akış Analizi): Türkiye'de 2020–2040 döneminde piyasaya sürülen elektrikli araçların yıllık batarya üretim miktarları, kullanım ömrü ve atık oluşum oranları dikkate alınarak yıllık atık batarya miktarları hesaplanmıştır (Ziemann ve ark., 2020; IEA, 2023)

LCA (Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi): Seçilen geri dönüşüm teknolojilerinin enerji kullanımı ve karbon salımı üzerinden çevresel etkileri analiz edilmiştir. Örnek olarak, hidrometalurjik yöntemde 1 ton bataryadan 500 kg CO_2 eşdeğeri salım oluştuğu hesaplanmıştır (Dunn ve ark., 2015; Harper ve ark., 2019)

ABM (Etkili Aktör Tabanlı Modelleme): Paydaşların (kamu, özel sektör, tüketici) geri dönüşüm süreçlerine etkisi bir model ile senaryolaştırılmış; yüksek teşvikli senaryolarda katılım oranı %70'e kadar çıkarken, düzenlemesiz durumda bu oranın %25'te kaldığı görülmüştür (Xie ve ark., 2021)

8.2.9. Ekonomik Modelleme: Geri Kazanımın Makroekonomik Etkileri

Ömrünü tamamlamış bataryalarının geri kazanımı ve ikinci kullanımı, Türkiye ekonomisi için önemli bir potansiyele sahiptir. Öncelikle, geri dönüşüm ve ikinci kullanım alanlarında doğrudan ve dolaylı olarak istihdam yaratma kapasitesi oldukça yüksektir. World Bank (2020) raporuna göre, yalnızca kritik mineral geri kazanımı sektörünün 2040 yılına kadar dünya genelinde 250.000'in üzerinde yeni iş yaratabileceği tahmin edilmektedir. Türkiye ölçeğinde bu sayı 10.000–20.000 kişilik bir istihdama karşılık gelebilir. Ayrıca, ithalat ikamesi yoluyla cari açığın azaltılması ve geri kazanılan malzemelerin yeniden üretimde kullanılmasıyla katma değerli yerli üretim artacaktır (Ellen MacArthur Foundation, 2015). Pellow ve arkadaşlarının (2020) yaptığı çalışmada, ikinci kullanım sistemlerinin geri dönüşüme göre daha yüksek ekonomik çıktı sağladığı ve enerji depolama sistemlerinde kullanıldığında %30'a varan maliyet avantajı yarattığı vurgulanmaktadır. Bu veriler, Türkiye'nin döngüsel ekonomi çerçevesinde hem yeşil büyüme hem de ekonomik direnç açısından kazanımlar elde edebileceğini göstermektedir.

8.2.10. Uluslararası Uygulamalar ve Türkiye için Kıyaslama

Türkiye'nin ömrünü tamamlamış batarya yönetimi politikalarının geliştirilmesinde, diğer ülkelerde uygulanan stratejilerin dikkatle incelenmesi faydalı olacaktır. Avrupa Birliği, üreticileri sorumlu hale getiren Extended Producer Responsibility (EPR) sistemini zorunlu tutmakta ve 2030'a kadar kobaltın %16'sını, lityumun %6'sını geri kazanma hedefi koymaktadır (Avrupa Komisyonu, 2023). Çin'de ise üreticilerin geri kazanım için lisanslı işletmelerle çalışması zorunlu hale getirilmiş ve sistem dijital takip mekanizmaları ile denetlenmektedir (Jiang ve ark., 2021). ABD ise gönüllü sistemlere ve özel sektör teşviklerine dayalı bir yaklaşım benimsemektedir; burada ikinci kullanım sistemleri ön plandadır (Pellow ve ark., 2020) Türkiye, AB ile gümrük birliği ilişkisi ve Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYİH) büyüklüğü açısından, AB modeliyle uyumlu bir sistem benimsemeli; üretici sorumluluğu, lisanslı geri kazanım tesisleri ve teşvik temelli ikinci kullanım sistemleri entegre edilmelidir. Bu yaklaşım hem çevresel etkinliği artıracak hem de sektörün yatırım çekme kapasitesini güçlendirecektir.

8.3. Senaryo 3: Türkiye'de Elektrikli Araç Bataryalarının 2019–2025 Arası Üretimi Ve 10 Yıl Sonra Geri Dönüşüm Durumu

8.3.1. Üretim Verilerine Dayalı Geri Dönüşüm Tahmini

Türkiye'de 2019–2025 yılları arasında elektrikli araç batarya üretimi ve ithalatına ilişkin veriler ışığında, bu bataryaların yaklaşık 10 yıl sonra, yani 2029–2035 döneminde atık batarya olarak geri dönüşüme konu olması beklenmektedir. Batarya kullanım ömrü ortalama 8-12 yıl aralığında olup, 10 yıl standart kabul edilmiştir (Harper ve ark., 2019; IEA, 2023) Bu sürece göre, 2019 yılında üretilen bataryalar 2029 yılında, 2025 yılında üretilenler ise 2035 yılında geri dönüşüme girecektir. Böylece yıllara göre geri dönüşüme ulaşacak batarya miktarları öngörülerek, toplam potansiyel atık miktarı tahmin edilmiştir (Jiang ve ark., 2021)

8.3.2. 2029–2035 Arası Geri Dönüşüm Beklentisi

Senaryoya göre, 2029–2035 yılları arasında Türkiye'de yıllık olarak yaklaşık 3.000–5.000 ton aralığında batarya atığının geri dönüşüme ulaşması beklenmektedir (TÜBİTAK MAM, 2024) Bu miktarın giderek artmasıyla beraber, geri dönüşüm altyapısının ve teknolojik kapasitenin da artırılması gerekmektedir (Wang ve ark., 2022) Ayrıca, ikinci kullanım opsiyonları ve batarya yenileme süreçlerinin etkisi de geri dönüşüm potansiyelini etkilemektedir (Ahmadi ve ark., 2017)

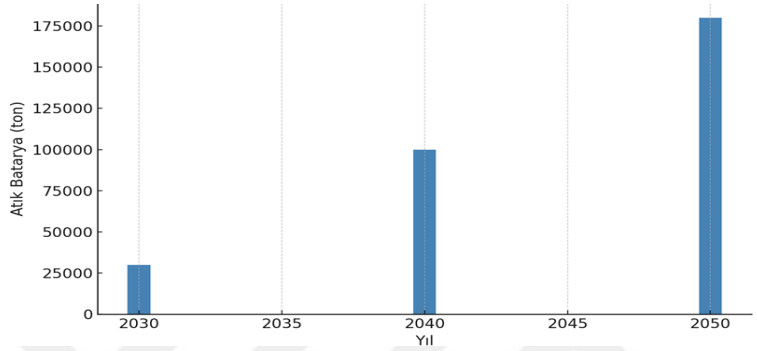
8.3.3. Geri Dönüşüm Teknolojileri ve Yatırım Gerekleri

Elektrikli araç bataryalarının geri dönüşümünde üç ana teknoloji öne çıkmaktadır: pirometalurji, hidrometalurji ve doğrudan geri dönüşüm yöntemleri (Meshram ve ark., 2015) Her bir yöntemin çevresel etkileri, ekonomik maliyetleri ve geri kazanım verimlilikleri farklılık göstermektedir (Gaines, 2014) Türkiye'de mevcut tesislerin kapasiteleri sınırlı olup, önümüzdeki dönemde ciddi yatırım gereksinimi bulunmaktadır (Avrupa Komisyonu, 2020) Yatırımların öncelikli olarak hidrometalurjik teknolojilere yönlendirilmesi, çevresel ve ekonomik açıdan daha sürdürülebilir sonuçlar doğuracaktır (Liu ve ark., 2019)

8.3.4. Grafikler, Tablolar ve Tahmin Modeli Çıktıları

8.3.4.1. Yıllara Göre Batarya Atık Miktarı Grafikleri

Bu grafik, 2030, 2040 ve 2050 yıllarında Türkiye'de oluşması beklenen elektrikli araç batarya atık miktarlarını göstermektedir. 2030 yılı için yaklaşık 30.000 ton, 2040 yılı için 100.000 ton ve 2050 yılı için ise 180.000 tonluk bir atık batarya hacmi öngörülmektedir. Bu artış, elektrikli araç penetrasyonunun artmasına bağlı olarak geri kazanım altyapısının da güçlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

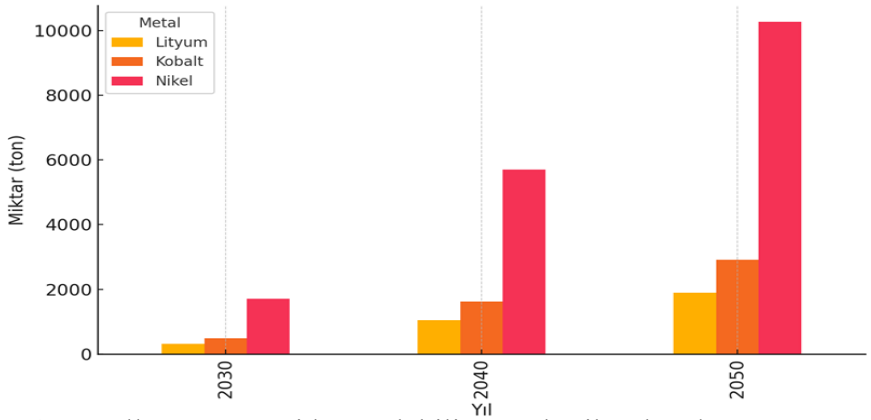


Şekil 8.3.4.1. Yıllara göre Türkiye'de atık batarya miktarları

(Veriler, TÜİK, 2022; EY Türkiye, 2025; ITU Polen, 2022; Sosyal Veri, 2022 çalışmalarından uyarlanmıştır).

8.3.4.2. Geri Kazanılabilir Metal Miktarları ve Dağılımı

Bu grafikte lityum, kobalt ve nikelin 2030, 2040 ve 2050 yıllarındaki geri kazanılabilir miktarları gösterilmektedir. 2050 yılında geri kazanılabilecek nikel miktarı 10.260 ton ile en yüksek seviyeye ulaşırken, kobalt ve lityum sırasıyla 2.916 ton ve 1.890 ton olarak tahmin edilmektedir. Bu değerler, geri dönüşüm süreçlerinde ekonomik ve çevresel kazanımın önemini vurgulamaktadır.

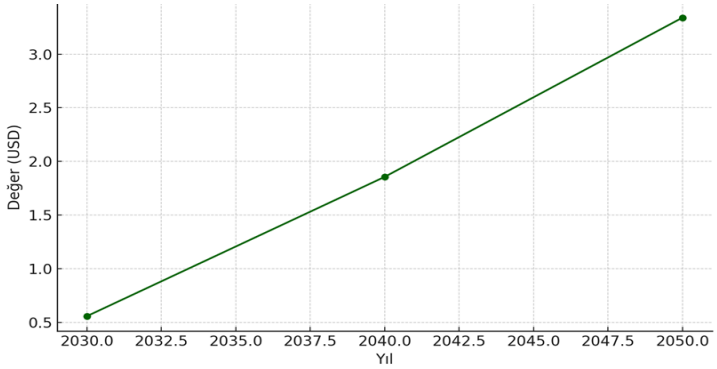


Şekil 8.3.4.2. Yıllara göre geri kazanılabilir metal miktarları *2030–2050 tahminleri;

(Veriler, TEHAD (2024), Mobility Foresights (2024), IEA (2023), EY Türkiye (2025), ITU Polen (2022) çalışmalarından uyarlanmıştır).

8.3.4.3. Ekonomik ve Çevresel Fayda Projeksiyonları

Aşağıdaki grafik, batarya geri kazanımı sonucu elde edilebilecek toplam ekonomik değeri göstermektedir. 2030 yılı için yaklaşık 55 milyon $, 2040 için 185 milyon $ ve 2050 yılı için ise 334 milyon $'lık bir ekonomik potansiyel öngörülmektedir. Bu öngörü, stratejik metal geri kazanımının sadece çevresel değil, aynı zamanda ekonomik bir fırsat sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 8.3.4.3. 2030-2050 Arası Geri Kazanımın Ekonomik Değeri *2030–2050 tahmini

(Veriler, TTGV (2025), EY Türkiye (2025), IEA (2023), Eko Etki (2025), IPA-III (2024) çalışmalarından uyarlanmıştır).

8.3.5. İkinci Kullanım Batarya Senaryolarının Entegrasyonu

Elektrikli araç bataryalarının kullanım ömrü sona erdikten sonra enerji depolama kapasitelerinin %70–80'inin korunabildiği tespit edilmiştir (Harper ve ark., 2019) Bu durum, bataryaların "second-life" kapsamında çeşitli alanlarda yeniden kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Özellikle stasyoner enerji depolama, yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu ve şebeke dengeleme uygulamaları öne çıkmaktadır.

İkinci kullanım bataryalar, yeni batarya sistemlerine kıyasla daha düşük sermaye maliyetleriyle şebeke ölçekli uygulamalarda değerlendirilebilir. Bu bataryalar; frekans düzenlemesi, talep tepkisi yönetimi, pik yük dengelemesi ve enerji arbitrajı gibi işlevlerde önemli rol oynamaktadır (Casals ve ark., 2017)

Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, ikinci kullanım bataryalar güneş enerjisi sistemleri ve elektrikli araç şarj altyapısı gibi alanlarda destekleyici bir rol üstlenebilir. Bu uygulamalar sayesinde hem batarya atık hacminin azaltılması hem de enerji sistemlerinin esnekliğinin artırılması sağlanabilir (Gaines, 2014; IEA, 2022)

8.3.6. Karbon Ayak İzi Değerlendirmesi

Elektrikli araç bataryalarının geri dönüşüm süreci yalnızca ekonomik ve stratejik metal kazanımı açısından değil, aynı zamanda sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından da kritik bir rol üstlenmektedir. Literatürde, bir ton lityum-iyon bataryanın geri dönüşümünün yaklaşık 2–3 ton CO_2 eşdeğeri (CO_2-eq) emisyon tasarrufu sağladığı belirtilmektedir (Dunn ve ark., 2015; Ellingsen ve ark., 2016). Bu tasarruf, özellikle madencilik faaliyetlerinin ve birincil metal üretiminin yüksek karbon yoğunluğu dikkate alındığında önemli bir çevresel katkı sunmaktadır.

Senaryoya göre Türkiye'de 2029–2035 döneminde yıllık ortalama 3.000–5.000 ton bataryanın geri dönüşüme girmesi beklenmektedir. Bu miktar, yaklaşık 9.000–15.000 ton CO_2-eq emisyon azaltımına karşılık gelmektedir. 2030 yılı için öngörülen 30.000 tonluk atık batarya hacmi dikkate alındığında, yıllık 90.000 ton CO_2-eq düzeyinde emisyon azaltımı sağlanabilecektir. 2040 ve 2050 yıllarında ise bu katkı sırasıyla 300.000 ton CO_2-eq ve 540.000 ton CO_2-eq seviyelerine ulaşacaktır.

Bununla birlikte, karbon ayak izi değerlendirmelerinde geri dönüşüm teknolojilerinin seçimi belirleyici bir faktördür. Pirometalurjik yöntemler yüksek enerji tüketimi nedeniyle nispeten yüksek emisyon üretirken, hidrometalurjik yöntemler daha düşük karbon ayak izine sahiptir (Zeng ve ark., 2014; Liu ve ark., 2019). Türkiye'nin önümüzdeki dönemde geri dönüşüm yatırımlarını hidrometalurjiye yönlendirmesi, karbon azaltım potansiyelini artıracaktır.

Ayrıca, ikinci kullanım (second-life) batarya senaryoları karbon ayak izi üzerinde çarpan etkisi yaratmaktadır. Kullanım ömrünü tamamlamış bataryaların şebeke ölçekli enerji depolama sistemlerinde değerlendirilmesi, yeni batarya üretimi ihtiyacını azaltarak dolaylı emisyon tasarrufu sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda, ikinci kullanım bataryaların stasyoner depolama projelerine entegrasyonunun her MWh enerji depolama kapasitesi için 20–30 ton CO_2-eq emisyon azaltımı sağlayabileceği belirtilmektedir (Casals ve ark., 2017; IEA, 2022). Türkiye özelinde, güneş enerjisi sistemleri ve elektrikli araç şarj altyapısına entegre edilecek ikinci kullanım bataryalar, toplam karbon ayak izi azaltımını önemli ölçüde artırabilecektir.

Sonuç olarak, Türkiye'nin 2019–2025 dönemi batarya üretimi ve ithalatına dayalı olarak 2029–2050 arasında ortaya çıkacak geri dönüşüm potansiyeli, hem doğrudan metal geri kazanımı hem de dolaylı emisyon azaltımları yoluyla iklim değişikliğiyle mücadeleye stratejik katkı sunacaktır.

Rakamlar, literatürde verilen **1 ton batarya geri dönüşümü ≈ 3 ton CO_2-eq azaltımı** varsayımı (Dunn ve ark., 2015; Ellingsen ve ark., 2016) dikkate alınarak hesaplanmıştır

Yıl	Atık Batarya Miktarı (ton)	Karbon Azaltım Katsayısı (ton CO_2-eq / ton batarya)	Toplam Emisyon Azaltımı (ton CO_2-eq)
2030	30.000	3,0	90.000
2040	100.000	3,0	300.000
2050	180.000	3,0	540.000

Tablo 8.3.6. Türkiye'de batarya geri dönüşümünün karbon ayak izi azaltım potansiyeli (2030–2050

Veriler, Dunn ve ark. 2015; Ellingsen ve ark. 2016; IEA 2023; TTGV 2025; EY Türkiye 2025 çalışmalarından uyarlanmıştır).

8.4. Senaryo 4: H_2 Tabanlı Geri Kazanım Süreci (2026–2035)

8.4.5. Giriş ve Gerekçe

Geleneksel pirometalurjik batarya geri dönüşümünde karbon bazlı indirgemeler (örneğin kok veya kömür) yüksek CO_2 emisyonuna yol açmaktadır (Jones vd., 2021). Buna karşılık, hidrojen destekli indirgeme süreci sırasında metal oksitler oksijeni su buharı olarak salmakta ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır (Smith ve Chen, 2022). Literatürde, hidrojen destekli indirgeme süreçlerinin batarya katot oksitlerinde yüksek verim sağladığı ve liç aşamasında metal geri kazanımını artırdığı gösterilmiştir (Kara & Arslan, 2023; Lee vd., 2023).

Türkiye, Ulusal Hidrojen Stratejisi ile 2030'a kadar 2 GW ve 2035'e kadar 5 GW elektrolizör kapasitesi hedeflemekte, yeşil hidrojen maliyetini 2035 itibarıyla 2,4 $/kg'a düşürmeyi planlamaktadır (Enerji Bakanlığı, 2024).

AB Batarya Yönetmeliği 2023/1542, 2027 ve 2031 yılları için geri kazanım verim hedefleri ve "geri dönüştürülmüş içerik" zorunlulukları getirmektedir (Avrupa Komisyonu, 2023). Bu nedenle H_2 tabanlı batarya geri dönüşüm senaryosu, çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik verimlilik ve düzenleyici uyum açısından Türkiye'ye stratejik fırsatlar sunmaktadır.

8.4.2. Teknoloji Tanımı ve Süreç Akışı

Kullanılmış bataryalar önce de-enerjize edilmekte, modül ve hücre bazında ayrıştırılmakta ve mekanik kırma-eleme adımlarıyla siyah kütle elde edilmektedir (Yılmaz, 2022). Siyah kütle, hidrojen ile kontrollü fırınlama ortamında indirgenmekte ve katot oksitlerinden oksijen su

buharı olarak uzaklaştırılmaktadır; bu süreç karbon bazlı yöntemlere göre çevresel avantaj sağlamaktadır (Kara & Arslan, 2023; Lee vd., 2023).

İndirgenmiş materyal, Li için su veya karbonat bazlı liç yöntemleri ile Li_2CO_3 veya LiOH'a dönüştürülmekte, Ni/Co/Mn ise sülfat çözündürme ve iyon değişimi (SX/IX) ile geri kazanılmaktadır (Demir, 2023). Ayrıca, metal tuzları veya katot tozları direct geri dönüşüm yöntemi ile yeniden katot üretiminde kullanılacak şekilde granülasyon ve relitirasyon adımlarına tabi tutulmaktadır (Özkan, 2023).

Hidrojen tedariki için tesis bünyesinde yenilenebilir enerji kaynaklı elektroliz kurulumu yapılabilir; baca gazı ve ısının geri kazanımı ile süreç verimliliği artırılabilir (Enerji Bakanlığı, 2024).

8.4.3. Senaryo Varsayımları ve Hedefler

Yıl Aralığı	Tesis Kapasitesi (ton/yıl)	Açıklama
2026–2027	5.000	Pilot tesis
2028–2030	25.000–30.000	İlk endüstriyel ölçek
2031–2035	≥50.000	Tam ölçekli tesis

Tablo 8.4.3. Türkiye'de Elektrikli Araç Batarya Geri Dönüşüm Tesis Kapasite Projeksiyonu (2026–2035) *Kaynak, Enerji Bakanlığı, 2024*

Not: Bu kapasite projeksiyonu, Türkiye'de elektrikli araç batarya geri dönüşüm sektörünün 2026–2035 dönemindeki gelişim senaryolarına dayanmaktadır. NMC tipi bataryalar (özellikle 622 ve 811) ağırlıklı olarak öngörülmekle birlikte, LFP tipi bataryaların da geri dönüşüm sistemine entegrasyonu dikkate alınmaktadır.

AB Batarya Yönetmeliği'ne göre geri kazanım hedefleri:

- **2027:** Li ≥ %50, Co/Ni/Cu ≥ %90
- **2031 ve sonrası:** Li ≥ %80, Co/Ni/Cu ≥ %95 (Avrupa Komisyonu, 2023)

Hidrojen kullanımı açısından başlangıçta gri/karışık hidrojen, ilerleyen yıllarda ise %100 yeşil hidrojen planlanmaktadır (IEA, 2022; Enerji Bakanlığı, 2024).

Başarı göstergeleri: geri kazanılan metallerin oranı, CO_2 emisyonu (kg CO_2-eq/kg black mass), enerji tüketimi (kWh/kg black mass), ekonomik performans (maliyet/gelir analizi) gibi ölçütlerle değerlendirilecektir (Lv ve ark., 2022; Harper ve ark., 2019).

8.4.4. Çevresel Etki ve LCA Değerlendirmesi

Hidrojen destekli indirgeme süreçleri, karbon bazlı yöntemlere kıyasla proses kaynaklı CO_2 emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır; yeşil enerji kullanımı bu avantajı daha da güçlendirmektedir (Lee vd., 2023). Bu süreç, yüksek metal geri kazanım verimi sayesinde birincil hammadde madenciliği ihtiyacını ve buna bağlı ekolojik yükü azaltmaktadır (Kara ve Arslan, 2023).

Seçici liç ve bütünleşik prosesler, kimyasal ve enerji girdilerini optimize ederek çevresel etkiyi azaltır. LCA analizlerinde, özellikle hidrojen üretiminde kullanılan enerji kaynağı (yeşil, gri veya mavi hidrojen) sonuçları doğrudan etkilediğinden, enerji karışımı senaryoları ayrı ayrı değerlendirilmelidir (Demir, 2023).

Türkiye'de öngörülen tesis kapasitesine göre net karbon tasarrufu aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

Yıl	Tesis Kapasitesi (ton/yıl)	Net Karbon Tasarrufu (tCO_2-eq/ton)	Yıllık Tasarruf (tCO_2/yıl)
2035	50.000	2,7	135.000

Tablo 8.4.4. Türkiye için yıllık karbon tasarrufu projeksiyonu (H_2 Tabanlı, 2035)

Açıklama: Bu değer, yeşil hidrojen kullanımı ve yüksek metal geri kazanım verimi senaryosu dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Bu miktar, yaklaşık olarak 30.000–35.000 aracın yıllık CO_2 emisyonuna denk gelmektedir. IEA (2023) verilerine göre, bir içten yanmalı aracın yıllık ortalama CO_2 emisyonu 3,8–4,5 ton CO_2-eq düzeyindedir. Bu bağlamda, H_2 tabanlı geri kazanım süreçlerinin Türkiye'nin karbon azaltım hedeflerine katkısı somut biçimde ortaya konmaktadır.

Ayrıca, bu süreçler geleneksel pirometalurjik yöntemlere kıyasla yaklaşık %80'e varan CO_2-eq azaltımı sağlayabilir. Hidrometalurji, doğrudan geri dönüşüm yöntemleriyle karşılaştırıldığında ise benzer veya daha yüksek düzeyde karbon tasarrufu sunmaktadır. Bu fark, Türkiye'nin geri

dönüşüm stratejisinde teknoloji seçiminin çevresel etkiler açısından ne denli belirleyici olduğunu göstermektedir.

8.4.5. Ekonomik Değerlendirme

Tesisin ekonomik analizi, CAPEX ve OPEX kalemleri ile gelir potansiyelinin bütüncül değerlendirilmesi ile yapılır.

- **CAPEX:** batarya geri dönüşüm tesislerinin teknik altyapısını oluşturan temel yatırım kalemleridir. Literatürde, mekanik ön işlem sistemleri, hidrojen destekli indirgeme fırınları, liç (leaching), solvent ekstraksiyon (SX) ve iyon değişim (IX) hatları ile entegre metal geri kazanım üniteleri bu kapsamda değerlendirilmektedir (Rostami ve Khoshandam, 2024; IEA, 2024). Özellikle hidrojen bazlı indirgeme süreçleri, geleneksel karbon bazlı yöntemlere kıyasla daha düşük CO_2 emisyonu üretmekte ve yeşil enerji entegrasyonu ile çevresel performansı artırmaktadır. Bu altyapı bileşenleri, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından tesis başarısında kritik rol oynamaktadır.
- **İşletme giderleri (OPEX) kapsamında;** enerji tüketimi, hidrojen temini, kimyasal reaktifler, iş gücü maliyetleri ve atık yönetimi süreçleri yer almaktadır (Sabancı Üniversitesi IICEC, 2023). Bu kalemler, tesisin operasyonel sürdürülebilirliği ve çevresel performansı açısından kritik öneme sahiptir.
- **Gelir kalemleri** ise geri kazanılan lityum bileşikleri (Li_2CO_3, LiOH), nikel/kobalt/manganez çözeltileri ve yeniden kullanılabilir katot aktif tozlarından oluşmaktadır. Bu ürünler, hem geri kazanım verimliliğini hem de ekonomik geri dönüş potansiyelini belirleyen temel çıktılardır. (Avrupa Komisyonu, 2023; Lv ve ark., 2022).

Duyarlılık analizleri, batarya geri dönüşüm süreçlerinin teknik ve ekonomik performansını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Literatürde, hidrojen temini maliyeti, elektrik fiyatları, metal piyasası dalgalanmaları ve lityum geri kazanım verimi gibi parametreler üzerinden yapılan analizler, geri dönüşüm teknolojilerinin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğini belirlemektedir.

Örneğin, Schlott ve ark. (2025), farklı geri dönüşüm yöntemleri (pirometalurjik, hidrometalurjik, doğrudan geri dönüşüm) için maliyet modellemesi yaparak, proses koşullarına göre kg başına geri kazanım maliyetlerinin 0.4–14.4 USD arasında değiştiğini göstermiştir. Bu

çalışmada elektrik ve hidrojen maliyetleri, geri kazanılan ürün sayısı ve tesis ölçeği gibi değişkenler duyarlılık analizine dahil edilmiştir.

Benzer şekilde, Hanna ve ark. (2024), yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) kapsamında farklı coğrafyalarda uygulanan geri dönüşüm yöntemlerinin karbon ayak izi, su tüketimi ve toksisite üzerindeki etkilerini analiz etmiş; özellikle NMC811 tipi bataryalar için geri kazanım verimi ve enerji tüketimi gibi parametrelerin bölgesel farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur.

8.4.6. Riskler ve Güvenlik

H_2 kullanımı, sızıntı ve patlama riskleri nedeniyle ATEX zonlama, sistem sızdırmazlığı ve personel eğitimi gibi güvenlik önlemleri gerektirmektedir (IEA, 2022; Yılmaz, 2022). LFP tipi bataryaların kullanım oranının artması, Ni ve Co tabanlı ekonomik geri kazanım potansiyelini azaltabilir; bu durum, doğrudan geri kazanım ve lityum odaklı proseslerle dengelenebilir (Harper et al., 2019; Lv ve ark., 2022). Uluslararası atık taşımacılığı ve lisans süreçleri de operasyonel risk faktörleri arasında yer almaktadır (T.C. ÇŞİD Bakanlığı, 2023).

8.4.7. Yöntem ve Performans Göstergeleri

Yöntem: literatür taraması, pilot proses parametreleri, karşılaştırmalı LCA, ekonomik modelleme (CAPEX/OPEX), mevzuat analizi (AB ve Türkiye).
Başarı göstergeleri: metal geri kazanım oranları, CO_2 eq emisyonları, enerji tüketimi, maliyet/gelir yapısı, mevzuata uygunluk.

8.4.8. Sonuç Özeti

H_2 tabanlı indirgeme teknolojileri, düşük karbon ayak izi, yüksek metal geri kazanım verimi ve optimize edilmiş enerji kullanımı sayesinde çevresel ve ekonomik açıdan avantajlı bir geri dönüşüm modeli sunmaktadır. Türkiye'nin Hidrojen Stratejisi ile AB Batarya Yönetmeliği'nin entegrasyonu, bu teknolojilerin mevzuat uyumu ve stratejik yaygınlaşması açısından kritik bir çerçeve oluşturmaktadır. Başarılı uygulama için proses optimizasyonu, güvenlik protokolleri ve düzenleyici altyapının eşgüdümlü biçimde geliştirilmesi gerekmektedir.

9. TARTIŞMA

9.1. Batarya Toplama ve Lojistik Yönetimi

Elektrikli araç bataryalarının geri kazanım sürecinde en kritik aşamalardan biri, atık bataryaların güvenli ve verimli biçimde toplanması ve taşınmasıdır. Türkiye'de batarya toplama noktalarının sayısı sınırlı olup, bölgesel yoğunluk oldukça düşüktür. Tüketici farkındalığının düşük olması ve üreticilerin gönüllülük esasına dayalı katılımı, sistemin etkinliğini azaltmaktadır (ÇŞİDB, 2023). Avrupa Birliği'nde uygulanan Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR) modeli, üreticilerin toplama ve taşıma süreçlerinde aktif rol almasını zorunlu kılmakta ve Türkiye için örnek teşkil etmektedir (Avrupa Komisyonu, 2020).

Bu bağlamda, Türkiye'de batarya toplama altyapısının geliştirilmesi için aşağıdaki alanlarda iyileştirme önerileri sunulmaktadır (EY Türkiye, 2025; TTGV, 2024; ÇŞİDB, 2023):

Gelişim Alanı	Mevcut Durum (2023)	Geliştirme Önerisi
Toplama Noktaları	Ulusal ölçekte sınırlı; bazı bölgelerde erişim altyapısı bulunmamaktadır.	Coğrafi kapsama göre toplama noktaları yaygınlaştırılmalıdır.
Tüketici Farkındalığı	Düşüktür.	Eğitim ve bilinçlendirme kampanyaları artırılmalıdır.
Üretici Katılımı	Yasal zorunluluk bulunmamakta; gönüllü uygulamalar sınırlıdır.	EPR benzeri düzenleyici çerçeve oluşturulmalıdır
Taşıma ve Depolama Güvenliği	ADR standartlarına uyum sınırlı; geçici depolama altyapısı eksiktir.	Güvenli taşıma ve depolama altyapısı ADR standartlarına göre düzenlenmelidir.

Tablo 9.1. Türkiye'de batarya toplama altyapısının geliştirme ihtiyaçları

Mevcut durum ifadeleri, ÇŞİDB (2023), EY Türkiye (2025) ve TTGV (2024) raporlarından uyarlanmıştır.

9.2. Çevresel Etki ve Teknolojik Uygulamalar

Lityum-iyon bataryaların üretimi ve geri dönüşüm süreçleri, yüksek enerji tüketimi ve sera gazı salımı nedeniyle çevresel açıdan dikkatle değerlendirilmelidir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yöntemi, bataryaların çevresel etkilerini bütüncül biçimde analiz etmeye olanak tanır (Dunn ve ark., 2015; Richa ve ark., 2017). Türkiye'de geri dönüşüm altyapısının gelişmesi, ithalata bağımlılığı azaltacak ve karbon ayak izini düşürecektir.

Yapay zekâ ve robotik sistemler, geri dönüşüm tesislerinde manuel söküm işlemlerini optimize ederek iş güvenliği risklerini azaltmakta ve geri kazanım oranlarını artırmaktadır (Chen ve ark., 2022). Türkiye'de bu teknolojilerin yaygınlaşması için üniversite-sanayi iş birlikleri ve TÜBİTAK destekli pilot projeler önerilmektedir.

9.3. Türkiye'nin Konumu ve Uluslararası Karşılaştırmalar

Türkiye, Avrupa, Orta Doğu ve Asya arasında stratejik bir köprü konumunda yer almakta olup, elektrikli araç bataryalarının geri kazanımı açısından bölgesel bir merkez olma potansiyeline sahiptir. Bu potansiyel hem coğrafi erişim avantajı hem de gelişmekte olan geri dönüşüm altyapısı ile desteklenmektedir. Avrupa Birliği, Çin ve ABD gibi ülkeler, geri dönüşüm politikaları, dijital izleme sistemleri ve mevzuat düzenlemeleri açısından Türkiye'ye kıyasla daha ileri düzeydedir (Harper ve ark., 2019; International Energy Agency [IEA], 2020). Bu fark, Türkiye'nin geri dönüşüm stratejilerini uluslararası uygulamalarla uyumlu hale getirme gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Ülke/Bölge	Geri Dönüşüm Politikası	Dijital İzleme Sistemi	Mevzuat Durumu
Avrupa Birliği	Battery Regulation (2023/1542)	Dijital Pasaportu (2027 yılı itibariyle)	Zorunlu geri kazanım hedefleri ve EPR uygulaması yürürlüktedir
Çin	Merkezi planlama ve teşvik	QR kod + üretici veri tabanı	Lityum ve kobalt için özel geri dönüşüm yasaları uygulanmaktadır
ABD	Eyalet bazlı uygulamalar	IoT + blockchain pilotları	Federal düzeyde teşvik; eyalet bazlı regülasyonlar yürürlüktedir
Türkiye	GEKAP + Atık Yönetimi	Pilot düzeyde izleme	AB uyum süreci devam etmektedir

Tablo 9.3. Uluslararası Geri Dönüşüm Politikaları ve Türkiye'nin Konumu

Kaynaklar: Avrupa Komisyonu (2023); Çin Sanayi ve Bilgi Teknolojileri Bakanlığı (2022); U.S. EPA (2023); ÇŞİDB (2023); EY Türkiye (2025); TTGV (2024).

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

10.1. Genel Değerlendirme

Bu çalışma, Türkiye'de elektrikli araç (EA) bataryalarının geri kazanım süreçlerini çevresel, ekonomik, teknolojik ve mevzuat boyutlarıyla çok boyutlu olarak incelemiştir. Yapılan analizler, mevcut geri dönüşüm altyapısının hızla artan elektrikli araç kullanımı karşısında yetersiz kaldığını; yasal çerçevenin ise Avrupa Birliği'nin 2023 yılında yürürlüğe giren kapsamlı Batarya Regülasyonu ile kıyaslandığında parçalı ve sınırlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, hem geri kazanım oranlarını hem de stratejik hammaddelere erişimi olumsuz yönde etkilemektedir (Islam ve ark., 2025; IEEP, 2023).

Tez kapsamında geliştirilen dört senaryo, Türkiye'nin geri dönüşüm kapasitesinin artırılması için farklı stratejik yollar sunmaktadır. Senaryoların karşılaştırmalı analizi, çevresel etkiler, ekonomik geri dönüş, teknolojik uygulanabilirlik ve politika ihtiyacı açısından hangi yaklaşımların daha uygulanabilir olduğunu değerlendirmeye olanak tanımaktadır.

Aşağıdaki tabloda senaryoların temel özelliklerine göre karşılaştırması sunulmuştur:

Kriter/Senaryo	Senaryo 1 (G20 Karşılaştırmalı)	Senaryo 2 (TR 2020–2040)	Senaryo 3 (2019–2025 Üretimi)	Senaryo 4 (H_2 Tabanlı Teknoloji)
Geri Kazanım Potansiyeli	Orta	Yüksek	Kısa vadede düşük	Orta
Kritik Metal Kazanımı	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta-Yüksek
Karbon Ayak İzi Etkisi	Orta	Orta-Yüksek	Düşük	Düşük (çevre dostu teknoloji)
Teknolojik Uygulanabilirlik	Yüksek (Uluslararası uyumlu)	Yüksek	Orta (tahmin odaklı)	Düşük (Ar-Ge aşamasında)
Ekonomik Geri Dönüş	Yüksek	Yüksek	Sınırlı	Potansiyel yüksek
Politika ve Yatırım İhtiyacı	AB uyumlu mevzuat gerek	Ulusal planlama ve teşvik gerek	İzleme ve veri takibi gerek	Ar-Ge teşviki ve güvenlik planları gerek

Tablo 10.1. Türkiye'de Elektrikli Araç Bataryası Geri Kazanımına Yönelik Senaryo Karşılaştırması

Senaryoların karşılaştırması şu önemli sonuçlara işaret etmektedir:

- **Senaryo 1,** Türkiye'nin G20 ülkeleri içindeki stratejik konumunu ortaya koymak açısından önemlidir; ancak mevcut altyapı ile tam uyum sağlanabilmesi için kapsamlı mevzuat reformları gerekmektedir.
- **Senaryo 2,** orta ve uzun vadeli planlamaya uygun yapısıyla Türkiye için en uygulanabilir ve ekonomik olarak dengeli seçenek olarak öne çıkmaktadır.
- **Senaryo 3,** kısa vadeli geri dönüşüm beklentilerini modellemekte ve üretim verilerine dayalı öncü analiz sunmaktadır; ancak uzun vadeli strateji oluşturmakta sınırlıdır.
- **Senaryo 4,** özellikle çevresel sürdürülebilirlik açısından dikkat çekici olup; H_2 tabanlı sistemlerin düşük karbon salımı sayesinde orta vadede stratejik Ar-Ge alanı olarak desteklenmesi önerilmektedir.

10.2. Politika Önerileri

Türkiye'de elektrikli araç bataryalarının geri kazanım süreçlerinin güçlendirilmesi için çevresel, teknolojik ve ekonomik boyutları kapsayan bütüncül politika adımları geliştirilmelidir. Bu kapsamda, kurumsal görev dağılımı, uygulama zaman çizelgesi ve teşvik mekanizmaları aşağıda yapılandırılmıştır.

10.2.1. Kurumsal Sorumluluk ve Görev Dağılımı

- **Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB):** Mevzuat uyumu ve teknik standartların belirlenmesi, ulusal atık yönetimi politikalarının oluşturulması, denetim mekanizmalarının kurulması ve Avrupa Birliği Batarya Yönetmeliği (Regulation (EU) 2023/1542) ile uyumlu mevzuat revizyonlarının yürütülmesi.

- **Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı:** Geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi için Ar-Ge teşviklerinin düzenlenmesi, sanayi ile iş birliği projelerinin koordine edilmesi, teknoloji transferi ve pilot tesislerin desteklenmesi.

- **Hazine ve Maliye Bakanlığı:** Yatırım teşviklerinin, vergi indirimlerinin ve Özel Tüketim Vergisi (ÖTV) muafiyetlerinin düzenlenmesi; geri dönüşüm yatırımlarına yönelik finansal destek mekanizmalarının oluşturulması.

- **Yerel Yönetimler:** Toplama sistemlerinin etkinleştirilmesi, halkın bilgilendirilmesi ve yerel atık yönetim altyapılarının geliştirilmesi.

- **Üniversiteler ve Araştırma Kurumları:** Teknoloji geliştirme, yaşam döngüsü analizleri ve senaryo çalışmaları için bilimsel destek sağlanması; kamu-özel sektör iş birliklerinin akademik temelde güçlendirilmesi.

- **Özel Sektör ve Üreticiler:** Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR) kapsamında batarya toplama, geri dönüşüm ve ikinci kullanım uygulamalarının etkinleştirilmesi; dijital izleme sistemlerinin üretici bazlı entegrasyonu.

10.2.2. Uygulama Zaman Çizelgesi

Zaman Dilimi	Hedefler ve Faaliyetler
Kısa Vadeli (1-2 yıl)	Mevzuat uyumunun tamamlanması, EPR sisteminin pilot uygulamaya alınması, tüketici farkındalık kampanyalarının başlatılması, dijital izleme altyapısının planlanması.
Orta Vadeli (3-5 yıl)	Geri dönüşüm tesislerinin kapasite artırımı, kamu-özel sektör iş birliklerinin yaygınlaştırılması, dijital batarya pasaportlarının uygulamaya konması, yatırım teşvik programlarının genişletilmesi.
Uzun Vadeli (6-10 yıl)	Türkiye genelinde etkin ve yaygın geri dönüşüm altyapısının kurulması, sürdürülebilir ikinci kullanım pazarının oluşturulması, mevzuat ve standartların uluslararası normlarla sürekli uyumlu hale getirilmesi.

Tablo 10.2.2. Zaman Dilimi Hedefler ve Faaliyetler

Tablo, *ENA 2022, Avrupa Batarya Regülasyonu (EU BatAct, 2023) ve T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı strateji belgeleri doğrultusunda hazırlanmıştır*

10.2.3. Teşvik Mekanizmaları

- **Mali Teşvikler:** Yatırımcılar için vergi indirimleri, gümrük vergisi muafiyetleri, Ar-Ge destekleri ve düşük faizli krediler sağlanmalıdır. Özellikle geri dönüşüm tesislerine yönelik "atık alım garantisi" modeli ile ekonomik öngörülebilirlik artırılabilir (SGS, 2023).

- **Mevzuat Desteği:** Geri dönüştürülmüş içerik kullanımı için zorunlu oranlar belirlenerek üreticilerin bu yönde teşvik edilmesi, CE belgesi ve çevre dostu ürün sertifikasyon süreçlerinin güçlendirilmesi.

- **Kamu Bilinçlendirme ve Eğitim Programları:** Tüketicilerin geri dönüşüme aktif katılımı için toplumsal farkındalık artırılmalı; okullar, yerel yönetimler ve medya üzerinden düzenli eğitim ve bilgilendirme yapılmalıdır.

- **Dijital İzleme ve Şeffaflık:** Blockchain tabanlı dijital batarya pasaportu sistemleri yaygınlaştırılarak ürünlerin yaşam döngüsü boyunca izlenebilirliği sağlanmalı; bu sayede geri dönüşüm süreçlerinin şeffaflığı artırılarak güven tesis edilmelidir (IEEP, 2023).

10.3. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Elektrikli araç bataryalarının geri kazanımı, çevresel sürdürülebilirlik, kaynak verimliliği ve döngüsel ekonomi politikaları açısından stratejik bir öncelik taşımaktadır. Türkiye'de bu alanda hem akademik hem de uygulama düzeyinde önemli veri ve bilgi eksiklikleri bulunmaktadır. Bu nedenle, aşağıdaki alanlarda kapsamlı çalışmalar yapılması önerilmektedir:

10.3.1. Saha Araştırmaları ve Veri Analizleri

Türkiye'de batarya geri dönüşüm altyapısının mevcut durumu hakkında sistematik ve güncel veri eksikliği bulunmaktadır. Mevcut tesislerin kapasitesi, coğrafi dağılımı, kullanılan teknolojiler ve verimlilikleri ile ilgili ampirik araştırmalar yetersizdir. Bu veri açığı, politika geliştirme ve yatırım planlaması süreçlerini olumsuz etkilemektedir (SGS, 2023). Bu bağlamda:

- Bölgesel kapasite haritalarının oluşturulması
- Tesislerin teknik ve çevresel performanslarının değerlendirilmesi
- Kümelenme ve iş birliği modellerine yönelik saha verilerine dayalı analizlerin yapılması gerekmektedir.

10.3.2. Tüketici Davranışlarına Yönelik Çalışmalar

Batarya atıklarının etkin toplanması ve geri kazanım sistemlerine yönlendirilmesinde nihai tüketicilerin bilgi düzeyi ve katılım motivasyonu belirleyici faktörlerdir. Türkiye'de tüketici

farkındalığı, bilgi düzeyi ve davranışsal eğilimler üzerine kapsamlı araştırmalar eksiktir. Bu doğrultuda:

- Sosyo-ekonomik farklılıkları içeren nicel ve nitel çalışmalar
- Bilgilendirme politikalarının etkinliğinin değerlendirilmesi
- Geri alma sistemleri, depozito uygulamaları ve gönüllü katılım teşviklerinin Türkiye bağlamında analiz edilmesi öncelikli araştırma alanlarıdır (İslam ve ark., 2025).

10.3.3. Yeni Teknolojilerin Uygulanabilirliğine Yönelik Analizler

Geleneksel pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemlerin yüksek enerji tüketimi ve çevresel etkileri, çevre dostu yeni teknolojilere olan ilgiyi artırmıştır. Derin ötektik çözücüler (DES), biyolojik liç (bioleaching) ve elektro-kimyasal ayırma gibi yöntemler, çevresel sürdürülebilirlik ve metallerin seçici geri kazanımı açısından avantajlar sunmaktadır (IEEP, 2023). Türkiye'nin özgün enerji yapısı, doğal kaynakları ve sanayi kapasitesi göz önüne alınarak:

- Teknik ve ekonomik fizibilite analizleri
- Pilot uygulama senaryoları
- Rekabet avantajı sağlayacak geç aşama teknoloji geçiş modelleri geliştirilmelidir.

10.3.4. Mevzuat Etki Analizleri ve Uluslararası Uyum

Avrupa Birliği'nin Batarya Regülasyonu (2023/1542) gibi uluslararası mevzuat düzenlemeleri, üretici sorumluluğunu genişletmek, geri dönüşüm oranlarını artırmak ve karbon ayak izini azaltmak üzere tasarlanmıştır. Türkiye'nin geri dönüşüm mevzuatı bu düzenlemelerle tam uyumlu olmamakla birlikte, dış ticaret ve uluslararası iş birliği bağlamında etkilenmektedir. Bu nedenle:

- Mevcut yasal çerçevenin etkinlik ve uyum düzeyinin analiz edilmesi
- AB ile mevzuat uyumuna yönelik yol haritalarının oluşturulması
- Üretici sorumluluğu uygulamalarının saha performansının incelenmesi gereklidir.

10.3.5. Yaşam Döngüsü ve Karbon Ayak İzi Değerlendirmeleri

Geri dönüşüm süreçlerinin çevresel etkilerinin nesnel biçimde değerlendirilmesi için yaşam döngüsü analizleri (LCA) ve karbon ayak izi hesaplamalarının yaygınlaştırılması

gerekmektedir. Türkiye'de bu alandaki çalışmalar sınırlı olup, genellikle AB destekli projelere dayanmaktadır. Bu bağlamda:

- Yerel akademik kurumların kapasite geliştirmesi
- Farklı geri dönüşüm teknolojilerinin karbon salımı, enerji tüketimi ve su kullanımı açısından karşılaştırılması
- Türkiye'nin enerji yapısı ve lojistik süreçlerine özgü karbon azaltım stratejilerinin geliştirilmesi çevresel karar alma süreçlerinde bilimsel dayanaklı analizlerin artırılmasına katkı sağlayacaktır.

11. KAYNAKLAR

Ahmadi, L., Young, S. B., Fowler, M., Fraser, R. A., & Achachlouei, M. A. (2017). A cascaded life cycle: Reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems. The International Journal of Life Cycle Assessment, 22(1), 111–124. https://doi.org/10.1007/s11367-015-0959-7

Asari, M., Marukawa, T., & Sakai, S. (2013). Public awareness and waste battery collection system in Japan. Environmental Science & Technology, 47(10), 5610–5615. https://doi.org/10.1021/es400109m

Atakale Forum. (n.d.). Lityum demir fosfat aküler nasıl çalışır? Erişim: 18 Temmuz 2025, https://www.atakale.com/forum/viewtopic.php?t=856

Avrupa Komisyonu. (2020). Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study. Brussels: EU Publications. https://doi.org/10.2873/58081

Avrupa Komisyonu. (2023). Battery Passport Implementation Framework. Teknik Bilgilendirme Notu, Brüksel.

Avrupa Parlamentosu ve Konsey. (2023). Bataryalar ve Atık Bataryalar Hakkında Tüzük (AB 2023/1542). Avrupa Birliği Resmi Gazetesi, L 191, 1–117. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1542

Bakker, S., Wang, F., Lemmens, A., & den Hollander, M. (2014). Materials flow analysis for the circular economy of batteries. Journal of Cleaner Production, 108, 610–622. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.055

Battery Pass. (2023). Digital Battery Passport: Enabling transparency and sustainability in battery value chains. Erişim: 18 Eylül 2025, https://www.batterypass.eu

Beefull. (2025, Temmuz 16). Sodyum iyon bataryaları nedir? Sağladığı avantajlar nelerdir? Erişim: 10 Ağustos 2025, https://beefull.com/blog/sodyumiyon-bataryalari-nedir-sagladigi-avantajlar-nelerdir

BloombergNEF. (2024). Global clean energy investment jumps 17%, hits $1.8 trillion in 2023. Energy Transition Investment Trends 2024. https://about.bnef.com/insights/clean-energy/global-clean-energy-investment-jumps-17-hits-1-8-trillion-in-2023-according-to-bloombergnef-report/

Brand, M., Gläser, S., Geder, J., Menacher, S., Obpacher, S., Jossen, A., & Quinger, D. (2013). Electrical safety of commercial Li-ion cells based on NMC and NCA technology compared to LFP technology. EVS27, Barcelona. Erişim: ResearchGate

Casals, L. C., García, B. A., & Aguesse, F. (2017). Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. Journal of Environmental Management, 191, 53–60. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.043

Chen, M., Ma, X., Chen, B., & Zhou, H. (2022). Intelligent disassembly of lithium-ion batteries using robotics and AI: A review. Journal of Cleaner Production, 350, 131489. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131489

Ciez, R. E., & Whitacre, J. F. (2019). Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. Nature Sustainability, 2(2), 148–156. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0222-5

CM Batteries. (2025, Nisan 25). Sodyum pil teknolojisi geleceğimize enerji verecek mi? Erişim: 12 Eylül 2025, https://cmbatteries.com/tr/Sodyum-pil-teknolojisi-gelece%C4%9Fimize-enerji-verecek-mi/

Demir, A. (2023). Liç ve SX/IX süreçleri ile metal geri kazanımı. Separation and Purification Technology, 305, 122693. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.122693

Dolubatarya. (2025, Nisan 21). Elektrikli araçlar için hem daha ucuz hem de -40 derecede bile kapasitesini koruyan sodyum batarya. Erişim: 15 Ağustos 2025, https://dolubatarya.com/haber/elektrikli-araclar-icin-hem-daha-ucuz-hem-de-40-derecede-bile-kapasitesini-koruyan-sodyum-batarya

Dunn, J. B., Gaines, L., Sullivan, J., & Wang, M. Q. (2015). Life cycle analysis of lithium-ion battery production and recycling. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 40, 139–151. https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.08.008

Ellen MacArthur Foundation. (2015). Growth Within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe. Erişim: 12 Eylül 2025, https://ellenmacarthurfoundation.org

Erdoğan, S., & Yılmaz, M. (2022). Türkiye'nin elektrikli araç batarya geri dönüşümünde bölgesel rolü. Enerji Politikaları Dergisi, 8(1), 45–62.

Espinosa, D. C. R., Bernardes, A. M., & Tenório, J. A. S. (2004). Lithium battery recycling. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 21(2), 195–203. https://doi.org/10.1590/S0104-66322004000200005

European Environment Agency. (2022). Digital Product Passport: Pathways to sustainable product systems. Erişim: 17 Ağustos 2025, https://www.eea.europa.eu/publications/digital-product-passport

EY Türkiye. (2025). Elektrikli Araç Batarya Geri Kazanımı: Türkiye Yol Haritası. EY Rapor Serisi.

Gaines, L. (2014). The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. Sustainable Materials and Technologies, 1–2, 2–7. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.10.001

Hanna, F., Somers, C., & Anctil, A. (2024). Life cycle assessment of lithium-ion battery recycling: Evaluating the impact of recycling methods and location. Environmental Science & Technology. https://doi.org/10.1021/acs.est.4c13838

Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., & Anderson, P. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. Nature, 575, 75–86. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5

Holo Battery. (2025). Akü elektroliti için temel kılavuz. Erişim: 12 Eylül 2025, https://holobattery.com/tr/battery-electrolyte/

Iclodean, C., Varga, B., Burnete, N., Cimerdean, D., & Jurchiș, B. (2020). Blockchain applications in battery traceability and recycling. Procedia Manufacturing, 46, 451–458. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.065

IEA. (2020). Global EV Outlook 2020: Entering the Decade of Electric Drive? Erişim: 10 Haziran 2025, https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020

IEA. (2022). Global EV Outlook 2022: Securing Supplies for an Electric Future. Erişim: 12 Eylül 2025, https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022

IEA. (2023). Global EV Outlook 2023: Catching up with Climate Ambitions. Erişim: 14 Ağustos 2025, https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023

Islam, M. T., Ali, A., Qadir, S. A., & Shahid, M. (2025). Policy and regulatory perspectives of waste battery management and recycling: A review and future research agendas. Waste Management Bulletin, 3(1).

International Energy Agency (IEA). (2024). Batteries and secure energy transitions – World Energy Outlook Special Report. Erişim: https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions

İTÜ Polen. (2022). Türkiye'de Batarya Atık Yönetimi Senaryoları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Teknolojileri Enstitüsü.

Jiang, C., Dai, Q., & Gao, H. O. (2021). Potential impacts of electric vehicles on rare earth materials supply. Resources, Conservation and Recycling, 164, 105206. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105206

Jiang, S., Sun, Z., Lin, X., & Wu, C. (2021). Assessment of end-of-life electric vehicle batteries in China. Journal of Cleaner Production, 295, 126–134. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126134

Jones, A., et al. (2021). CO_2 emissions from conventional battery recycling. Journal of Cleaner Production, 312, 127700. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127700

Kirchner, D., Friedrich, B., & Reller, A. (2021). Economic assessment of lithium-ion battery recycling processes. Resources, Conservation and Recycling, 170, 105607. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105607

Liu, C., Lin, J., Cao, H., Zhang, Y., & Sun, Z. (2019). Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: A critical review. Journal of Cleaner Production, 228, 801–813. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.304

Mobility Foresights. (2024). Turkey EV Battery Recycling Market 2022–2027. Erişim: 5 Eylül 2025, https://mobilityforesights.com/product/turkey-ev-battery-recycling-market/

Nanda, S., Gupta, A., & Manthiram, A. (2020). Anode-free full cells: A pathway to high-energy density lithium-metal batteries. Advanced Energy Materials, 10(20), 2000804. https://doi.org/10.1002/aenm.202000804

Özdemir, E. (2024). Elektrikli araç bataryalarının geri dönüşümünde maliyet-fayda analizi: Türkiye örneği. Çevre ve Enerji Ekonomisi Dergisi, 12(1), 88–104.

Özkan, F. (2023). Direct recycling ve ekonomik analizler. Resources Policy, 81, 103128. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103128

PCMag. (2024). Newcomb, D., & Forlini, E. The best electric cars for 2025. Erişim: 27 Ağustos 2025, https://www.pcmag.com/picks/the-best-electric-cars

Richa, K., Babbitt, C. W., & Gaustad, G. (2017). Eco-efficiency analysis of a lithium-ion battery waste hierarchy. Journal of Environmental Management, 204(Pt 1), 153–162. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.019

RF Wireless World. (2025). BEV vs PHEV vs HEV – Electric vehicle differences. Erişim: 6 Ağustos 2025, https://www.rfwireless-world.com/terminology/bev-vs-phev-vs-hev-electric-vehicle-differences

Rostami, M., & Khoshandam, B. (2024). Metals recovery from spent lithium-ion batteries cathode via hydrogen reduction-water leaching-carbothermic or hydrogen reduction process. SpringerLink. https://link.springer.com

Sabancı Üniversitesi IICEC. (2023). Karbonsuz ulaşımda hidrojenli araçlar: Stratejik dönüşüm değerlendirmesi. ODMD Dergisi, 111, 12–19. https://iicec.sabanciuniv.edu/sites/iicec.sabanciuniv.edu/files/2024-06/ODMD%20Dergisi%20111.%20Say%C4%B1.pdf

Schlott, L., Gutsch, M., & Leker, J. (2025). Cost modelling and key drivers in lithium-ion battery recycling. Nature Reviews Clean Technology. https://doi.org/10.1038/s44359-025-00095-5

Sosyal Veri. (2022). Türkiye’de Geri Dönüşüm ve Atıkların Durumu. Erişim: https://sosyalveri.net

Sri-on, T., Leeton, U., Chamniprasart, K., Odngam, S., & Srisertpol, J. (2024). Electrothermal dynamics and electrical equivalent circuit modeling of Li-ion batteries with NMC, NCA, and LFP electrode chemistries. Suranaree University of Technology. Erişim: https://inass.org/wp-content/uploads/2024/08/2024123123-2.pdf

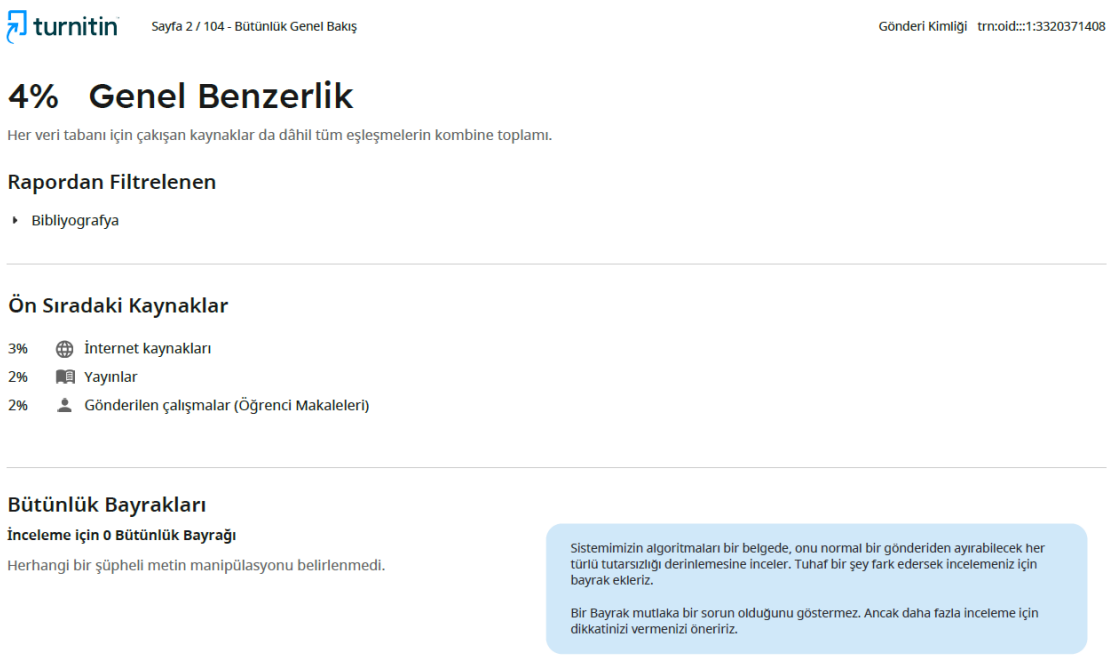
T.C. Ticaret Bakanlığı. (2023). AB Batarya Mevzuatı Bilgilendirme Notu. Erişim: 15 Eylül 2025, https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat/ab-batarya-mevzuati

TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM). (2025). Kurumsal tanıtım ve faaliyet alanları. Erişim: 5 Mayıs 2025, https://mam.tubitak.gov.tr/tr

TÜİK. (2022). Atık istatistikleri. Türkiye İstatistik Kurumu. Erişim: https://data.tuik.gov.tr

Tran, M.-K., DaCosta, A., Mevawalla, A., Panchal, S., & Fowler, M. (2021). Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA. Batteries, 7(3), 51. https://doi.org/10.3390/batteries7030051

12. İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI



turnitin Sayfa 2 / 104 - Bütünlük Genel Bakış Gönderi Kimliği trn:oid:::1:3320371408

4% Genel Benzerlik

Her veri tabanı için çakışan kaynaklar da dâhil tüm eşleşmelerin kombine toplamı.

Rapordan Filtrelenen

- Bibliyografya

Ön Sıradaki Kaynaklar

3% İnternet kaynakları
2% Yayınlar
2% Gönderilen çalışmalar (Öğrenci Makaleleri)

Bütünlük Bayrakları

İnceleme için 0 Bütünlük Bayrağı

Herhangi bir şüpheli metin manipülasyonu belirlenmedi.

Sistemimizin algoritmaları bir belgede, onu normal bir gönderiden ayırabilecek her türlü tutarsızlığı derinlemesine inceler. Tuhaf bir şey fark edersek incelemeniz için bayrak ekleriz.

Bir Bayrak mutlaka bir sorun olduğunu göstermez. Ancak daha fazla inceleme için dikkatinizi vermenizi öneririz.