

## DERLEME MAKALESİ

## Türkiye’de Elektrikli Araçlarda Kullanılan Tahrik Bataryalarına Yönelik Geri Dönüşüm Yaklaşımları

Orhan TOPAL

Yazışma yazarı:

Orhan TOPAL,  
otopal@aselsan.com.trAselsan A.Ş., Ankara, Türkiye.  
ORCID: 0000-0003-3857-5689

## Referans:

Topal, O. (2024). Türkiye’de Elektrikli Araçlarda Kullanılan Tahrik Bataryalarına Yönelik Geri Dönüşüm Yaklaşımları, *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 25(1), 37-46.

Makale Gönderimi : 14 MART 2024  
Online Kabul : 25 HAZİRAN 2024  
Online Basım : 1 TEMMUZ 2024

**Özet** Dünya genelinde artan elektrikli araç kullanımı, tasarımındaki en önemli alt bileşen olan yüksek gerilim tahrik bataryalarına olan ihtiyacı arttırmaktadır. Bu durumun, elektrikli araç tahrik bataryalarına yönelik ikincil ömür ve geri dönüşüm yaklaşımlarını geliştirerek, yakın gelecekte batarya endüstrisinin muhtemel çevresel etkilerine ve alt bileşenlerine yönelik hammadde tedarikine doğrudan katkı sunması beklenilmektedir. Satista tarafından yayınlanan bir raporda, otomotiv endüstrisindeki yaşanan eksen kayması ile birlikte 2025 yılına kadar bataryalı elektrikli araçlar için 45 kWh, plug in hibrit elektrikli araçlarda ise 11 kWh ortalama batarya kapasitesine ulaşılabileceği belirtilmiştir. Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryalarının başta kullanım ömürleri boyunca maruz kaldıkları nominalin dışındaki çalışma koşulları olmak üzere belirlenen yaşam döngüsüne esas şarj/deşarj sayılarının artması, şarj/deşarj döngüsündeki maksimize kullanım vb. hususlar, performans eğrilerinde yıllara sâri azalmalara sebep olmaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryaları için toplam kullanılabilir kapasitenin %80’ini koruması ve 24 saatlik bir zaman dilimi içinde en fazla %5’likdeşarj oranı (kullanılmaksızın), kullanılabilir yaşam döngüsü için belirleyici kriterler olarak nitelendirilmektedir. Türkiye’de 2023 Eylül itibari ile trafiğe kayıtlı M1, M2 ve M3 sınıfı elektrikli araçların toplam sayısı 248.756 adet olup, söz konusu bu araçların takribi 4,52 GWh’lik batarya kapasitesine sahip olduğu öngörülmektedir. Bu çalışma ile Türkiye ölçeğinde de elektrikli araç tahrik bataryalarının ikincil kullanımları sonrasını esas alan, geri dönüşüm yaklaşımları ön plana çıkarılmıştır. Bu yaklaşımlar, ikincil ömür uygulamaları sonrası için uygulanabilecek yeni bir konsept ve beraberinde ihtiyaç duyulacak yeni bir iş kolu olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte hammadde ve emtia fiyatlarındaki dalgalanmalar, jeopolitik durumlar ve uluslararası düzenlemeler nikel, manganez ve kobalt gibi yüksek katma değere sahip, yeni nesil batarya üretimleri için kullanılacak baz hammaddeler için geri dönüşümü daha da önemli kılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** elektrikli araçlar, tahrik bataryalarında geri dönüşüm, hidrometalurji ve pirometalurji yöntemleri

## Recycling Approaches for Propulsion Batteries on Electric Vehicles in Türkiye

**Abstract** The increasing use of electric vehicles worldwide is increasing the demand for high voltage traction batteries, which are the main sub-component in their design. This situation is expected to improve the secondary life and recycling approaches for electric vehicle drive batteries and directly contribute to the potential environmental impacts of the battery industry and the raw material supply for its sub-components in the near future. A report published by Satista states that the shift in the automotive industry will lead to an average battery capacity of 45 kWh for battery electric vehicles and 11 kWh for plug-in hybrid electric vehicles by 2025. Issues such as increasing the number of charge/discharge cycles based on the specified life cycle, maximising the use of the charge/discharge cycle, etc., in particular the operating conditions other than the nominal ones that the traction batteries used in electric vehicles are exposed to during their lifetime, cause a decrease in their performance curves over the years. For traction batteries used in electric vehicles, the maintenance of 80% of the total usable capacity and a maximum discharge rate of 5% (without use) within a 24-hour period are considered as the determining criteria for the usable life. In September 2023, the total number of M1, M2 and M3 class electric vehicles registered in Turkey will be 248,756 and it is estimated that these vehicles will have a battery capacity of approximately 4.52 GWh. In this paper, recycling approaches based on the post-use of electric vehicle drive batteries are brought to the forefront in Türkiye. This concept is considered as a new concept that can be applied for after the batteries are used for secondary life applications and a new business line that will be needed. In addition, fluctuations in raw material and commodity prices, geopolitical situations, and international regulations make the recycling of base raw materials with high added value, such as nickel, manganese, and cobalt, even more crucial for the production of next-generation batteries.

**Keywords:** electric vehicles, recycling on propulsion batteries, hydrometallurgy and pyrometallurgy process

## 1. Giriş

Dünya genelinde satışı gerçekleştirilen bütün yeni araçların 2020 yılında yaklaşık %5'i, 2021 yılında ise yaklaşık %9'u elektrikli araç olarak kayıtlara geçmiştir. Elektrikli araç pazarı 2022 yılına gelindiğinde bir önceki yıla göre %55 artarak 10 Milyonluk satış hacmine ulaşmış olup, bu değer satılan bütün yeni araçların %14'üne tekabül etmektedir. Küresel elektrikli otomobil satışı 2023 yılında da bir önceki yıla göre %35 artış ile 14 milyona yaklaşarak, satılan tüm otomobillerin %18'ine karşılık gelmiştir. Elektrikli otomobillerin 2024 yılı pazar payı, üreticiler arasındaki rekabet, düşen batarya/otomobil fiyatları ve devam eden politika desteğiyle Çin'de %45'e, Avrupa'da %25'e ve Amerika Birleşik Devletleri'nde %11 seviyesine ulaştığı; bu yönü ile satılan her beş araçtan birinden fazlasının elektrikli olarak kayıtlara geçtiği belirtilmiştir (BloombergNEF, 2024).

Elektrikli mobilite ile birlikte küresel ölçekte kullanımı artan elektrikli araçlar, pazar içerisindeki önemli alt bileşen olan tahrik bataryalarının da pazar hacminde büyümeyi gerektirmektedir. Buna bağlı olarak 2021 yılında 330 GWh olan otomotiv endüstrisinde kullanılan lithium-ion bazlı tahrik batarya talebi, 2022 yılında %65 artarak 550 GWh ulaşmıştır (Topal,2023; Electric Vehicle Outlook, 2023). Bununla birlikte bu çalışmaya esas, önümüzdeki on yıl içinde 100 Milyondan fazla elektrikli araçta kullanılan tahrik bataryasının ömrünü tamamlayarak, kullanılabilir olmaktan çıkmasının beklendiği ifade edilmektedir (Fleischmann vd., 2023).

Özellikle Çin gibi elektrikli araç kullanımının uzun süredir yaygın olduğu pazarlarda, ömrünü tamamlamış elektrikli araç tahrik bataryalarının büyük hacimlere ulaştığı bilinmektedir. Bu suretle elektrikli araç dönüşümünün (kullanımının) önemli oranda gerçekleştirildiği ülkelerde, ömrünü tamamlamış elektrikli araç tahrik batarya kapasitelerinin geri dönüşümü zorunlu kılacak miktarlara ulaştığı; ilgili otoriteler tarafından çeşitli yaptırımları içerisinde barındıracak uygulamaların yakın gelecekte hayata geçirilmesi beklenmektedir. Öyle ki McKinsey tarafından hazırlanan konuya dair raporda, 2030 yılı sonrası tahrik bataryaları üretimi için geri dönüşümü sağlanacak ömrünü tamamlamış tahrik bataryalarının ana kaynak olarak kullanılmasının beklendiği ifade edilmektedir (Fleischmann vd., 2023).

Otomotiv endüstrisi tarafından elektrikli araç üretimine esas belirlenen karbonsuzlaştırma ve etik tedarik zinciri hedefleri, tahrik batarya hücreleri için kullanılacak hammadde ihtiyacının geri dönüşüm marifetiyle elde edilmesi için motivasyon sağlarken; bu yönüyle yeni üretilen tahrik batarya hücreleri için kilovat-saat (kWh) başına %25'ten fazla daha düşük karbon ayak izi oluştuğu belirtilmektedir (Breiter vd., 2023). Beraberinde özellikle belli ülkelerin güdümünde olan tahrik bataryası üretiminde kullanılan hammaddelerin tedariki yerine, bunların lokal bazda geri dönüşüm marifeti ile elde edilmesi sayesinde üretim kaynakları için de avantaj sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Diğer taraftan konu ile ilgili hazırlanacak yasal düzenlemelerin başta ilgili kuruluşlar olmak üzere, elektrikli araçlarda

kullanılan tahrik bataryalarının geri dönüşümü konusunda teşvik sağlaması beklenilmektedir. İklim değişikliği ile mücadele ve yeşil dönüşüm hedefleri kapsamında AB tarafından yayımlanan Fit for 55 hedefleri kapsamında, 28 Temmuz 2023 tarihinde AB nezdinde yürürlüğe konulan 2023/851 sayılı tüzük, 2035 yılı itibarı ile kullanılacak binek ve hafif ticari araçların karbon emisyonuz olmasını amaçlamaktadır (EU Regulation 2023/851,2023). Buna göre hafif ulaştırma araçları, endüstriyel, elektrikli araç tahrik bataryalarının içeriğine ve geri dönüşüm oranına ilişkin etiketlemenin 2026 yılında; dijital batarya pasaportuna geçişin de 2027 yılında sağlanacağı bildirilmiştir (Ticaret Bakanlığı, AB Batarya Mevzuatı, 2023).

Avrupa Birliği'nin emisyonlarını 2030 yılına kadar en az %55 oranında azaltma yönündeki iklim politika hedefine ulaşmayı yasal bir zorunluluk haline getirmesi; üye ülkeleri hedef doğrultusunda 2050 yılına kadar karbon nötr hale getirmek için yeni mevzuat düzenlemeleri konusunda çalışmaları hızlandırmaktadır (Kettner & Wretschitsch, 2023). Bu kapsamda yürütülen projelerle, elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryaları için karbon ayak izlerinin yayınlanması zorunlu kılınmış ve yeni üretilen elektrikli araç tahrik bataryaları için maksimum geri dönüşüm içeriği sağlanmasına dair gereksinimler ortaya konulmuştur. Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryaları için atık yönetiminde Avrupa Birliği pazarında üretici/ithalatçı/distribütör için Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu kavramı getirilmiş ve yükümlülüklerin yerine getirilmesine yönelik hedefler ortaya konulmuştur. Bu minvalde 2028 yılı sonu itibarı ile elektrikli skuter, elektrikli bisiklet gibi hafif taşıma araçlarındaki atık bataryaların toplanma hedefi için %51, 2031 yılı için %61 olarak belirlenmiştir. Mevzuatta endüstriyel ve elektrikli araç bataryaların toplanmasına ilişkin hükümler de yer almasına rağmen tarih ve hedef (oran) belirlenmemiştir.

Elektrikli araçlarda kullanılan ve faydalı ömrünü tamamlamış tahrik bataryaları için ikincil kullanımı sonrası geri dönüşüme dair ortaya konulan yaklaşımların derlendiği bu makale ile Türkiye özelinde geri dönüşüm süreçlerini kapsayan yeni bir e-atık konsepti hazırlanması gerektiğine vurgu yapılmaktadır. Bu çalışmada ömrünü tamamlamış tahrik bataryaları için alternatif geri dönüşüm konseptleri çerçevesinde ortaya konulacak yeni iş konseptlerine dair değerlendirmelere de yer verilmektedir.

## 2. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Tahrik Bataryaları için Yaşam Döngüsüne Yönelik Değerlendirmeler

Elektrikli araç tahrik bataryaları için tüketici elektroniğinde kullanılan bataryalardan farklı olarak, ömrünü tamamlamış şekilde nitelendirilmesi sonrası, ikincil ömür kullanımları söz konusu olabilmektedir. Özellikle gereksinimleri elektrikli araçlardan daha az zorlu olan ve çevrim talepleri düşük, yedek güç kaynağı gibi ikincil ömür uygulamaları giderek yaygınlaşmaktadır. Elektrikli araçların artan kullanımı sonucu, potansiyel olarak büyük miktarlara ulaşması beklenen kullanılmış tahrik bataryaları, geri dönüşüm yapılmadan mevcut hali ile (kimi zaman kısmi revizyonlar gerekli olabilmektedir) ekonomik ve çevresel faktörler gözetilerek, enerji depolama uygulamaları için sürdürülebilir yaklaşım sunabilmektedir.

Elektrikli araç tahrik bataryalarının ikincil ömür kullanımları, geri dönüşüm potansiyellerini geciktirmekte, bu durum geri dönüşüm teknolojilerinde verimliliğin artırılmasını gerekli

kıldığı belirtilmektedir (Xu vd., 2020). Ömrünü tamamlamış elektrikli araç tahrik bataryaları, çevre dostu geri dönüşüm konseptleri marifeti ile ekonomik ve çevresel faydalar sunarken, uygun olmayan yöntemler özellikle çevresel sorunlara neden olabilmektedir (Lang vd., 2022).

Elektrikli araçların artan popülaritesiyle birlikte, bataryalarının geri dönüşümüne yönelik yakın gelecekte yasal zorunluluklar getirileceği belirtilmektedir (Lai vd., 2022). Elektrikli ve hibrit araç tahrik bataryalarının bertarafı ve geri dönüştürülmesi sürecinde kullanılan enerji kaynaklı açığa çıkan emisyon değerinin, tahrik batarya üretiminde kullanılacak hammaddenin tedariki ve batarya üretim süreçleri kapsamında ihtiyaç duyulan enerji kullanımına karşılık gelen emisyon değerinden daha az olduğu ifade edilmiştir. Elektrikli araç tahrik bataryalarının geri dönüşümüne katkı sunması beklenen iyileştirilmelerin başında, yasal çerçevede ortaya konulacak zorunluluklar ve geri dönüşüm maliyetlerinin azaltılmasının geldiğine vurgu yapılmıştır (Garg, 2019).

Elektrikli araç bataryalarının geri dönüştürülmesindeki ekonomik kaygılar, verimli geri dönüşüm yöntemlerine olan ihtiyacı ön plana çıkarmaktadır (Catton vd., 2019). Geçmiş dönemlerde elektrikli araçlardan çıkan yaklaşık 250.000 ton bataryanın büyük ölçüde bertaraf edildiği belirtilmektedir (Jian vd., 2018). Yeni üretilen elektrikli araçların sahip olduğu tedarik zinciri mekanizmalarına yönelik yapılan bir çalışmada, satılan elektrikli araçlardaki tahrik bataryalarının, kullanım ömrünün tamamlanması sonrası geri toplatılarak, geri dönüşümde kullanılmasının tedarik zinciri dinamiklerince dikkatle değerlendirilmesini gerektirdiği belirtilmiştir (Zhang vd., 2022). Mevcut durumda elektrikli araçlarda kullanılan ömrünü tamamlamış tahrik bataryalarının ekonomik gerekçelerle yaygın olarak geri dönüştürülemediği, bu durumun yenilikçi ve uygun maliyetli geri dönüşüm yöntemlerine olan ilgiyi arttırdığı belirtilmektedir (Zou vd., 2013).

Elektrikli araç tahrik bataryalarının geri dönüşümüne dair belirleyici unsur, geri dönüşüm sürecinde elde edilen alt ürünler ile sunulacak katma değer ve ömrünü tamamlayan bataryalar için depolama ve/veya bertaraf prosesi için kaçınılmaz maliyetlerdir. Ayrıca geri dönüşüm süreçlerinin ekonomik ve çevresel avantajlarının ön plana çıkarıldığı yaklaşımların vurgulanması gerektiği ifade edilmektedir (Foster vd., 2014). Mevcut durumda elektrikli araçlarda yer alan tahrik bataryalarının toplam kapasitesinin belirlenmesi ya da bu verilerin kayıt altında tutulması, gelecekteki malzeme geri dönüşüm akış tahminlerini iyileştirebileceği ve etkili geri dönüşüm stratejileri için kullanılacak yaklaşımlara temel teşkil edeceği vurgulanmaktadır (Cribioli & Gohlke, 2021). Tahrik bataryaları için geri dönüşümünün ana sorumluluğu OEM (Original Equipment Manufacturer) ve/veya batarya üreticilerine ait olması gerektiği belirtilmektedir (Ying-hao vd., 2014). Elektrikli araç üretiminde öncü olan başlıca ülkelerde, etkili geri dönüşüm teknolojileri geliştirmeye yönelik küresel yaklaşımları esas alan, tahrik bataryası geri dönüşümüne ilişkin kılavuzlar oluşturulmuştur (Cheng, 2020). Mevcut durumda herhangi bir geri dönüşüm prosesinin uygulanmadığı, olumsuz çevresel etkiye sahip malzemelerin yeniden üretimi, elektrikli araç tahrik batarya endüstrisinin sürdürülebilir gelişimi için önem arz ettiği dile getirilmektedir (Zhang vd., 2023).

Elektrikli araç satışlarında tahrik bataryaları için üreticiler tarafından 8 ila 10 yıl veya 100.000 ila 150.000 km esas sunulan garanti koşulları yer almaktadır. Öyle ki Türkiye'de piyasaya sürülen yeni bir elektrikli araç modeli için distribütörü tarafından 10 yıl veya 1.000.000 km batarya garantisi sunulmuştur (Ssangyong Türkiye). Buna göre tahrik

bataryaları için kullanılabilir batarya kapasitenin %80 altına düşmesi, garanti koşulları çerçevesinde tahrik bataryaları için ikincil kullanıma geçilmesini gerekli kılmaktadır (Engel vd., 2019). Elektrikli araç tahrik bataryalarının maruz kaldığı zorlu çalışma şartları, özellikle ilk beş yıllık işletme süreleri içerisinde büyük ölçüde bataryalarda bozulmalara (arıza) ve performans kayıpları ile karşı karşıya kalınmasına sebep olmaktadır. Ancak söz konusu duruma dair net bir yönerge ya da ölçülenmesine dair objektif, etkin bir yaklaşım bulunmamaktadır (Topal, 2023).

Bütün dünya ile eşgüdüm halinde Türkiye'de de elektrikli araç kullanımı artmaktadır. Buna göre Ocak-Nisan 2024 döneminde trafiğe kaydı yapılan 343.585 adet otomobilin %7,5'i elektrikli olup, Nisan 2024 sonu itibarıyla trafiğe kayıtlı 15.562.640 adet toplam otomobilin ise %1,7'si hibrit ve %0,7'si elektrikli olduğu belirtilmektedir (TÜİK, 2024).

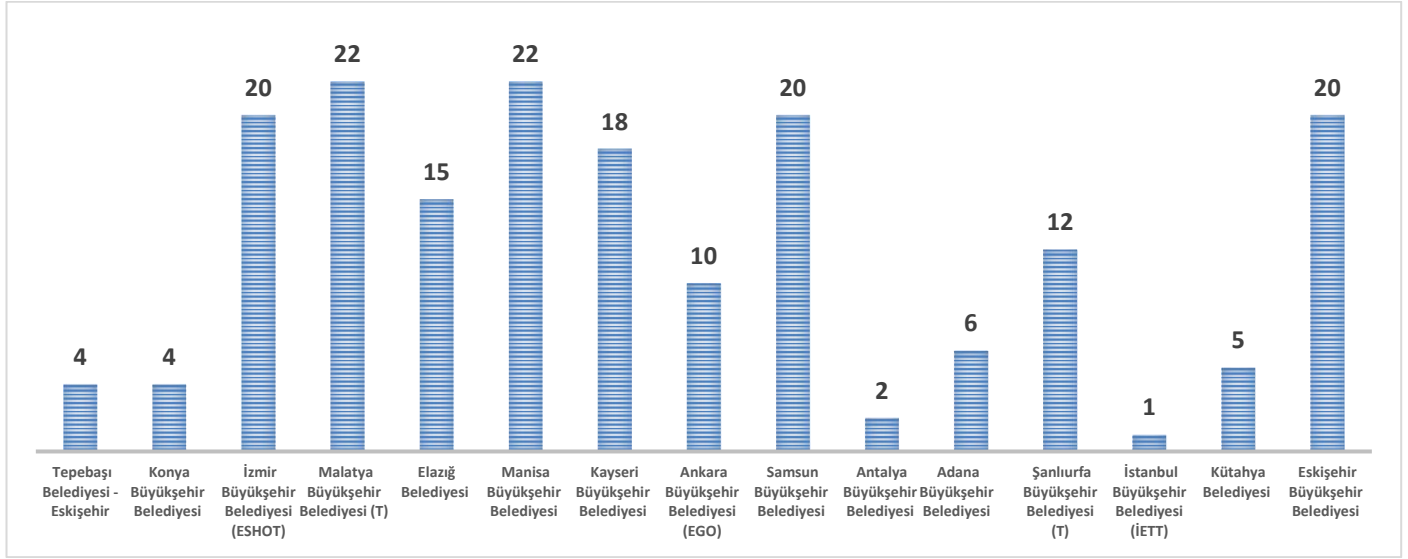
Benzer şekilde toplu ulaşım sistemleri için belirlenen emisyon hedefleri ve sürdürülebilirlik yaklaşımları çerçevesinde kullanımı her geçen gün artan elektrikli otobüsler, küresel ölçekteki toplu ulaşım sistemlerinde 2022 yılı itibarı ile kullanımları 800.000'i aşarak, toplam otobüs sayısının %3'ünden fazlasına karşılık gelmektedir. Dünya genelinde 2022 yılında 54.000 adedi Çin'de olmak üzere yaklaşık 66.000 elektrikli otobüs satışının gerçekleştirildiği, bunun bütün otobüs satışlarının yaklaşık %4,5'ine karşılık geldiği belirtilmektedir. Elektrikli otobüs filolarının 2025 yılında 1.4 Milyon ve 2030 yılında 2.7 Milyon değerlerine ulaşacağı, bu noktada her on otobüsten birinin elektrikli otobüs olacağı öngörülmektedir (BloombergNEF, 2023). Diğer taraftan elektrikli otobüslerde kullanılan tahrik bataryalarının, toplu ulaşım sistemlerinin sahip oldukları ağır hizmet koşulları nedeni ile belirlenen ilk kullanım ömrü sonuna, diğer elektrikli araç konseptlerine göre daha hızlı ulaşacağı değerlendirilmektedir.

Türkiye'de 2016 yılından bu yana çeşitli evsafalarda farklı yerel yönetimler tarafından tedarik edilmeye başlanan elektrikli otobüsler, mevcut durumda toplu ulaşım sisteminde aktif olarak kullanılmaktadır. Buna göre 6 m'den 25 m'ye kadar toplamda 241 adet elektrikli otobüs için sözleşme imzalanmış olup; söz konusu araçlarda yer alan toplam batarya kapasitesinin yaklaşık 47 MWh olduğu hesaplanmıştır. Türkiye toplu ulaşım sistemlerinde 2016 yılı itibarı ile kullanıma başlanan elektrikli otobüsler için üzerinden geçen kullanım dönemleri gözetilerek güncel durumlarının tespit edilmesi gerektiği değerlendirilmektedir. Özellikle kamu toplu ulaşım sistemlerinde kullanılan elektrikli otobüslerde, tedarik sözleşmeleri uyarınca sorumluluk toplu ulaşım işletmelerine bırakılmıştır. Ancak söz konusu tahrik bataryalarının, ömürlerini tamamlanması sonrası nasıl bir yol izleneceğine dair yaklaşımın olmadığı değerlendirilmektedir. Türkiye'de 8 m ve üzeri toplu ulaşım sistemlerinde kullanılan elektrikli otobüs sayıları ve kullanılan şehirler, Şekil 1'de yer almaktadır (Topal, 2013, 2019a).

Elektrikli araç tahrik bataryası için belirlenen ilk kullanım ömrünün sonuna gelindiğinde değerlendirilebilecek 3 seçenek bulunmaktadır. Bunlar tahrik bataryasının bertaraf edilmesi, ikincil kullanımı veya geri dönüşümdür. Mevcut durumda Türkiye'de en sık kullanılan yöntem, bataryaların bertaraf edilmesidir. Özellikle batarya paketlerinin hasar görmesi ve geri dönüşüme dair seçeneklerin olmadığı durumlarda sıklıkla tercih edilen bu yaklaşımdan, konuya dair ortaya konulan yönetmelik/ yaptırımlar marifeti ile- bataryaların içeriğinde yer alan değerli bileşenlerin- yeniden kullanımının artırılabilirliği değerlendirilmektedir. Farklı batarya kimyaları göz önünde bulundurulduğunda nikel, kobalt, manganez gibi çok değerli bileşenleri içermesi ve potansiyel olarak yaşanabilecek olası

batarya üretimindeki hammadde arz kısıtları, geri dönüşüm konseptini daha da etkin kılmaktadır. Ancak geri dönüşüm kapsamında sağlanacak gerekli hammaddeler için ölçek

ekonomisinin oluşturulması, alternatiflerine (madencilikle sağlanacak hammaddelere) göre üretim maliyetlerinin rekabetçi olması gerektiği de değerlendirilmektedir.



Şekil 1. Türkiye'de toplu ulaşım sistemlerinde kullanılan elektrikli otobüs sayıları.

## 2.1 Elektrikli Araç Tahrik Bataryaları için Geri Dönüşüm Yaklaşımları

Elektrikli araçlardan kullanılan tahrik batarya üretimi ile ortaya çıkan karbon ayak izinin, genel olarak tipik içten yanmalı motorlu araç bileşenleri üretiminden kaynaklı ortaya çıkan karbon ayak izine kıyasla daha büyük olduğu; bunun temel nedeni olarak tahrik bataryaların üretimi için kullanılan enerjinin, enerji üretiminde karbon yoğunluğunun dünyadaki en yüksek orana sahip Çin'de üretilmesinden kaynaklandığı ifade edilmektedir. Dunn ve arkadaşları tarafından elektrikli araçların yaşam döngüsünde, tahrik bataryalarındaki geri dönüşüm yapılması marifeti ile %51'e kadar kazanım sağlanabileceği ifade edilmiştir (Dunn vd.,2015).

Ekonomi ve tedarik zinciri risk yönetiminin yanı sıra, güvenlik ve çevresel kaygıların, elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryalarının geri dönüşümüne olan ilgiyi artırması beklendiği; böylelikle geri dönüşüm endüstrisinde yeni iş modellerine geçişin hızlanacağı dile getirilmiştir (Beaudet vd.,2020).

Elektrikli araçların tahrik bataryaları için geri dönüşüm süreci, temel manada bataryaların birincil ve ikincil kullanımlarının tamamlanması sonrası gerçekleştirilmektedir. Sektörde 3 ana yöntem ile geri dönüşüm prosesleri yürütülmektedir. Bu çalışmada geri dönüşüm konseptlerine esas ön mekanik ayrıştırma prosesi ile pirometalurjik, hidrometalurjik ve doğrudan geri dönüşüm tekniklerine yer verilecektir. Temel mana da pirometalurjik işlem metal içerikleri eritmek için yüksek sıcaklık kullanılması; hidrometalurjik işlem ise metaller düşük sıcaklıkta kimyasal sıvı ortamda çözündürülmesi esasına dayanan geri dönüşüm yöntemleridir.

Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryalarına esas geri dönüşüm sürecinin ilk adımı söz konusu bataryaların uygun koşullarda toplanılarak, geri dönüşüm tesislerine getirilmesidir. Son derece dikkatli olunmasını gerektiren bu aşama, beraberinde önemli bir maliyet kalemi teşkil etmektedir. Elektrikli araçların tahrik bataryaları için ilgili standartlar gereği uygulanan titreşim testleri kapsamında da kullanılan, olası tehlikeli durumlara önlem amacı ile tedarik

edilecek güvenlik kabini (safety box) kullanılarak taşınması (ilgili geri dönüşüm merkezlerine getirilmesi sırasında) tavsiye edilmektedir. Ömrünü tamamlayan tahrik bataryalarının ikmalî sırasındaki olası maruz kalacağı titreşimler için ise özel darbe emici unsurlarla desteklenmesi de uygun olacaktır. Özellikle kaza, darbe vb. durumlar sonrası deformasyona maruz kalıp, geri dönüşüme tabi tutulacak tahrik bataryaları için de söz konusu bu yaklaşım önem arz etmektedir. Şekil 2'de belirtilen Güvenlik Kabini (Safety Box) ve Darbe Emici Unsurların yer aldığı bir görsele yer verilmiştir. Geri dönüşüm merkezine getirilen bataryaların uygun koşullarda, geçici olarak depolanacağı alanların sağlanması gerekmektedir.



Şekil 2. Bataryaların İkmalî için Kullanılan Güvenlik Kabini (Safety Box) ve Darbe Emici Unsurlar (Volkswagen Group)

Sonrasında tahrik bataryalarının deşarj ve derin deşarj olmak üzere 2 aşamalı bir sürece tabi tutulması gerekmektedir. Burada özellikle bataryalarda yer alan farklı miktarlardaki enerjinin kurulacak/sağlanacak uygun altyapı ile deşarj edilmek suretiyle enerji kazanımına imkân sağlanabilmektedir. Ancak genellikle geri dönüşüme tabi tutulacak tahrik bataryasının iletken bir sıvı çözeltisine daldırılarak, elektrotlar arasındaki oksidasyon-redüksiyon etkileşimi marifeti ile kısa devre yapılmak suretiyle derin deşarjı da sağlanabilmektedir. Bu uygulama ile tahrik bataryalarının ilerleyen geri dönüşüm aşamalarında olası elektriksel ve termal risklerle karşı karşıya kalınmasının önlenmesi amaçlanmaktadır. Pirometalurji yönteminin

kullanıldığı bazı geri dönüşüm proseslerinde, deşarj prosesleri uygulanmadan da süreç ilerletilebilmektedir. Fiziksel deşarj yönteminin aksine, kısa devre edilmek suretiyle derin deşarj sağlanan işbu yöntem ile yüksek verimlilik<sup>1</sup> ve hızlı döngü elde edilmekte; özellikle büyük ölçekli uygulamalarda avantaj sağlanmaktadır. Bu kapsamda tahrik bataryaların etkin deşarjı için en az %5 NaCl çözeltisinde, 24 saat süre ile bekletilmesi sonrasında, hava ile kurutulmaya bırakılması tavsiye edilmektedir.

Sonraki aşamada, tahrik bataryası geri dönüşüm süreçlerinin öncül adımı olan mekanik ön ayırma uygulanmaktadır. Bu teknikte batarya bileşenlerinin boyutlarına, şekillerine ve yoğunluklarına göre uygulanan proses doğrultusunda fiziksel olarak ayırma yapılması söz konusudur. Ana amaç, elektrotlar ve akım toplayıcılar gibi metalik bileşenlerin, plastik muhafazalar ve elektrolitler gibi metalik olmayan bileşenlerden ayrılmasıdır. Mekanik ayırma tekniğinde çok farklı batarya türleri işlenebilmekte ancak batarya alt bileşenlerinin saf hallerinde geri kazanımı sağlanamamaktadır (Toro vd., 2023)

Mekanik ayırma işlemlerine ilk olarak tahrik bataryaların dış kabuğunun açılması/sökülmesi ile temel bileşenlerinin demontajına başlanır. Farklı kimya ve türlere sahip tahrik bataryaları için yürütülen bu süreçte genellikle manuel olarak/el yordamı işlemler gerçekleştirilmektedir. Batarya dış kabuğunun açılması ile özellikle baralar, kablj (elektrik tesisatı), kart/konnektör, soğutma plakaları/tesisatları, dış kabuk, modüller ve separatörler ilk etapta ayrılabilen temel alt bileşenlerdir. Şekil 3'te ilgili aşamaya dair görsel yer almaktadır. Bataryanın fiziksel demontajını esas alarak temel bileşenlerine ayırmasını içeren süreç kapsamında, tek tip batarya paketleri ile yürütülecek uygulamalar avantaj sağlamaktadır.



Şekil 3. Ömrünü tamamlamış batarya paketinin ilk demontajı(Volkswagen Group)

Sonrasında geleneksel hurda tesislerinde yürütülen işlemler sırasında da kullanılan kırıcı marifeti ile bir sonraki aşamaya geçilir. Demontajı gerçekleştirilen genellikle modül (mümkün olması durumunda hücre) bazındaki yapılar, mekanik parçalama işlemine tabi tutulur (Şekil 4). Bir kırıcı marifeti ile çeşitli ölçülerde granül olarak nitelendirilen küçük parçalara ayrıştırılmaktadır. Bu işlem sırasında önceki süreçte, sıvı çözelti içerisinde bekletilmeyen/derin deşarjı sağlanmayan uygulamalar için eş zamanlı olarak sıvı çözeltisi (NaCl) ile proses beslenilmelidir. Zira parçalama işlemi sırasında olası kısa devre ve/veya patlama vb. olumsuz durumların önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. İşlem sonrası elde edilen

granüller için benzer şekilde kurutma işlemi gerçekleştirilmektedir.



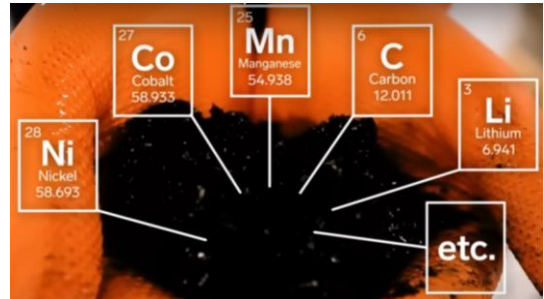
Şekil 4. Ömrünü Tamamlamış Batarya Paketi için Modül Düzeyinde Parçalama Prosesi.

Granüllerin ağırlık, boyut gibi fiziksel farklılıklarından yararlanılarak ve farklı çapta eleklerden geçirilmesi ile yapılan ayırma sonrası, manyetik seperatörler marifeti ile granüller içerisinde yer alan metal olmayan plastik bazlı malzemeler ile alüminyum & bakır vb. alt bileşenlerin tasniflenmek suretiyle ayrılması sağlanır. Söz konusu ön mekanik ayırma prosesi sonrası elde edilen son partikül yapısına (Şekil 5) kara kütle adı verilir. Bu tabir, batarya hücrelerindeki anotlarda bulunan ve siyah renge sahip olan yüksek konsantrasyonlardaki grafitten kaynaklanmaktadır.



Şekil 5. Mekanik ayrıştırma sonrası açığı çıkan metal folyolar ve kara kütle

Elde edilen kara kütle içeriğinde Şekil 6'da görüldüğü üzere geri dönüşümde kullanılan batarya kimyasına bağlı olarak belirli oranlarda kobalt, lityum, nikel, mangan ve karbon vb. malzemeleri bulunmaktadır. Söz konusu bu malzemeler proses sonrası ilerleyen süreçlerde kullanılmak üzere depolanır.



Şekil 6. Kara kütle içeriği.

Ömrünü tamamlamış tahrik bataryaları, gerçekleştirilen mekanik ayrıştırma sonrası elde edilen kara kütle kullanılması ile uygulanabilen ilk geri dönüşüm yaklaşımı pirometalurjik geri dönüşümdür. Elde edilen kara kütle

<sup>1</sup> Enerjinin kazanımı suretiyle bir verimlilik söz konusu olmayıp, tamamen deşarjin sağlanması konusunda verimlilik esas alınmaktadır

yüksek sıcaklıklarda ısı işleme tabi tutulduğu bir prosestir. Özellikle modül bazında indirgenmiş batarya yapıları için ön mekanik ayırma uygulanmaksızın, doğrudan da kullanılabilen bu yöntem, plastik bazlı ve elektrolit gibi malzemelerin yüksek ısı ile yanması suretiyle ayrıştırılmasını esas almaktadır. Tehlikeli emisyon salınımları ve proses sonrası ortaya çıkan atıklarla ön plana çıkan pirometalurjik geri dönüşüm işlemi sırasında yoğun enerji tüketimi gerçekleştirilmektedir.

Pirometalurji yönteminde kullanılan ekstraktif metalurji alt prosesi uyarınca, batarya modüllerine uygulanan termal işlem teknikleri ile zenginleştirilmiş metal içeriklerinin geri kazanılması söz konusudur. Uygulanan ısı ile birlikte açığa çıkan gazların, meydana getirdiği kimyasal reaksiyonlar sonucu, hedeflenen alt bileşenlerin elde edilmekte; böylelikle yanıcı maddelerin güvenli bir şekilde ayrıştırılması ve bataryanın organik bileşenlerinin kontrollü bir şekilde devre dışı bırakılması sağlanmaktadır

Pirometalurjik geri dönüşüm yönteminde ön mekanik ayırma prosesi ile elde edilen kara kütle, hammadde olarak kullanılabilir, ancak diğer geri dönüşüm (hidrometalurjik) yöntemlerinin aksine, zorunlu bir adım değildir. Pirometalurji geri dönüşüm yönteminde elektrolit, grafit, çelik, alüminyum ve lityum vb. alt bileşenler cüruf veya atık gaza dönüşmekte, geri kazanımı yapılamamaktadır. Bununla birlikte pirometalurji yönteminde toksik bileşiklerin havaya salınmasını önlemek için atık gaz arıtma tesislerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle  $\text{LiFePO}_4$  ve  $\text{LiMnO}_2$  gibi batarya kimyaları için bu yöntem kullanılamamaktadır. Zira söz konusu batarya kimyalarında yer alan alt bileşenler cürufa dönüşmektedir (Larouche vd., 2020). Pirometalurjik işleme nikel, kobalt ve bakır geri kazanımları için kullanılmakta; bu kapsamda NMC (Lithium Nikel Mangan Kobalt Oksit) tipi tahrik bataryaları için uygun bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Birçok batarya yapısındaki alt bileşenlerin yanmak veya cürufa dönüşmek suretiyle kullanılamaması göz önüne bulundurulduğunda, mekanik ön ayırma ile birlikte uygulanacak hidrometalurjik geri dönüşüm yöntemine kıyasla daha düşük verimliliğe (geri kazanım için) sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryalarının geri dönüşümüne ilişkin incelenen literatür çalışmalarında araştırmaların %75'inden fazlasında hidrometalurjik geri dönüşüm süreçlerinin yer aldığı ve birçok şirketin bu amaçla faaliyet yürütülecek tesislerin kurulumuna yatırım yaptığı belirtilmektedir (Melin vd., 2019, 2020). Bu minvalde daha yaygın kullanılan, alternatif geri dönüşüm yaklaşımı olan hidrometalurjik proseste, batarya alt bileşenlerinin geri kazanımı için kimyasal çözeltilerden yararlanılmaktadır. Yüksek metal geri kazanım oranları ile ön plana çıkan yöntemde, kimyasal reaksiyonların kontrolü ve oluşan kimyasal atıkların uygun şekilde bertaraf edilmesi hususları, ilave maliyet ve zaman getirmektedir. Hidrometalurjik geri dönüşüm süreçlerindeki temel zorluk, farklı kimya/alt bileşenlere sahip tahrik bataryaları için aynı çözeltilerle etkin geri kazanım sağlanamamasıdır. Ortaya konulan kimyasal çözeltiler ile belirli alt bileşenlerin seçici olarak çözünmesini esas alan proses (liç işlemi) doğrultusunda süreç işletilmektedir. Buna göre farklı kimyalara sahip tahrik batarya yapıları için uygulanan liç işlemlerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Batarya türüne göre verimli liç işlemlerinin geliştirilmesi yüksek metal geri kazanım oranlarına ulaşmak için önem arz etmektedir. Hidrometalurjik geri dönüşüm prosesleri kapsamında kullanılan enerji tüketiminin az olması maliyetleri azaltırken; liç işlemlerinde proses parametrelerinin (kimyasal bileşen, sıcaklık ve zaman vb.) ve ayırma tekniklerinin uygun kombinasyonunun tespit edilmesi oldukça kritik öneme sahiptir. Ayrıca hidrometalurjik geri dönüşüm yöntemlerinde farklı çevresel etkilere neden olabilecek, tehlikeli

sınıfa giren kimyasalların kullanılması, proses atıklarının en aza indirgenmesi ve nihayetinde ortaya çıkacak olan atıkların da uygun şekilde arıtılması/bertaraf edilmesi, sürdürülebilir ve çevre dostu geri dönüşüm yaklaşımı için önemlidir.

Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryalarının geri dönüşümünde kullanılan son teknik, doğrudan geri dönüşüm yöntemidir. Bataryalardan değerli metalleri geri kazanmak için kullanan nispeten yeni bir yaklaşımdır. Bu proses, metal geri kazanım oranları ve çevresel sürdürülebilirlik açısından elde edilen sonuçlarla dikkat çekmektedir. Doğrudan geri dönüşüm yönteminde, ömrünün tamamlanmış tahrik bataryalarının tamamen alt bileşenlerine ayırmak yerine, söz konusu temel alt bileşenlerinin işlevselliklerinin geri kazanılması amaçlanmaktadır (Sloop vd., 2018). Bu yöntemde alt bileşenlerin ayrıştırılmadan, başlangıç durumundaki özelliklerine ve elektrokimyasal kapasitelerine ulaşılması esastır. İki aşamalı bir termal işlem dizisinin uygulandığı proseste, literatürde yeniden lityumlaştırma olarak da ifade edilen yöntemde göre, katotun lityum hidroksit ile kaplanması sonrasında; önce düşük, sonrasında da yüksek sıcaklıkta tavlama uygulanması ile orijinal yapısına döndürülmesi söz konusudur. Uygulanan teknik ile tahrik bataryaları için laboratuvar koşullarında başlangıç kapasitelerinin %80-90 oranında potansiyel olarak geri kazanımının sağlanabildiği belirtilirken; ticari uygulanabilirlik başta olmak üzere, söz konusu süreçlerin geliştirilmesi gerektiği ifade edilmektedir (Larouche vd., 2020).

Genel olarak, elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryaları için farklı geri dönüşüm teknikleri olsa da her tekniğin avantajları ve sınırlamaları olduğu; uygulanacak geri dönüşüm yönteminin seçiminde, metal geri kazanım verimliliği, çevresel etki, enerji tüketimi ve ekonomik uygulanabilirlik gibi faktörlere bağlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Pirometalurjik geri dönüşüm yöntemi, yüksek sıcaklıklarda ısı işlem gerektirdiğinden, yüksek enerji tüketimine sebep olmaktadır. Hidrometalurjik geri dönüşüm yönteminde ise alt bileşenleri elde etmek için yoğun kimyasal kullanımı ve sonrasında ortaya çıkan nihai atıklar nedeniyle ciddi çevresel etkiye sebep olmaktadır. Doğrudan geri dönüşüm yönteminde, pirometalurjik ve hidrometalurjik süreçlere kıyasla genellikle düşük çevresel etkiye sahip olan bir yaklaşım sunulurken; kapsamlı kimyasal proseslere veya yüksek sıcaklıktaki ısı işlemlere ihtiyaç duyulmadan, daha az emisyon ve minimum düzeyde tehlikeli yan atık oluşumu söz konusudur. Ancak söz konusu yöntemim henüz geliştirilme aşamasında olduğuna vurgu yapılmaktadır. Nihai olarak kullanılacak geri dönüşüm sürecini belirlemek, geri dönüşüme esas kullanılan batarya kimyası başta olmak üzere, hedeflenen verim değeri ve geri dönüşümün gerçekleştirildiği konsept gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

Aşağıda yer alan Tablo 1'de söz konusu geri dönüşüm yaklaşımlarına dair özet bir değerlendirme sunulmuştur.

Tablo 1. Tahrik batarya geri dönüşüm yöntemlerinin karşılaştırılması.

	Verimlilik	Enerji Tüketimi	Çevresel Etki	Maliyet
Pirometalurjik Dönüşüm	+++	+++	++	+++
Hidrometalurjik Dönüşüm	+++	++	++	++
Doğrudan Geridönüşüm	++	+	+	+

### 2.2 Türkiye’de Elektrikli Araçların Tahrik Bataryaları Geri dönüşümüne dair Mevcut Durum

Ömrünü tamamlamış bataryalar için geri toplama işleminden, değerli metal geri kazanımına kadarki süreçte yer alan batarya geri dönüşüm değer zinciri, ağırlıklı olarak ilgili alt bileşenlerin, süreç içerisinde referans alınan tahrik batarya kimyasına bağlı olmak kaydı ile tedarik zincirleri için elde edilecek katma değer 2040 yılına kadar küresel bazda 95 Milyar \$/yıl üzerine çıkması beklenilmekte, elde edilen batarya alt bileşenleri için 2025 yılı için yaklaşık 600 \$/ton mali değere yaklaşabileceği belirtilmektedir (Breiter vd., 2023). İleriye dönük sağlanacak teşvik mekanizmaları ile potansiyel anlamda elde edilecek gelişmelere bağlı olarak, geri dönüşüm süreçlerinde elde edilen kazanımların, tahrik bataryaları için kullanılan birincil hammadde endüstrisi ile benzer mali değerlere ulaşacağına da beklenildiği ifade edilmektedir.

Elektrikli araç batarya endüstrisinin gelişen dinamik yapısı sayesinde tasarım, üretim ve performans parametrelerinde sağlanan iyileştirmeler, batarya standartlarının düzenli olarak gözden geçirilmesini gerektirmekte; bu doğrultuda orta-uzun vadede elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryaları için sahiplik modellerinde de değişikliğe gidilmesi öngörülmektedir. Günümüzde, otomotiv sektöründe yer alan üreticiler, elektrikli araçlarda kullanılan, ömrünü tamamlamış bataryaların mülkiyetini tamamen son kullanıcıya devretmektedir. Söz konusu duruma özellikle Türkiye’de gerçekleştirilen kamu toplu ulaşım sistemlerindeki elektrikli otobüs alım ihalelerinde sıklıkla karşılaşılmaktadır. Öyle ki bugüne kadar gerçekleştirilen bütün elektrikli otobüs alım ihalelerinde, ömrünü tamamlamış tahrik bataryaların tehlikeli atık sınıfında yer almasına rağmen, faydalı kullanım ömrü sonunda geri dönüşüm yaklaşımı bulunmamakta; bertaraf edilmesine dair sorumluluklar da İdarelerin yükümlülüğüne bırakılmaktadır (Topal,2019b). Bu nedenle Türkiye’de elektrikli araç tahrik bataryaları için ortaya konulması gereken özel bir yönergeye ihtiyaç duyulduğu değerlendirilmektedir. Özellikle farkındalık sağlama potansiyeli yüksek, toplu ulaşım işletmeleri için söz konusu elektrikli otobüslerde kullanılan ömrünü tamamlamış tahrik bataryalarına esas batarya ve/veya araç üreticilerine şartname boyutunda uygun gereksinimlerin sunulması ve tahrik bataryaları için ikincil ömür piyasalarında istikrar kazandırılması gerektiği değerlendirilmektedir. Böylelikle otomobil ve batarya üreticileri için ömrünü tamamlamış tahrik bataryalarına esas ikinci gelir akışı imkanı ile elektrikli araçlarda kullanılan batarya mülkiyetinin devredilmeden; kiralama modeline yönelik katma değer sunulabileceği öngörülmektedir.

### 2.3 Tahrik Bataryaları İçin Yaşlanma/ Bozunma Etkisinin Değerlendirilmesi

Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryaları için ömrünü tamamlama ya da yaşlanma kavramı, nominal koşullarda bataryanın standart çevrimlerinin ve/veya raf ömrünü tamamlaması (kullanılmaksızın depolanması) nedeni ile meydana gelebilen, kaçınılmaz bir süreçtir. Ayrıca kaza, çarpma vb. koşullarda karşılaşılabilecek darbelere maruz kalması sonucu meydana gelen deformasyon durumlarında da benzer süreçler işletilmesi gerekmektedir. Belirtilen durumlar elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryaları için başta kapasite kaybı olmak üzere farklı bozulma/yaşlanma etkilerinin görülmesi ile kullanım dışı kalmalarına neden olmaktadır (Barré vd., 2013).

Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryalarda yaşlanma etkisi zamana/kullanımına bağlı olarak genellikle takvimsel ve dögüsel olarak ikiye ayrılır. Temel manada takvimsel

yaşlanma etkisi için depolama sıcaklığı ve şarj/deşarj sayısı etkili iken, dögüsel yaşlanmada daha fazla değişken etkisi söz konusudur (Dubarry vd., 2018; 2012; Wikner & Thiringer, 2018). Bunlar SoC (State of Charge) seviyesinin düşük/yüksek değerlerde işletilmesi, yüksek şarj vedeşarj akım değerleri, yüksekdeşarj derinliği (DoD) ve yüksek/düşük sıcaklıktaki çalışma koşulları ile birlikte bu koşullardaki soğutma/ısıtma (batarya için) sistemlerinin kapasite yetersizliği, nihai anlamda batarya performansını olumsuz etkilemektedir (Martel vd., 2016;).

Elektrikli araç tahrik bataryaları için yaşlanma etkisinin ölçümü konusunda, geçmişe dair işletme koşulları önem teşkil etmektedir. Özellikle geçmiş kullanım koşullarına dair bilgi sahibi olunamaması bu anlamda dezavantaja sebep olurken özellikle kullanılan BMS (Battery Management System) yapıları marifeti ile tahrik bataryalarının yaşlanma etkisinin ölçümlenmesinin gerektiği değerlendirilmektedir.

Tahrik bataryaların ömrünü tamamlaması/bozulması nominal koşullarda doğrusal olmayan bir süreçte gerçekleşmektedir. Buna göre özellikle tahrik bataryasının kullanıldığı aracın maruz kaldığı fiziksel koşullar (ortam sıcaklık ve nem) ve kullanıcıların sürüş ve şarj işletme döngüleri, tahrik bataryaların yaşlanma/bozulma sürecine dair yaklaşım sunulmasını oldukça karmaşık hale getirmektedir (Basia vd., 2021). Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryasının mevcut durumdaki kapasitesinin, nominal kapasiteye oranı olarak tanımlanan, SoH (State of Health) değeri, bu kapsamda değerlendirme sunabilmek için kullanılan bir parametredir. Ancak elektrikli araçlarda yer alan tahrik bataryalarına esas, ömür faktörüne etkiyen hususlar kimi zaman görecelilik arz etmektedir. Bu kapsamda aynı marka ve modele ait iki elektrikli araçtan, yüksek menzil değerine ihtiyaç duyan ve taksicilik hizmeti için kullanılan örneklem ile sadece günlük kısa mesafeli sürüşler sırasında kullanılan örneklem esas alındığında; %10'luk batarya kapasite azalması ilgili kullanıcılar için farklı değerlendirilebilmektedir. Taksicilik hizmeti için düşen menzil değerine dair hassasiyet, her iki durumda da SoH değeri %90' a karşılık gelmesine rağmen çok daha etkindir. Bu nedenle elektrikli araçlara esas işletme döngüsünü referans alan farklı değerlendirme parametrelerinin kullanılması gerekmektedir (Topal, 2023).

Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryaları için yaşlanma/bozunma etkisine dair laboratuvar ortamında ve belirli koşulları altında tamdeşarj/şarjı gerçekleştirilerek yaklaşım sunulabilir. Sistem seviyesinde, özellikle araç üzerinde bu konuda etkin sonuç almak oldukça zordur zira doğru bir değerlendirme sunulabilmesi için gerekli dış ortam koşulların da sağlanması gerekmektedir.

Bu çalışma da araç seviyesinde, tahrik bataryaları için yaşlanma/bozunma etkisinin değerlendirilmesine yönelik, kamu toplu ulaşım sistemlerinde kullanılan elektrikli otobüsler nezdinde de yaklaşım sunulmuştur. Sektörel bazda, elektrikli otobüs alımlarında temel referans teşkil eden teknik şartnameler doğrultusunda, özellikle tahrik bataryalarına dair garanti koşullarının nasıl işletileceğine de yer verilmiş, ilgili hitap kitleleri için farkındalık sunulması amaçlanmıştır.

Öncelikle toplu ulaşım sistemlerinde yer alan otobüs filolarında kullanılan filo izleme mekanizmaları marifeti ile (kimi zaman manuel tutulan kayıtlar da kullanılabilir) ortalama koşullardaki menzil değerlerinin - belirlenen hat, yolculuk, trafik ve farklı iklimlendirme koşulları altında- kayıt altına alınması gerekmektedir. Elektrikli otobüslerin tedarik sürecinde referans alınan teknik şartnameler gereği, tahrik bataryaları için yıllık, belirtilen oranlarda kapasite kayıplarına izin verilmektedir (Topal O., & Ateş Y.,2021). Bu değer tahrik

bataryaları için takvimsel yaşlanma etkisine karşılık gelmektedir. Buna göre elektrikli otobüslerin özellikle ilk tedarikine müteakip belirlenecek referans hat ve maksimum işletme koşulları altında elde edilen performans sonuçları, toplu ulaşım işletmeleri için baz alınacak temel referans değer niteliği taşımaktadır. İlerleyen yıllar için, yapılacak yeni ölçümler de baz alınacak bu değer için, öngörülen temel zorluk, dış ortam koşullarının eş seviyeye getirilmesidir. Bu bakımdan mümkün olduğu kadar aynı dönemleri esas alan (yaz ve kış iklim koşulları altında) testler ile etkin değerlendirme sunulabilir. Toplu ulaşım işletmelerin bu doğrultuda yürütecekleri garanti koşullarına esas işletilecek performans test süreçlerine ilişkin hazırlanacak teknik şartnameler kritik öneme sahiptir.

Uygulaması göreceli kolay olan bu yaklaşıma alternatif olabilecek diğer bir değerlendirme konsepti -garanti koşullarına dair olası işletmeci (İdare) & OEM arası itilaf durumunda da başvurulabilecek bir yöntemdir- tedarik edilen elektrikli otobüs filosu içerisinde seçilecek örnekleme dair harici testler yürütülmesidir. Özellikle kayıt altında tutulan menzil değerlerinde beklentinin ya da filonun ortalamasının altında seyir eden, elektrikli otobüse ait tahrik bataryasının deplase edilerek, laboratuvar ortamında ölçülmesini bu suret ile elde edilecek verilerin değerlendirmesini esas alan bir yaklaşımdır. Gerekli ve yeterli laboratuvar koşulları altında gerçekleştirilecek şarj/deşarj testleri (gerçek işletme koşullarında ihtiyaç duyulan akım kapasiteleri baz alınarak) uygulanarak, tahrik bataryasına esas yaşlanma etkisi ölçümlenebilir. Burada dış ortam koşullarının gerçekleşmesi de gerekmekte, harici olarak tahrik bataryası kontaktörlerinin anahtarlamasına (BMS üzerinden) ihtiyaç duyulmaktadır. Daha etkin ve objektif sonuçlar elde edilebilecek söz konusu ölçümlerin, mutlaka araç üreticisi ve/veya batarya üretici desteği ile yürütülebileceği, beraberinde örnekleme otobüslere ait işletme süreksizliği ve ilave maliyete neden olabileceği de değerlendirilmektedir. Ayrıca OEM/batarya üreticisinde destek alınamayan koşullarda ise aracın şasi dinamometresi üzerinde alınarak ve iklimlendirme test kabini içerisinde belirlenen koşullara esas batarya performans değerlendirmesi sağlanabilir (Topal, 2024).

### 3. Elektrikli Araçların Tahrik Batarya Geri dönüşümüne Yönelik İş Modelleri

Elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryasına yönelik yapılacak değerlendirmeler sonrası özellikle işletilen filolar nezdinde, sistemde artacak ömrünü tamamlamış tahrik bataryaları için yeni nesil iş modellerine de ihtiyaç duyulacağı değerlendirilmektedir. Bu kapsamda ilk olarak sunduğu ölçek ekonomisi nedeni ile kamu toplu ulaşım sistemlerinde kullanılan elektrikli otobüslerin tahrik bataryalarına yönelik iş modeli ele alınacaktır. Bu doğrultuda beklenen performans gereksinimlerin sağlayamadığı koşullar için ilgili OEM'ler ya da batarya üreticileri tarafından söz konusu tahrik bataryalarının toplatılmasını, test edilmesini, sınıflandırmasını kapsayan; yapılacak değerlendirme sonrası ikincil bir uygulamada yeniden kullanılabilmesi yaklaşımını esas alan konsepttir. Bu iş modelinde OEM'ler nezdinde batarya üreticisi kanalı ile kullanılan tahrik bataryalarının mülkiyeti devredilmeden, kullanım hizmeti sunulması esastır. İş modelindeki temel motivasyon, OEM ve/veya tahrik batarya üreticisinin, tahrik bataryasının faydalı ömür kullanımı sonrası bütün süreçlerden sorumlu kılınarak, nihai anlamda ikincil ömür kullanımına ve sonrası için geri dönüşümüne dair sorumluluğunun devam ettirilmesi yönündedir. Model, tahrik bataryasına yönelik özellikle tasarımsal ve teknolojik bilgi birikiminin korumasını ön planda tutarken, şirketler için tercih edilecek, belirlenen batarya ikincil ömür ve geri dönüşüm

konseptlerine yönelik ilave yatırım yapılmasını ya da iş birliği kurulmasını gerektirmektedir.

Bir diğer iş modelinde, elektrikli otobüslerde kullanılan ömrünün tamamlamış bataryaların, kullanılacak şarj istasyonları ile doğrudan entegre edilmesi esas alınmaktadır. Bu yaklaşımda şarj istasyon işletmecileri ya da doğrudan şarj istasyonunu kendi bünyesinde tedarik ederek kullanan toplu ulaşım işletmecileri ile yürütülmesi esas alınmaktadır. Modelde tahrik bataryaların başta ikincil ömür, sonrasında da geri dönüşüme dair sorumluluğunun OEM ya da batarya üreticisinden alınması ile farklılaşmakta; şarj istasyon işletmecisine veya toplu ulaşım işletmecisine devredilmektedir. Mevcut durumda Türkiye'deki işleyiş ile uyumluluğun en kolay sağlanacağı konsept olarak değerlendirilmektedir. İş modelinde özellikle geri dönüşüme esas yeni iş kollarının ve ilgili faaliyet alanında yer alan şirketlerin de dahil edilmesi gerekmektedir.

Söz konusu bu iş modelleri kapsamında, elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryalarına yönelik ikincil ömür kullanımına dair belirsizlikler, özellikle kullanılan bataryanın geçmiş kullanım koşullarına dair veri eksikliği, bataryaların test edilmesi için gerekli maliyetler ön plana çıkmaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan bataryalarının ikincil ömür yaklaşımları için performans, kalite, dayanıklılık ve güvenlik konularında garanti sunulabilmesi sektöre önemli motivasyon sağlayacaktır. Bataryalara ilişkin geçmiş verilerinin korunması ve bu verilerin değiştirilemez, doğrulanabilir ve güvenli bir şekilde saklanabilmesine imkân sağlanması, ilgili iş modellerine yönelik uygulamalara katma değer sunacaktır.

Bu doğrultuda yakın gelecekte, dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de ömrünü tamamlamış tahrik bataryaların geri dönüşüm süreçlerine dair müstakil bir hizmet sektörünün doğması beklenilmektedir. Özellikle OEM'lerin geri kazanılan hammaddeler üzerindeki kontrolünü de imkân sunacak iş modellerinin, ömrünü tamamlamış tahrik bataryaları için geliştirilecek politikalar marifeti ile ödül-ceza ve depozito-iade konseptlerini esas alan yenilikçi yaklaşımlarla ön plana çıkması beklenmektedir.

Elektrikli araç tahrik bataryalarının geri dönüşümü için kullanılacak farklı iş modelleri çerçevesinde, değer zinciri adımlarını kısmi olarak sağlayan -örneğin sadece batarya paketinden hücre seviyesine demontajı prosesini kapsayan- şirketlerden, ömrünü tamamlamış bataryanın tersine lojistiğinden, batarya alt bileşenlerinin geri dönüşümüne kadarki tüm değer zinciri adımlarının tamamını kapsayan entegre şirketlere kadar farklı faaliyet alanlarında iş kollarının ortaya çıkması öngörülmektedir (Lin vd., 2023). Son dönemde küresel otomotiv sektöründe değer zincirindeki kısmi çözümlerle süreci yönetmek yerine, uçtan uca geri dönüşüm konseptlerine dair yaklaşımların benimsendiği görülmektedir. Bu kapsamda batarya geri dönüşümüne dair farklı konseptlerde (tersine lojistikten, geri kazanımına kadar) çözüm sunabilen değer zincirinde yer alan şirketlere örnek olarak Umicore, Veolia & Solvay ortaklığı, Licycle, Heritage Battery Recycling, Retrieval Technologies ve Battery Solutions gösterilebilir (Júnior vd., 2023).

### 4. Değerlendirme ve Sonuç

Elektrikli araçlarda kullanılan ömrünü tamamlamış tahrik bataryaları için ortaya konulacak geri dönüşüm süreçleri kapsamında çeşitli zorluklar yer almaktadır. Bunların başında otomotiv endüstrisinde kullanılan batarya hücrelerine dair boyut, kimya, yapısal ve konfigürasyon farklılıkları gelmektedir. Mevcut durumda elektrikli araç sektöründe tahrik bataryaları, OEM'ler ve batarya üreticileri tarafından belirli bir



yaklaşım gözetilerek, araç modelline özel tasarlanmaktadır. Bu konuda standardizasyondan uzak olan sektörde, 2025 yılına kadar 15'ten fazla üreticinin bataryaları kullanılarak, 250'ye yakın yeni elektrikli araç modelinin piyasaya sürülmesinin beklendiği ifade edilmiştir (Gao vd., 2023).

Diğer taraftan yeni batarya maliyetlerinde yaşanan düşüş eğilimi, geri dönüşüm konusunda önemli bir dezavantajı beraberinde getirmektedir. Doğadaki hammaddeler kullanılarak üretilen batarya maliyetleri, geri dönüşüm marifeti ile yeniden üretilen bataryalar için rekabetçi ve maliyet etkin çözümlere odaklanılmasını zorunlu kılmaktadır. Her iki konsept arasında oluşan maliyet farkının orta vadede azalmasının beklendiği ifade edilirken; geri dönüşüm yolu ile elde edilen hammaddelerin kullanılarak üretilen elektrikli araç tahrik bataryaları için standartlar ve performans kaygılarına dair ortaya konulacak yenilikçi yaklaşımların –standartlar, batarya yönetim sistemleri ve batarya sağlık durumu özelinde- ortaya konulması gerektiği değerlendirilmektedir. Özellikle elektrikli araçlara esas tahrik bataryalarında geri dönüşüm sonrası temel gereksinim olan performans kriterlerine dair ölçülebilir, niceliksel kriterlerin belirlenmesi sektöre özgü muhtemel arz/talep dengesi için olumlu katkı sunması öngörülmektedir.

Mevcut durumda elektrikli araçlarda kullanılan tahrik bataryaları için OEM/batarya üreticisi ile son kullanıcı arasında yer alan sorumluluğa dair sınırların yeterince belirlenemediği değerlendirilmektedir. Buna dair Türkiye'de en detaylı gereksinimlerin yer aldığı kamu toplu ulaşım sistemleri için tedarik edilen elektrikli otobüslere yönelik hazırlanan teknik şartnameler de dahil olmak üzere; bataryaların performans ölçümleri ve geri dönüşümüne dair etkin izleme/ölçüm ve yaklaşımı bulunmamakta, ömrünü tamamlamış tahrik bataryaları için önerilen bertarafa ilişkin sorumluluk da İdarelere bırakılmaktadır. Konu özelinde yasal düzenleme eksikliği OEM/batarya üreticileri için avantaj sunarken; potansiyel/ mevcut son kullanıcılar için ise ilave sorumluluk, daha da önemlisi belirsizlikleri beraberinde getirmektedir. Öte yandan Türkiye'de ortaya konulacak yasal düzenlemeler çerçevesinde tedarikçilerin, son kullanıcıların ve kanun düzenleyicilerin sürdürülebilir hedefe yönelik yapıcı adımların atılmasına imkân ve ortam sağlanacak, elektrikli araç son kullanıcılarına, kullandıkları tahrik bataryalarının henüz ömrünü tamamlamadan önce, potansiyel bir gelir akışına da imkân sağlayacaktır. Sürdürülebilir iş modellerince ortaya konulacak batarya geri dönüşüm konseptleri ile yeniden üretim süreçleri için ölçek ekonomisi sağlanarak, maliyet etkin çözümlerle elektrikli araç sektörü için fırsatlar sunulması öngörülmektedir.

Son olarak geleceğe yönelik araştırmalarda, kaynak geri kazanımını en üst düzeye çıkararak, çevresel etkiyi en aza indirgeyen, birden fazla tekniği birleştiren, bütünleşmiş geri dönüşüm konseptlerinin geliştirilmesine odaklanılması; beraberinde elektrikli araç endüstrisinde sürdürülebilir tahrik batarya geri dönüşümüne yönelik oluşması muhtemel talebi karşılamak üzere süreçlerde verimliliği ve maliyet etkinliğinin artırılması gerektiği değerlendirilmektedir. Son kullanıcı tarafında ise ilk alım sırasında, tahrik bataryalarına dair geri dönüşümün göz önünde bulundurulması; buna dair uygun batarya türü/konseptinin tercih edilmesine yönelik bütünsel yaklaşımların, sunulacak kapsayıcı yönetmelik ve teşvik mekanizmalarının ortaya konulması uygun olacaktır.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır.

## 5. Kaynaklar

- Barré, A., Deguilhem, B., Grolleau, S., Gérard, M., Suard, F., & Riu, D. (2013). A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of power sources*, 241, 680-689.
- Basia, A., Simeu-Abazi, Z., Gascard, E., & Zwolinski, P. (2021). Review on State of Health estimation methodologies for lithium-ion batteries in the context of circular economy. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 32, 517-528.
- Beaudet, A., Larouche, F., Amouzegar, K., Bouchard, P., & Zaghib, K. (2020). Key challenges and opportunities for recycling electric vehicle battery materials. *Sustainability*, 12(14), 5837.
- Bloomberg New Energy Finance Global Electric Vehicle Outlook 2024 Report, Bloomberg New Energy Finance, 2024.
- Breiter A., Linder M., Schuldt T., Siccardo G, and Vekić N. (2023) Battery recycling takes the driver's seat, McKinsey Battery Insights,
- Catton, J. W., Walker, S. B., McInnis, P., Fowler, M., Fraser, R. A., Young, S. B., & Gaffney, B. (2019). Design and analysis of the use of re-purposed electric vehicle batteries for stationary energy storage in Canada. *Batteries*, 5(1), 14.
- Cheng, Y., Xiao, X., Pan, K., & Pang, H. (2020). Development and application of self-healing materials in smart batteries and supercapacitors. *Chemical Engineering Journal*, 380, 122565.
- Dubarry, M., Qin, N., & Brooker, P. (2018). Calendar aging of commercial Li-ion cells of different chemistries—A review. *Current Opinion in Electrochemistry*, 9, 106-113.
- Dunn, J. B., Gaines, L., Kelly, J. C., James, C., & Gallagher, K. G. (2015). The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. *Energy & Environmental Science*, 8(1), 158-168.
- Engel, H., P. Hertzke and G. Siccardo (2019), "Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage", McKinsey & Company Insights, McKinsey & Company, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/second-life-ev-batteries-the-newest-value-pool-in-energy-storage> (accessed on 27 October 2023).
- Fleischmann, J., Hanicke, M., Horetsky, E., Ibrahim, D., Jautelat, S., Linder, M., ... & van de Rijt, A. (2023). Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular. McKinsey & Company, 2-18.
- Foster, M., Isely, P., Standridge, C. R., & Hasan, M. M. (2014). Feasibility assessment of remanufacturing, repurposing, and recycling of end of vehicle application lithium-ion batteries. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 7(3), 698-715.
- Gao, Z., Xie, H., Yang, X., Zhang, L., Yu, H., Wang, W., ... & Chen, S. (2023). Electric vehicle lifecycle carbon

- emission reduction: A review. *Carbon Neutralization*, 2(5), 528-550.
- Garg, A., Wei, L., Goyal, A., Cui, X., & Gao, L. (2019). Evaluation of batteries residual energy for battery pack recycling: Proposition of stack stress-coupled-AL approach. *Journal of Energy Storage*, 26, 101001.
- Gohlke, D. and M. Criboli, 2021. "Distributions of Real-World Vehicle Travel: Variations in vehicle scrappage by powertrain and size class", unpublished manuscript, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, September
- Júnior, C. A. R., Sanseverino, E. R., Gallo, P., Koch, D., Kotak, Y., Schweiger, H. G., & Zanin, H. (2023). Towards a business model for second-life batteries—barriers, opportunities, uncertainties, and technologies. *Journal of Energy Chemistry*.
- Kettner, C., & Wretschitsch, E. (2023). Taxes and subsidies in EU energy policy: Fit for 55? (No. 656). WIFO Working Papers.
- Lai, X., Yao, J., Jin, C., Feng, X., Wang, H., Xu, C., & Zheng, Y. (2022). A review of lithium-ion battery failure hazards: Test standards, accident analysis, and safety suggestions. *Batteries*, 8(11), 248.
- Larouche, F., Tedjar, F., Amouzegar, K., Houlachi, G., Bouchard, P., Demopoulos, G. P., & Zaghbi, K. (2020). Progress and status of hydrometallurgical and direct recycling of Li-ion batteries and beyond. *Materials*, 13(3), 801.
- Lin, Y., Yu, Z., Wang, Y., & Goh, M. (2023). Performance evaluation of regulatory schemes for retired electric vehicle battery recycling within dual-recycle channels. *Journal of Environmental Management*, 332, 117354.
- Martel, F., Dubé, Y., Kelouani, S., Jaguemont, J., & Agbossou, K. (2016). Long-term assessment of economic plug-in hybrid electric vehicle battery lifetime degradation management through near optimal fuel cell load sharing. *Journal of Power Sources*, 318, 270-282.
- Melin, H. E. (2019). State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries—A research review. *Circular Energy Storage*, 1, 1-57.
- O. Topal and Y. Ateş, "Innovative Financial Approaches for Procurement on Electric Buses in Sustainable Public Transportation Systems," 2021 10th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE), Istanbul, Turkey, 2021, pp. 41-49, doi: 10.1109/ICPSE53473.2021.9656868.
- Regulation (EU) 2023/851 of the European Parliament and of the Council. of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2019/631 as regards the strengthening of CO<sub>2</sub> emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles
- SSANGYONG Türkiye Yetkili Distribütörü, Şahsuvaroğlu Dış Tic. Ltd. Şti TORRES EVX Batarya Garanti Kapsamı <https://www.ssangyong.com.tr/satis-sonrasi/garanti>
- Sloop, S. E., Trevey, J. E., Gaines, L., Lerner, M. M., & Xu, W. (2018). Advances in direct recycling of lithium-ion electrode materials. *ECS Transactions*, 85(13), 397.
- T.C. Ticaret Bakanlığı, AB Batarya Mevzuatı, AB Döngüsel ve Sürdürülebilir Sanayi Politikaları erişim linki: <https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat/avrupa-yesil-mutabakati>
- Topal, O. (2019a) Türkiye Toplu Ulaşım Sisteminde Elektrikli Otobüsler. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2019; 15:155–167.
- Topal, O. (2019b) Türkiye Toplu Ulaşım Sisteminde Elektrikli Otobüsler. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*; 15:155–167.
- Topal, O. (2024). *Elektrikli Araçlarda Kullanılan Yüksek Gerilim Tahrik Bataryaları için Performans ve Garanti Koşullarının İşletilmesine Yönelik Kullanılabilecek Yenilikçi Bir Yaklaşım* (TürkPatent Başvurusu)
- Toro, L., Moscardini, E., Baldassari, L., Forte, F., Falcone, I., Coletta, J., & Toro, L. (2023). A Systematic Review of Battery Recycling Technologies: Advances, Challenges, and Future Prospects. *Energies*, 16(18), 6571.
- Türkiye Statistical Institute Electric and Hybrid Cars Registered in Traffic. Available online: [www.tuik.gov.tr](http://www.tuik.gov.tr) (accessed on 09 May 2024).
- Volkswagen Group EV Battery Recycling Available online: <https://www.youtube.com/watch?v=LABwwX960mk> accessed on 18 November 2023).
- Wikner, E., & Thiringer, T. (2018). Extending battery lifetime by avoiding high SOC. *Applied Sciences*, 8(10), 1825.
- Xu, P., Dai, Q., Gao, H., Liu, H., Zhang, M., Li, M., ... & Chen, Z. (2020). Efficient direct recycling of lithium-ion battery cathodes by targeted healing. *Joule*, 4(12), 2609-2626.
- Ying-hao, X., Yu, H. J., & Li, C. D. (2014). Present situation and prospect of lithium-ion traction batteries for electric vehicles domestic and overseas standards. In 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific).
- Zhang, G., Yuan, X., Tay, C. Y., He, Y., Wang, H., & Duan, C. (2023). Selective recycling of lithium from spent lithium-ion batteries by carbothermal reduction combined with multistage leaching. *Separation and Purification Technology*, 314, 123555.
- Zhang, Y., Zheng, X., Wang, N., Lai, W. H., Liu, Y., Chou, S. L., ... & Wang, Y. X. (2022). Anode optimization strategies for aqueous zinc-ion batteries. *Chemical Science*, 13(48), 14246-14263.
- Zou, H., Gratz, E., Apelian, D., & Wang, Y. (2013). A novel method to recycle mixed cathode materials for lithium ion batteries. *Green Chemistry*, 15(5), 1183-1191.