



Süleyman Demirel Üniversitesi
YEKARUM e-DERGI
(Journal of YEKARUM)

Cilt 10, Sayı 1, 1-30, 2025
E - ISSN: 1309-9388



Elektrikli Araç Bataryalarının Sürdürülebilir Yeniden Üretimi ve İkinci Ömür Kullanım Uygulamalarının İncelenmesi

Engin ÖZDEMİR^{1*}, Halil KAYAK²

^{1*} Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-0882-332X), eozydemir@kocaeli.edu.tr

² EXITCOM Recycling, Çepni Mahallesi, Suadiye Bağdat Cd. No:40 41250 Kartepe Kocaeli Türkiye (ORCID: 0009-0005-3258-2572), h.kayak@exitcom.com

(İlk Geliş Tarihi 28/02/2025 ve Kabul Tarihi 16/04/2025)

(DOI: 10,71208/yekarum.1649027)

ÖZET:

Elektrikli araçlar (EA), karbon emisyonlarını ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma gibi konularda önemli bir çözüm olarak görülmektedir. Ancak, elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon bataryaların (LIB) üretiminden, kullanımına ve ömrünün sonuna kadar olan süreçte bazı önemli çevresel etkileri bulunmaktadır. Bu bağlamda, döngüsel ekonomi yaklaşımı, bu çevresel etkilerin minimize edilmesi ve kaynak verimliliğinin artırılması için yeniden üretim ve ikinci ömür kavramları elektrikli araç bataryaları için etkili bir çözüm sunmaktadır. EA bataryaları açısından döngüsel ekonomi, kullanım ömrünün sonunda geri dönüşümden önce yeniden üretim, yeniden kullanım ve ikinci ömür gibi değerli süreçlere yönelmek anlamına gelir. Yeniden üretim, ömrünü tamamlamış bataryaların parçalanarak hasarlı veya yetersiz performans gösteren hücrelerinin yenilenmesi ve bataryanın fabrika standartlarına yakın bir performansla yeniden üretilmesi olarak açıklanabilmektedir. Bu süreç, enerji tüketimini ve hammadde ihtiyacını büyük ölçüde azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Ancak, teknik zorluklar, standardizasyon eksiklikleri ve ekonomik fizibilite, yeniden üretim süreçlerinde dikkate alınması gereken temel faktörlerdir. İkinci ömür uygulamaları, EA bataryalarının araçlarda kullanılamayacak kadar deşarj kapasitesine düştüğünde (genellikle %80-85) daha düşük güç gerektiren sabit enerji depolama sistemlerinde kullanılmasını içermektedir. Bu uygulamalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, enerji şebekesinin kararlılığı ve yedek enerji sistemlerinde önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak, güvenlik, performans optimizasyonu ve maliyet gibi konular bu süreçlerde aşılması gereken bazı önemli engeller olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, elektrikli araç bataryalarının döngüsel ekonomi perspektifinde sürdürülebilir yeniden üretim ve ikinci ömür yeniden kullanım uygulamaları incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, Batarya, İkinci ömür, Sürdürülebilirlik.

* Sorumlu yazar E-mail: eozydemir@kocaeli.edu.tr

Investigation of Sustainable Remanufacturing and Second Life Applications of Electric Vehicle Batteries

ABSTRACT

Electric vehicles (EVs) are seen as an important solution for reducing carbon emissions and reducing dependence on fossil fuels. However, the lithium-ion batteries (LIBs) used in EVs have significant environmental impacts from their production, use and end-of-life. In this context, the circular economy approach offers an effective solution for electric vehicle batteries with the concepts of remanufacturing and second life to minimize these environmental impacts and increase resource efficiency. For EV batteries, circular economy means moving towards valuable processes such as remanufacturing, reuse and second life before recycling at end-of-life. Remanufacturing can be explained as the process of dismantling end-of-life batteries, replacing damaged or underperforming cells, and remanufacturing the battery to near factory standards. This process contributes to environmental sustainability by greatly reducing energy consumption and raw material requirements. However, technical challenges, lack of standardization and economic feasibility are key factors to consider in remanufacturing processes. Second life applications involve the use of electric vehicle batteries in stationary energy storage systems that require lower power when the batteries are too low in discharge capacity (typically 80-85%) to be used in vehicles. These applications offer significant opportunities in the integration of renewable energy sources, energy grid stability and backup energy systems. However, issues such as safety, performance optimization and cost are some of the major hurdles to be overcome in these processes. In this study, sustainable remanufacturing and second life reuse applications of electric vehicle batteries from a circular economy perspective are examined.

Keywords: *Electric vehicles, Battery, Second life, Sustainability.*

1. GİRİŞ

Elektrikli araçlar (EA), sürdürülebilir ulaşım çözümleri sunan e-mobilité kavramı içinde önemli bir yere sahiptir. Ancak, EA bataryalarının üretimi, kullanımı ve bertaraf edilmesi çevresel, teknik ve ekonomik açıdan ciddi zorlukları beraberinde getirmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için döngüsel ekonomi yaklaşımı kritik bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır. Döngüsel ekonomi, kaynakların daha verimli kullanıldığı, atıkların azaltıldığı ve ürünlerin değer zincirindeki yaşam döngüsünün mümkün olduğunca uzatıldığı bir ekonomik modeldir.

Bu bağlamda, lityum iyon bataryalar (LIB) için yeniden üretim ve ikinci ömür uygulamaları hem çevresel etkileri azaltmada hem de ekonomik sürdürülebilirlik sağlamada kilit roller oynamaktadır. 2030 yılına kadar Avrupa birliği (AB) ülkelerinde yaklaşık 200 GWh’lık toplam geri dönüşüm batarya kapasitesinin olacağının öngörülmesi, LIB sektöründe kayda değer bir pazar genişlemesini ifade etmekte olup, batarya döngüsel ekonomisinde faaliyet gösteren şirketlerin pazar paylarını artırmalarına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, etkin ve sürdürülebilir tersine tedarik zincirlerinin teşvik edilmesi ve desteklenmesi amacıyla uygun politikaların ve düzenleyici çerçevelerin oluşturulması kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Söz konusu politikalar, tüm değer zinciri boyunca bilgi alışverişinin kolaylaştırılmasını sağlarken, aynı zamanda LIB yönetimiyle ilgili potansiyel çevresel ve güvenlik risklerinin de dikkate alınmasını gerektirmektedir [1]. Bunun yanı sıra, geri dönüşüm süreçlerine ilişkin sorumlulukların net bir şekilde tanımlanması ve atanması, batarya döngüsel ekonomisinin sürdürülebilirliği açısından büyük önem arz etmektedir. LIB yönelik artan talep, başta nikel, kobalt ve lityum olmak üzere kritik hammaddelerin çıkarılmasında önemli bir artışa yol açmaktadır [2]. Özellikle 2019 yılı itibarıyla, küresel kobalt arzının büyük bir kısmı Demokratik Kongo Cumhuriyeti’nden sağlanmıştır. Bu durum, LIB tedarik zincirinin, ağırlıklı olarak baskın tedarikçilere bağımlılık nedeniyle, gelecekte arz güvenliği açısından önemli risklerle karşı karşıya kalabileceğini göstermektedir. Diğer tüm taşıt bileşenlerinde olduğu gibi, LIB kullanım süresi boyunca zamanla performans kaybına uğramakta ve çeşitli bozulmalara maruz kalmaktadır.

Avrupa birliğinde (AB), LIB takibi konusunda ve döngüsel ekonomiye katkı anlamında maksimum verim elde etmek için batarya pasaportu çıkartılmıştır. Yeniden üretim sürecinin genel görünümü kapsamında, Avrupa’da ihmal edilebilir düzeyde LIB üretimi varken üretim çoğunlukla Asya’ya dayanmaktadır. Yoğun üretime ve yabancı ithalata olan bağımlılığı azaltmak için, özellikle Avrupa’da, üretim kapasitesinin 2030 yılına kadar 960 GWh’ye ulaşması ve küresel kapasitenin %33’ünü oluşturması öngörülen pil fabrikaları planlanmaktadır [3]. 2023’te küresel LIB kapasitesi 2,8 TWh’yi aşmış ve Çin, dünyanın yıllık LIB kapasitesinin yaklaşık %70’ine katkıda bulunmaktadır. Avrupa’da, Almanya en büyük pazar ve toplamın yaklaşık %5,4’ünü oluşturan 150,8 GWh LIB kapasitesi ile lider ülkeler arasındadır [3].

Bu nedenle, EA bataryaları için farklı uygulamalar arasında (yani yeniden kullanım, yeniden üretim ve geri dönüşüm) yeniden üretim, satılan çok sayıdaki EA’dan yararlanmak için ilginç bir alternatif olabilir. Böylelikle LIB yaşam döngüsünü hücre halinden yeniden dönüştürüleceği hammadde haline kadar takip edilebilmektedir. Avrupa Birliği, EA için sağlaması gereken standartları artık karşılamayan ve düşük enerji kapasitesinde olan LIB, yaşam döngüsüne geri dönüşümden önce ikinci ömür kullanımını eklenmiştir [4]. LIB yaşam döngüsü uzatılarak sürdürülebilirlik süresi artırılmıştır ve döngüsel ekonomiye böylelikle yeni bir ticari alan açılmaktadır. EA, enerji dönüşümü ve karbon nötr hedeflere ulaşma yolunda büyük bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte, bu araçlarda kullanılan LIB çevresel ve ekonomik etkileri, araçların sağladığı sürdürülebilirlik faydalarını kısmen gölgeleyebilir. Özellikle hammadde çıkarımı, üretim süreçlerinin enerji yoğunluğu ve bataryaların bertaraf edilmesi sürecindeki çevresel etkiler, bu bataryaların yaşam döngüsü yönetimini önemli bir

konu haline getirmiştir. Bu bağlamda, döngüsel ekonomi yaklaşımı, bu etkilerin yönetilmesinde ve bataryaların değer zincirine yeniden kazandırılmasında önemli bir çerçeve sunar. Yeniden üretim ve ikinci ömür uygulamaları, bataryaların ekonomik ve çevresel faydalarını artırmanın yanı sıra sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmayı kolaylaştırır.

EA bataryaları genellikle 8-12 yıllık bir kullanım ömrüne sahiptir. Ömrünü tamamlayan bataryalar, genellikle depolama kapasitesinin %80-85'ine düştüğünde araç kullanımı için uygun olmaktan çıkar. Bu noktada, bataryalar geri dönüşüm yerine yeniden üretim ve ikinci ömür kullanımı gibi süreçlerle ekonomiye kazandırılabilir [5]. Bataryalar kapasitesi ikinci ömür kullanımında %50 düşene kadar değerlendirilir. Zaten bu perspektifte %80-85 iken geri dönüşüme gönderildiğinde modüllerden aynı miktarda hammadde çıkartılacaktır, %50 de iken de geri dönüşüme gönderilmesi aynı miktarda hammadde elde edilmektedir. Bataryaların döngüsel ekonomi perspektifinden yaşam döngüsü; üretim, kullanım, geri dönüşüm ve yeniden üretim aşamalarından oluşmaktadır. Batarya üretimi, gerekli hammadde temini, hücre üretimi ve batarya paketlemesi aşamalarından oluşmaktadır.

EA'larda batarya bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. EA bataryası kapasite kaybı yaşandığında, sabit enerji depolama sistemlerinde veya düşük güç gerektiren uygulamalarda yeniden kullanım ile ikinci ömür uygulamasında girmektedir. Bataryadaki hammaddelerin yeniden işlenmesi ve yeni bataryalarda kullanılması da geri dönüşüm olarak adlandırılmaktadır. Yeniden üretim, bataryaların hasarlı veya yetersiz performans gösteren bileşenlerinin onarılması, yenilenmesi veya değiştirilmesi sürecidir. Bu süreçte batarya, neredeyse yeni bir ürün performansına ulaştırılır. Yeniden üretim süreçleri ile kaynak verimliliği, enerji tasarrufu, atık azaltma gibi avantajlar sunmaktadır. Yeni batarya üretimine kıyasla daha az doğal kaynak kullanımı gerektirmektedir. Batarya üretim sürecine göre çok daha düşük enerji tüketimi gereklidir. Ayrıca bu yöntem atık bertarafını önleyerek çevresel kirliliği azaltır. Ancak yeniden üretimin yaygınlaşması için çözülmesi gereken teknolojik, standardizasyon eksikliği ve ekonomik fizibilite gibi bazı temel zorluklar bulunmaktadır.

Bunlara ek olarak hala AB ve ülkemizde ikinci ömür bataryaların kullanımına dair mevzuat ve yasalar bulunmamaktadır, ama bu durum batarya ikinci ömür sistemlerinin yapılamayacağı anlamına gelmemektedir. Belirtilen güvenlik, çevre ve kötü kullanım testlerinde istenilen teknik özelliklerde veriler alınıyor ise bataryalar ikinci ömür uygulamaları için kullanılabilir. Bataryaların yeniden üretime uygun şekilde tasarlanmamış olması bu durumdaki en önemli teknolojik zorluktur. Farklı üreticilere ait bataryaların yeniden üretimi için standartların eksikliği önemli bir problemdir. Yeniden üretim süreçlerinin maliyet etkinliği

için yeterli bir ekonomik fizibilite yapılmalıdır [6]. Batarya üreticileri artık otomobil sanayi için ürettikleri batarya modüllerini, döngüsel ekonomide ve yaşam döngüsünde değerlendirilmesi için ikinci ömür kullanımı da desteleyecek formatta tasarımlara başlayacaklarını açıklamışlardır. Bataryalar, araçlarda kullanılmaz hale geldikten sonra enerji depolama sistemlerinde elektrik şebekesinin kararlılığını sağlamak ve yedek bir güç kaynağı olarak kullanılmak üzere ikinci bir ömre sahip olabilmektedir.

Bu uygulamalar hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlarken güvenlik ve performans optimizasyonu ile maliyet gibi bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Eski bataryaların yangın veya patlama riski oluşturma potansiyeli güvenlik riski oluşturmaktadır. İkinci ömür uygulamalarında bataryaların performansının izlenmesi ve optimize edilmesi gereklidir. Bataryaların toplanması, taşınması ve yeniden konumlandırılması süreçlerinin maliyeti oldukça yüksektir. Döngüsel ekonomi, elektrikli araç bataryalarının sürdürülebilir yönetimi için çok sayıda fırsat sunarken, bazı önemli zorlukların da ele alınmasını gerektirir.

Yeniden üretim ve ikinci ömür uygulamaları doğal kaynak tüketimini azaltır ve karbon emisyonlarını düşürür. Batarya ömrünün uzatılması, maliyetleri düşürerek ekonomik değer yaratır. Batarya yönetim teknolojilerinin geliştirilmesi ve yeni iş modellerinin ortaya çıkmasına olanak sağlamaktadır. Bataryaların yeniden üretim ve yeniden kullanım süreçlerini düzenleyen kapsamlı politikaların eksikliği, üreticiler, kullanıcılar, geri dönüşüm şirketleri ve kamu kuruluşları arasında etkin iş birliği ihtiyacı ve lojistik ve iş gücü maliyetleri gibi unsurlar bu süreçleri ekonomik açıdan zorlayabilmektedir. Sürdürülebilirliğe yönelik küresel değişim, ulaşımın elektrifikasyonunu ve içten yanmalı motorlardan uzaklaşarak temiz enerji depolama çözümlerinin benimsenmesini teşvik etmektedir.

Bu geçiş, EA pazarındaki lityum-iyon pil üretimini önemli ölçüde etkilemektedir. Bir çalışmada, gaz tüketimi, dağıtımı, kullanımı ve lityum üretiminden kaynaklanan kirliliğin toplumu nasıl etkilediğine odaklanarak, elektrikli bataryalarla ilgili bölgesel farklılıkları ve belirli zorlukları vurgulamak için özel konuları özetlemektedir [7]. Elektrikli araç bataryaları, ekonomik ve çevresel etkileri ve yaşam döngülerini anlamının önemi göz önünde bulundurulduğunda sürdürülebilir bir gelecek için umut verici fırsatlar sunmaktadır. EA bataryaları hızla çağımızın en önemli ürünlerinden biri haline gelmektedir. İklim krizi etkileri arttıkça, sera gazı emisyonlarını azaltacak çözümler bulmak zorunlu hale gelmiştir. İçten yanmalı motorlara sahip geleneksel araçlar bu emisyonlara büyük katkıda bulunmaktadır. Buna karşılık elektrikli araçlar, çalışma sırasında sera gazı salımı yapmadıkları için uygulanabilir bir alternatif olarak görülmektedir. EA’ların içten yanmalı motorlar olmadan çalışmasını

sağlamanın anahtar çözümü de bataryadır. LIB kompakt boyutu, hafif yapısı ve son derece yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle EA'lar için en popüler [8]. Lityum-iyon batarya teknolojisini optimize etmek, elektrikli araçların verimliliğini ve performansını artırmak ve sürdürülebilir bir geleceğin önünü açmak için çok önemlidir. EA batarya geri dönüşüm süreçlerine yönelik literatür incelendiğinde; [9] nolu çalışmada kullanım ömrünü tamamlamış elektrikli araç bataryalarının atık azaltma, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanımın çevresel yönetimi değerlendirilmiştir. Ayrıca [10] nolu çalışmada, araçtaki enerji kaynağı olarak seçilecek olan batarya tipinin belirlenmesinde, çok kriterli karar verme yöntemleri olan analitik hiyerarşi prosesi yöntemleri kullanılarak kullanıcı perspektifi bakımından analizler yapılmıştır. EA'larda kullanılan farklı tipte bataryaların açıklandığı çalışmada, önerilen yöntemlerin sonuçları karşılaştırılarak ve en iyi çözüm olarak Li-ion batarya türü önerilmektedir. [11] nolu makale ise temel olarak LIB'lerin geri dönüşümünün ekonomik yönlerine odaklanmakta ve geri dönüşümün avantaj ve dezavantajlarını ve pillerin bertaraf edilmesinin maliyetini ve ekonomik fizibilitesini etkileyen faktörlerin bir araştırmasını sunmakta ve analiz etmektedir.

Bu çalışmanın amacı, EA bataryaları için döngüsel ekonomiye giden alternatif yolları araştırmak, bu amaçla yeniden üretim ve ikinci ömür yeniden kullanım uygulamalarına yönelik çözümleri sunmaktır. Bu çalışmada ayrıca, toplumsal ve çevresel etkiler ve alternatif kullanım ömrü sonu çözümlerinin önemini anlamak için bataryaların özelliklerinin ve yaşam döngüsünün de detaylı incelenmesini içermektedir. Bu çalışmada, gerekli teknolojiler de dahil olmak üzere, EA bataryalarının yaşam döngüsü içinde döngüsel ekonomi uygulamalarının nasıl hayat bulacağı da analiz edilecektir. Ayrıca, potansiyel çevresel ve toplumsal etkiler, mevcut zorluklar ve ele alınması gereken engeller tartışılmaktadır. Son olarak, bu yaklaşımın geleceği şekillendirmesi için nelere ihtiyaç duyulduğu özetlenmektedir. Ayrıca bu çalışmada, özellikle döngüsel bir ekonomiye ulaşmaya odaklanarak EA batarya yaşam döngüsünün çeşitli yönleri araştırılmıştır. Bu çalışmadaki en önemli faktör, EA bataryasının kullanım ömrünün sonunu etkili bir şekilde yönetmektir.

EA'ların kullanım süresini tamamlamış bataryaları, geleneksel olarak doğrudan geri dönüşüm süreçlerine yönlendirilirken, günümüzde bu bataryalar sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda yeniden değerlendirilmektedir. Bu yeni yaklaşım kapsamında, kullanım ömrünü tamamlamış bataryalar öncelikle ikinci ömür potansiyelleri açısından teknik değerlendirmeye tabi tutulmakta, uygunlukları tespit edilen bataryalar ise farklı sistemlerin enerji ihtiyaçlarına hizmet edebilecek şekilde yeniden yapılandırılmaktadır.

İkinci ömür bataryalar; enerji depolama sistemleri, yedek enerji çözümleri, şebeke dengeleme hizmetleri ve konut/ticari amaçlı enerji uygulamaları gibi geniş bir yelpazede yeniden değerlendirilerek hem çevresel hem de ekonomik fayda sağlamaktadır. Bu kapsamda dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan biri, UL 1974: Standard for Evaluation for Repurposing Batteries adlı batarya standarttır. Bu standart, ikinci ömür bataryaların sabit enerji depolama sistemlerinde veya benzer uygulamalarda kullanılmadan önce güvenlik, performans ve uygunluk kriterleri çerçevesinde değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Standart, özellikle elektriksel performans, termal kararlılık, fiziksel bütünlük ve izolasyon gibi birçok teknik kriteri esas alarak, ikincil kullanım öncesi gerekli test prosedürlerini tanımlar.

Bu doğrultuda, dünya genelinde birçok otomotiv üreticisi ile enerji şirketleri iş birliği yaparak, kullanım dışı bataryaların enerji sistemlerine entegrasyonunu sağlamaktadır. Bu sürecin en dikkat çekici örneklerinden biri, Mobility House tarafından Audi iş birliğiyle Almanya'nın Berlin kentindeki EUREF Kampüsü'nde hayata geçirilen projedir. Bu proje kapsamında, daha önce elektrikli araçlarda kullanılan 20 adet Audi e-tron bataryası, sabit bir enerji depolama sistemi olarak yeniden yapılandırılmıştır. Bu tür ikinci ömür uygulamaları, özellikle Avrupa Birliği'nin 2025 yılı hedefleriyle uyumlu olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş ve rüzgar gibi) enerji üretim portföyündeki payının %40 ila %45'e ulaşması öngörülen süreçte kritik bir rol üstlenmektedir. Sabit enerji depolama sistemleri; yenilenebilir enerji üretimindeki dalgalanmaları dengelemekte, enerji arz güvenliğini artırmakta ve enerji maliyetlerini optimize etmektedir. Bu gelişmeler, ikinci ömür batarya uygulamalarının yalnızca teknik bir geri kazanım yöntemi değil; aynı zamanda enerji arzı, karbon ayak izi azaltımı ve kaynak verimliliği bağlamında geleceğin enerji sistemleri için stratejik bir unsur haline geldiğini göstermektedir [12].

TTGV tarafından 2025 yılından yayınlanan "Batarya Geri Dönüşüm Ve İkincil Kullanım Teknolojileri" adlı ön araştırma raporunda batarya üretiminde kullanılan önemli hammaddeler incelenmekte ve ülkemizde kritik olduğu düşünülen bazı maddeler için yapılabilecek çalışmalar verilmektedir. Bu kapsamda belirlenen kritik hammaddelerin batarya üretim süreçlerinde yeniden kullanımı değerlendirilmektedir. Raporda öne çıkan ve Türkiye'nin batarya üretiminde kullanabileceği bazı kritik hammaddeler lityum, kobalt, nikel ve grafit gibi metaller olarak sıralanmaktadır [13].

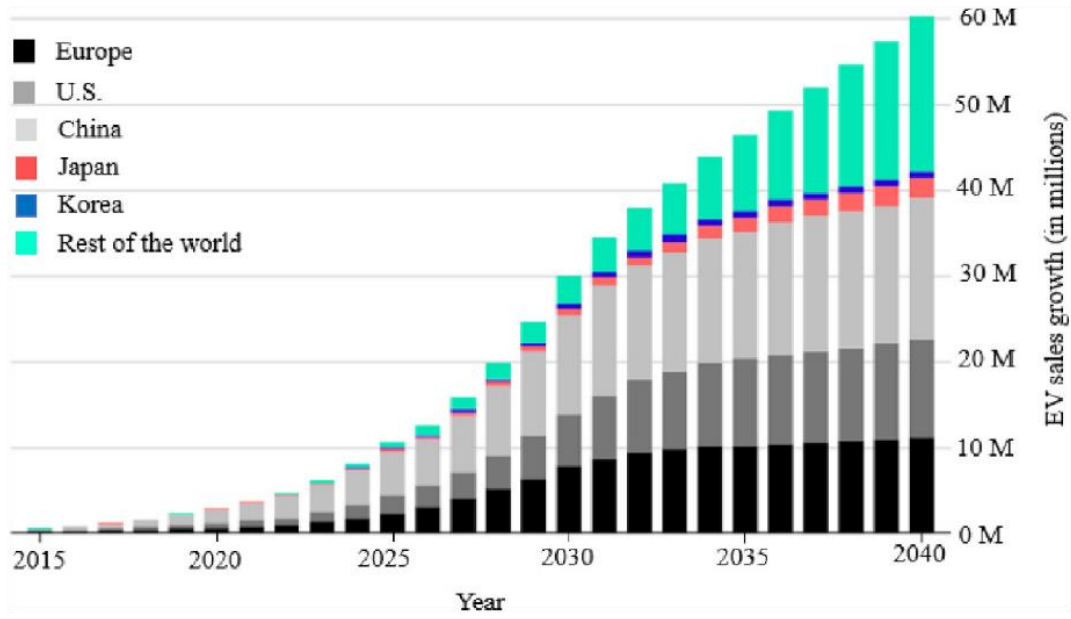
Artık kullanılamaz hale geldiklerinde tüm EA bataryalarının geri dönüştürülmesini veya yeniden kullanılmasını sağlayan süreçlerin uygulanması, döngüsel ekonomi döngüsünün kapatılması için çok önemlidir. Bu tür uygulamalar sadece maliyetleri düşürmek ve verimliliği

artırmakla kalmayacak, aynı zamanda çevresel ve toplumsal sonuçları da önemli ölçüde iyileştirecektir. Bu süreçlerin ölçeklendirilmesindeki zorluklara rağmen, geleceğin umut verici gelişmelere gebe olduğu açıktır. EA bataryalarına olan talep arttıkça, teknolojik yenilikler ortaya çıkan bu sorunları büyük olasılıkla ele alacaktır. Devam eden araştırma ve geliştirmelerle, EA bataryaları için sağlam bir döngüsel ekonomi oluşturmak için gereken çözümler de günümüzde ulaşılabilir durumdadır.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Elektrikli araçlara olan talep hızla artmaktadır ve Şekil 1'de gösterildiği gibi önümüzdeki on yıllarda da artacağı öngörülmektedir. Küresel EA pazarının önümüzdeki on yıl içinde önemli ölçüde büyümesi beklenmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, mevcut politika senaryoları altında 2030 yılına kadar yollardaki elektrikli araç sayısının 145 milyona ulaşacağı ve hızlandırılmış bir senaryoda 230 milyona ulaşma potansiyeline sahip olacağı öngörülmektedir. Bu büyüme, hükümet politikaları, azalan batarya maliyetleri ve daha temiz ulaşım seçeneklerine yönelik artan tüketici talebinden kaynaklanmaktadır [14]. Finansal teşvikler önemli bir itici güç olmak üzere çeşitli faktörler bu eğilime katkıda bulunmaktadır. Başlangıçta, elektrikli araçlar çok pahalıydı, ancak teknoloji ilerledikçe ve üretim süreçleri daha verimli hale geldikçe, maliyetler istikrarlı bir şekilde azalmıştır. Ayrıca, benzinin güvenilmezliği ve artan maliyetleri, yüksek ön maliyetlerine rağmen elektrikli araçları giderek daha cazip bir seçenek haline getirmektedir [15].

Dahası, toplumsal eğilimler daha fazla çevre bilincine doğru kaymaktadır. Birçok insan iklim değişikliğine katkılarının daha fazla farkına varmakta ve karbon ayak izi azaltılmış araçları kullanmaktan memnuniyet duymaktadır [16]. Birçok ülke, elektrikli araçların üretimini ve benimsenmesini teşvik ederken geleneksel araçların üretimini azaltmayı veya ortadan kaldırmayı hedeflemektedir. İngiltere, Fransa, Almanya, Hollanda ve diğer bazı ülkeler Paris Anlaşması'nın hedeflerini taahhüt etmişler ve 2040 yılına kadar içten yanmalı motorlu araçların (ICEV) üretimini aşamalı olarak durdurmak için stratejiler geliştirmektedir [17]. Hükümetler ayrıca Japonya, Almanya, Finlandiya, Fransa ve Avusturya gibi ülkelerde tüketicileri EA tercih etmeye teşvik etmek için satın alma teşvikleri ve elektrik sübvansiyonları gibi destekleyici önlemler almaktadır [18]. Bu faktörler toplu olarak EA'lara olan talebin artmaya devam edeceğini göstermekte ve EA pazarı için olumlu görünümü güçlendirmektedir [19]. Elektrikli araçlarda kullanılmak üzere dört hücreli batarya paketi için pasif hücre dengeleme metodu tabanlı batarya yönetim sistemi tasarlanmış ve uygulaması gerçekleştirilmiştir [20].



Şekil 1. Global EA satış rakamları ve gelecek satış tahmini [21].

Döngüsel ekonomi kavramı, hammadde ihtiyacını azaltmak ve çevresel etkiyi en aza indirmek için mevcut malzeme ve ürünlerin mümkün olduğunca uzun süre yeniden kullanılmasına odaklanmaktadır. Bu yaklaşım, öncelikle malzemelerin geri dönüştürülmesi veya yeniden kullanılması yoluyla tüm ekonomik sektörlerde uygulanabilir. Faydaları oldukça önemlidir: daha az atık üretimi, daha az hammadde çıkarımı ve uzun vadeli maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Bununla birlikte, döngüsel ekonominin yaygın bir şekilde uygulanması, mevcut teknolojik kısıtlamalar ve birçok ürünün etkili bir şekilde geri dönüştürülmesi veya yeniden kullanılması için yerleşik süreçlerin eksikliği ile sınırlıdır. Bu teknolojilerin ve sistemlerin geliştirilmesi, döngüsel ekonominin tüm sektörlerde yayılması için hayati önem taşımaktadır.

EA bataryası, öncelikle yapımlarında kullanılan değerli elementler ve malzemeler nedeniyle ürünlerin döngüsel bir ekonomiye nasıl uyabileceğini örneklemektedir. EA bataryasının yaşam döngüsü lityum, kobalt ve nikel gibi nadir hammaddelerin çıkarılmasıyla başlar. Bu malzemeler daha sonra bataryaları oluşturmak için üretim sürecinde kullanılır. Ortalama ömürleri 10-15 yıl olan bataryalar ömürlerinin sonunda ne olacağı kritik bir sorudur. Döngüsel ekonomi ilkeleri uygulanarak, kullanılmış bataryalardan elde edilen malzemeler ayrıştırılabilir ve geri kazanılabilir. Geri kazanılan bu malzemeler daha sonra yeni piller ve bataryalar üretmek için kullanılabilir ve böylece yeni hammadde çıkarma ihtiyacı azaltılabilir. Bu süreç sadece maliyetleri düşürmekle kalmaz, aynı zamanda verimliliği ve sürdürülebilirliği de artırır.

3. EA BATARYALARININ YAŞAM DÖNGÜSÜ

Bir elektrikli araç bataryasının yaşam döngüsü, hammadde temini ile başlar ve geri dönüşüm veya bertaraf süreciyle sona erer. Döngüsel ekonomi, bu yaşam döngüsünü kesintisiz bir döngü haline getirmeyi hedefler. Batarya yaşam döngüsünün aşamaları şunlardır:

Hammadde Temini: Lityum, kobalt ve nikel gibi kritik metallerin çıkarılması. Bu metallerin çıkarımı, çevresel zararlar ve insan hakları ihlalleri gibi sorunlara yol açabilir.

Üretim: Batarya hücrelerinin üretimi, enerji yoğun bir süreçtir ve genellikle karbon ayak izi yüksektir.

Kullanım: Elektrikli araçlarda bataryaların enerji depolama kapasitesi %80-85 seviyelerine düştüğünde araç kullanımına uygun olmaktan çıkar.

İkinci Ömür Kullanımı: Düşük kapasiteli bataryalar, sabit enerji depolama uygulamalarında veya düşük enerji gereksinimi olan sistemlerde kullanılabilir.

Geri Dönüşüm: Batarya bileşenlerinin kimyasal veya mekanik süreçlerle ayrıştırılarak yeniden işlenmesi. Döngüsel ekonomi, hammadde çıkarımını ve üretim süreçlerini minimize ederek kaynak verimliliğini artırır ve çevresel etkileri azaltır.

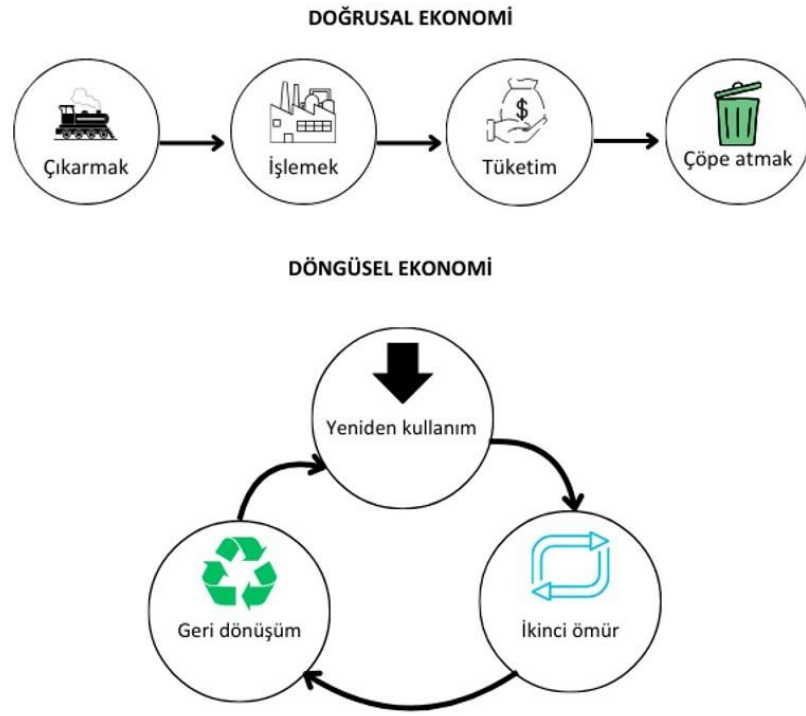
Pek çok çevresel faktör nedeniyle tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de EA'lara olan talep hızla artmaktadır. Artan bu talebi karşılayabilmek ve bu araçlara yeterli güç sağlamak için lityum iyon bataryaların üretiminde de buna karşılık gelen artışlar hem tüketiciler hem de toplum için ekonomik faydalar sağlamaktadır. Bataryaların yeniden kullanımını, başka bir amaca uygun hale getirilmesini ve geri dönüştürülmesini (topluca ikinci yaşam uygulamaları olarak da adlandırılır) teşvik etmek lityum iyon bataryalar sayesinde EA bataryaları için atık ve emisyonları azaltan döngüsel bir ekonomiyi teşvik etmektedir. Şekil 2’de doğrusal (lineer) ve döngüsel ekonomi yaklaşımlarının karşılaştırılması gösterilmektedir.

EA bataryaları döngüsel bir ekonomide kullanımdan kaldırıldığında, birkaç farklı ikinci ömür uygulaması mevcuttur: doğrudan yeniden kullanım, yeniden üretim, ardından yeniden kullanım, yeniden kullanım veya geri dönüşüm. Yeniden kullanım, EA bataryalarının doğrudan başka bir EA geri aktarılması anlamına gelir. Yeniden kullanım, bataryanın yeni ve farklı bir uygulamada kullanılmasını ifade eder. Bu bağlamda geri dönüşüm, başka uygulamalarda yeniden kullanılacak değerli mineralleri çıkarmak için artık kullanılamayan bir pilin yapısının bozulması anlamına gelir.

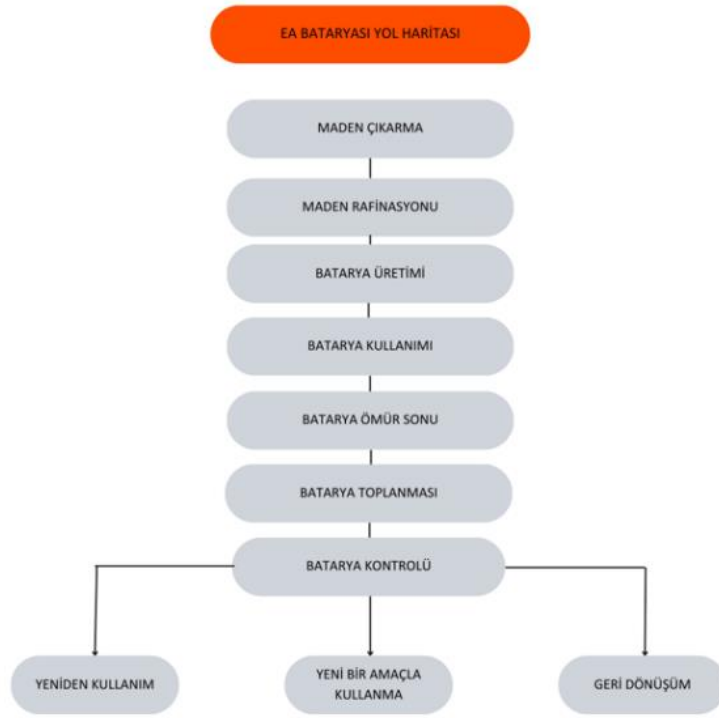
Uygunsuz bir şekilde imha edilmek yerine döngüsel bir ekonomi perspektifinde, EA bataryalarının ikinci ömür uygulamalarında kullanılmasını sağlamak sürdürülebilir bir çözüm olarak önerilmektedir. Bir pilin yeniden kullanılması, başka bir amaca uygun hale getirilmesi

veya geri dönüştürülmesine ilişkin genel adımlar, Şekil 3’de yer alan batarya incelemesi sonrası eklenen bölüm ile döngüsel bir ekonomideki hali ile Şekil 4’de verilmektedir. EA bataryası için ikinci ömür uygulamalarını teşvik eden politikalar tüm dünyada henüz yeni ortaya çıkmaktadır. İkinci ömür uygulamalarına yönelik teşvikler de dahil olmak üzere her ülkede farklı bazı önlemler de alınmaktadır. Kullanım ömrü sonu batarya yönetimini düzenlemek ve ikinci ömür uygulamalarını teşvik etmek için farklı uygulamalar vardır.

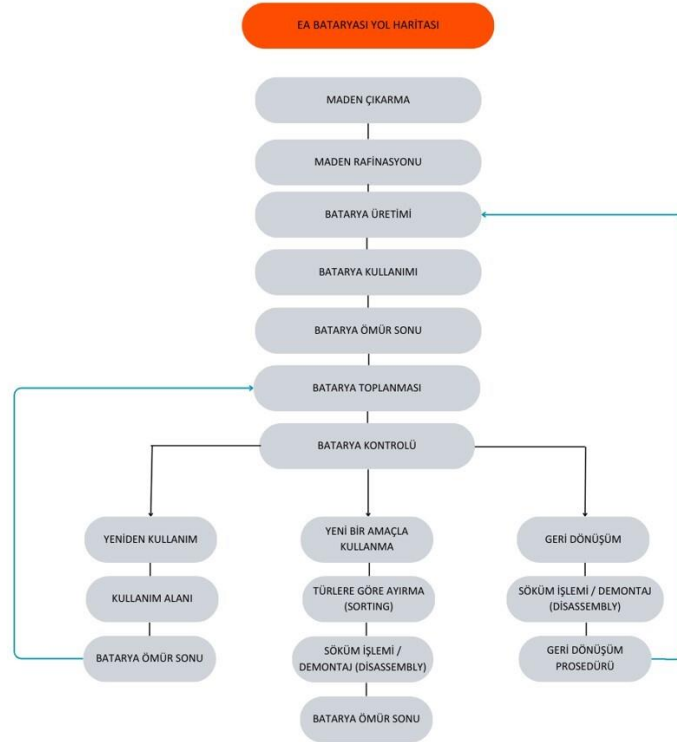
Batarya Toplama: Bir EA bataryası kullanım ömrünün sonuna ulaştığında bataryaların bir noktada toplanması gerekir. Bu toplama sürecinden kimin sorumlu olduğunu açıkça tanımlayan standartların yokluğunda, bataryalar atılabilir veya uygun olmayan şekilde imha edilebilir. Pil ve batarya toplama sorumluluğunu bir kuruluşa veren politikalar, işlevsel bir döngüsel ekonomi için hayati öneme sahiptir.



Şekil 2. Doğrusal ve döngüsel ekonominin karşılaştırılması.



Şekil 3. EA Bataryasının yaşam döngüsü giriş yolu.



Şekil 4. Döngüsel ekonomide EA bataryasının yaşam döngü yolu.

Batarya Denetimi: Batarya toplandıktan sonra mevcut kapasitesinin ve içerik malzemesinin belirlenmesi için incelenmesi gereklidir. Bataryanın uygun şekilde işlenmesini belirlemeye yardımcı olacak bileşim incelemesi, erişilebilir bilgi eksikliği nedeniyle oldukça

zor olabilir. Bazı ülkelerin yasal mevzuatında herhangi bir düzenleme olmadığı da görülmektedir. Batarya etiketlemesi malzeme bileşimini tanımlamaya yardımcı olurken, sağlık durumu bilgisi de bataryanın kullanımı için kalan kapasitesinin belirlenmesine yardımcı olacaktır.

EA kullanım ömrünün sonuna ulaştığında bataryanın sağlık durumu bilgilerinin belirlenmesi oldukça zordur. Elektrikli araç hala çalışıyorsa bu bilgilere yalnızca sertifikalı tamirciler tarafından kullanılan çok özel teknolojik imkanlar aracılığıyla erişilebilir. Araç artık açılmıyorsa veya bataryası çıkarılmışsa, sağlık durumuna ilişkin tahmin, yalnızca orijinal otomobil üreticisi tarafından kullanılabilen özel bir konektörle belirlenebilir. Sonuç olarak üçüncü taraf batarya incelemesinin yapılması oldukça zordur.

Bir inceleme gerçekleştirildikten sonra belirli bir batarya için uygun sonraki adımlar, bataryanın yeniden kullanılabileceğini, başka amaçlara uygun hale getirilebileceğini veya geri dönüştürülebileceğini gösteren inceleme sonuçlarına bağlı olarak belirlenebilir. Her durumda, ilk önce yeniden kullanmak (reuse), ikinci olarak yeniden amaçlandırmak (repurpose) ve başka bir yol bulunamadığında da geri dönüştürmek (recycle) tercih edilmektedir.

EA bataryasının yeniden kullanım (reuse) yolu: Bataryanın farklı bir araca yerleştirilmesi. Bataryanın doğrudan yeniden kullanıma uygun olduğunun belirlenmesi halinde başka bir araçta kullanılmak üzere farklı bir araca yerleştirilebilir. Bataryanın bir sonraki çıkarılışında bu süreç batarya toplama adımında tekrarlanacaktır. Eğer uygun değilse de geri dönüşüme gönderilmesi karar verilecek aşaması ve testleri bu adımda yapılmaktadır. Burada ilk olarak geri dönüşüm tesisine gönderilen EA bataryaların sökülme işlemi sonrasında modüllerin ön teknik bilgi testinin yapılarak bilgi sahibi olunduğu sistemdir. EA bataryalarından çıkarılan modüllerin test süreci, modül içerisindeki batarya yönetim sistemi (Battery Management System: BMS) ile test cihazı arasındaki CAN bağlantısı üzerinden gerçekleştirilmektedir.

Bu süreçte, test cihazının CAN giriş bağlantısı, modülün ilgili CAN çıkışı ile entegre edilerek, özel olarak geliştirilen test yazılımı aracılığıyla test başlatılmaktadır. Test süresince anlık ölçümler gerçekleştirilerek bataryanın durumu değerlendirilir. Modül içerisinde bulunan pil hücrelerinin bireysel gerilim değerleri, sıcaklık değişimleri ve hücrelerin düşük gerilim seviyesinde ölçümleri CAN bağlantısı üzerinden takip edilmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda, modülün kapasite durumu hakkında bilgi sağlanmaktadır. Modülün genel gerilim değerinin istenilen seviyede bulunması durumunda, ilgili modül ve hücrelerin sağlıklı olduğu kabul edilmektedir. Eğer istenilen değerlerde çıkmaz ise modüller geri dönüşüm için derin

deşarj ünitesine gönderilmek üzeri ayrılmaktadır. EA batarya modüllerinde izin verilen değerler skalasında kalır ise ikinci ömür olarak değerlendirilmektedir. Burada test sonucunda gerilim değerleri birbirine en yakın olan modüller seçilmektedir. Bu yöntem, modül içerisindeki pil hücrelerinin daha dengeli ve etkin bir şekilde çalışmasına olanak tanımakta, böylece enerji depolama sistemlerinin uzun vadeli performansını artırmaktadır. Şekil 5’de EA bataryasının makinede test başlangıcı görülmektedir. Bu cihazdan alınan veriler Şekil 6’da bataryanın anlık test verisi olarak gösterilmektedir.



Şekil 5. Bataryanın makinede test başlangıcı.

Live DATA Cell Voltages Settings Messages

BMS Comm. : ESS_State_Execute

Battery SN

Module Voltage

24,620 V 100% SoC (%)

Actual Measurements

Cell min [mV] Cell max [mV] Cell diff [V]

4128 4130 2

Temp min [°C] Temp max [°C]

18 18

Test Result

-OK-

Description

Date 2024 05 0

Time 15:52:50

Module 24.626

Cell 1 (mV) 4128

Cell 2 (mV) 4129

Cell 3 (mV) 4128

Cell 4 (mV) 4129

Cell 5 (mV) 4129

Cell 6 (mV) 4130

Temp 1 (deg C) 18

Temp 2 (deg C) 18

Test result -OK-

SN

SCAN SN (F2)

SCAN TAG (F4)

Print TAG (F10)

Exit TAG

Şekil 6. Bataryanın anlık test verisi.

EA bataryasının yeniden amaçlandırılması (repurpose) yolu: Bu yol ayırma ile başlar, gerekli ise batarya modüllerine ayrılır ve batarya bir noktaya yerleştirilir (sorting, disassembly and placement). EA bataryası teknik incelemeden sonra yeniden kullanılamıyor ancak başka

bir amaca uygun hale getirilebiliyorsa, sıralama bataryanın nasıl yeniden kullanılabilirliğini belirleyecektir.

Yeniden kullanım uygulamaları arasında sokak lambaları, EA şarj istasyonları veya orijinal otomobil üreticisinin elektrik sistemi yer almaktadır. Teknik bir inceleme gerçekleştirildikten sonra belirli bir batarya için uygun sonraki adımlar, bataryanın yeniden kullanılabilirliğini, başka amaçlara uygun hale getirilebilirliğini veya geri dönüştürülebilirliğini gösteren inceleme sonuçlarına bağlı olarak belirlenmektedir. Her durumda, ilk önce yeniden kullanmak, ikinci olarak yeniden amaçlandırmak ve başka bir yol izlenemediğinde geri dönüştürmek tercih edilir. Sonuç olarak, üçüncü taraf bataryaları için bu sürecin gerçekleştirilmesi çok zordur.

Örneğin, Volkswagen artık EA şarjında ikinci ömürlü EA bataryalarını kullanmakta ve Kaliforniya merkezli şirket B2U Storage Solutions, enerji depolamak için pilleri kullanmaktadır. Otomobil üreticileri bile yeniden kullanım alanına girmektedir; Örneğin Nissan, EA bataryalarını enerji depolama amacıyla yeniden kullanmak üzere Relyion Energy ile ortaklık yapmaktadır. Bazı durumlarda, batarya paketinin başka bir amaca uygun hale getirilmeden önce sökülmesi gerekmektedir. Birçok batarya yeniden değerlendirme uygulaması yeterli bir enerji kaynağı gerektirir. Ancak eski batarya modüllerinin kapasitesi ve yetenekleri büyük ölçüde farklılık gösterebilir.

Her bir batarya modülünün sağlık durumu inceleme aşamasında belirlenebilirken, bazı uygulamalarda, uygulama içinde uyumlu bir batarya biriminin mevcut olduğundan emin olmak için daha fazla sökme işlemi yapılması gerekebilir. Yeniden kullanılan bataryalar için son adım, bunları yeni uygulamalarına yerleştirmektir. Bireysel binalar için enerji depolama gibi uygulamalarda batarya ömrü uzatılabilir. Bataryanın yeniden kullanıldığı uygulamada, yeniden yerleştirme ile bataryanın ömrü 6-10 yıla kadar uzatılabilir. EA hızlı şarj cihazları gibi uygulamalar sayesinde bir EA bataryasının ömrü 10 yıldan fazla uzayabilmektedir. Tablo 1'de bataryanın ömrünün uzatılabilirliği yeniden tasarlanmış uygulamaların birkaç örneği zaman çizelgesiyle birlikte özetlenmektedir.

Tablo 1. Çeşitli uygulamalarda yeniden kullanıldığında EA batarya ömrü.

Uygulama	Açıklama	Genişletilmiş Pil Ömrü
EA Hızlı Şarj Cihazı	Piller bir EA hızlı şarj cihazında enerji depolama amacıyla yeniden kullanılır.	12 yıl
Öz tüketim	Pille tek bir bina için enerji depolama amacıyla yeniden kullanılır.	11,6 Yıl
Alan düzenlemesi	Piller enerji depolama ve şebeke kararlılığı için yeniden kullanılır	5,7 yıl
İletim erteleme	Piller mahalle şebeke trafosunda güç desteği sağlamak için yeniden kullanılır. Düşük talep saatlerinde enerji depolanır ve gerektiğinde sağlanır	12 yıl

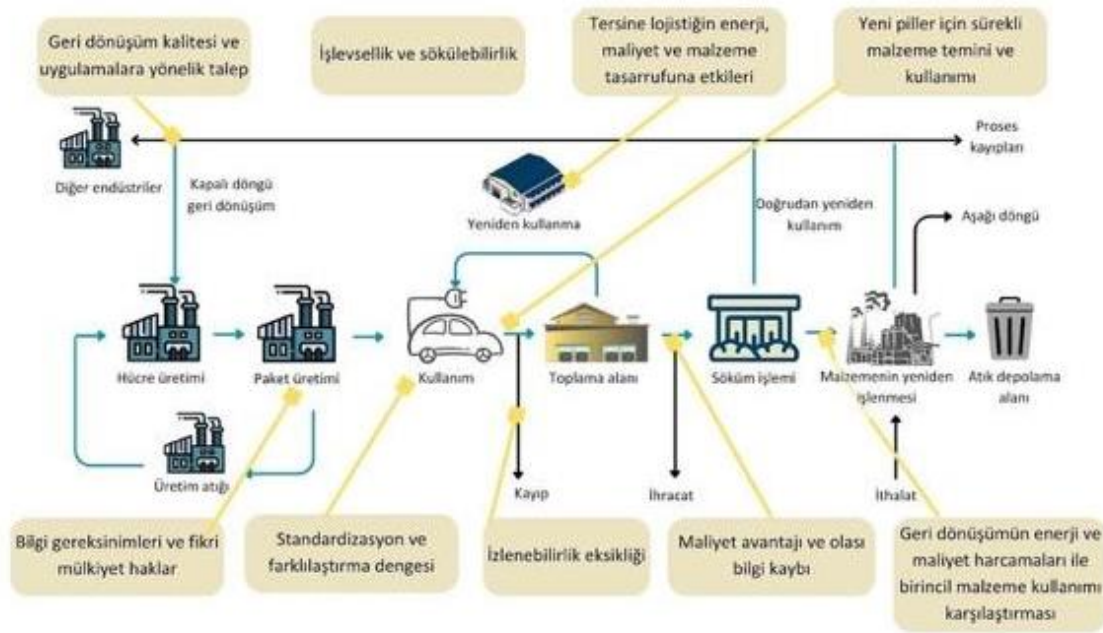
Batarya artık yeni uygulamasında kullanılamadığında pil toplama adımına geri gönderilmelidir. Bundan sonraki yol muhtemelen geri dönüşüm olacaktır. Ancak başka bir uygulamada tekrar kullanılıp kullanılamayacağının belirlenmesi için detaylı bir inceleme yapılması gerekmektedir.

EA bataryasının geri dönüşüm (recycle) yolu: EA bataryalarının geri dönüşüm süreci, toplama, sınıflandırma, söküm ve malzeme geri kazanımı gibi adımları içerir. Kullanılmış bataryalar önce özel tesislere taşınır, ardından kimyasal yapılarına göre sınıflandırılır ve mekanik veya kimyasal yöntemlerle parçalara ayrılır. Ayrıca, doğrudan katot geri dönüşümü gibi yöntemler, batarya bileşenlerinin yeniden kullanımını optimize ederek kaynak verimliliğini artırır. Geri kazanılan malzemeler yeni batarya üretiminde veya enerji depolama sistemlerinde ikinci ömür uygulamalarına entegre edilir.

Batarya geri dönüşüm süreci, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak ve değerli materyalleri yeniden kullanıma kazandırmak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu süreç, üretimden kullanıma, kullanım sonrasında toplanmaya ve nihayetinde geri dönüşüme kadar uzanan bir döngü oluşturur. Bataryalar önce hücre ve paket üretimi aşamalarından geçer, ardından tüketiciler tarafından kullanılır. Kullanım süresi dolan bataryalar, toplama alanlarında toplanarak söküm işlemi uygulanır ve malzemeler yeniden işlenerek geri dönüşüm sürecine dahil edilir. Ancak bu süreçte bazı önemli zorluklar bulunmaktadır. Bilgi gereksinimleri ve fikri mülkiyet hakları, standartlaşma ile farklılaştırma arasındaki denge, izlenebilirlik eksiklikleri ve

tersine lojistiğin enerji, maliyet ve malzeme tasarrufuna etkileri gibi konular bu zorluklar arasında yer almaktadır.

Ayrıca, geri dönüşüm sürecinde maliyet avantajları ile olası bilgi kayıpları ve yeni bataryalar için sürekli malzeme temini gibi unsurlar da göz önünde bulundurulmalıdır. Batarya geri dönüşümünün enerji ve maliyet harcamaları açısından birincil malzeme kullanımına kıyasla avantajları değerlendirildiğinde, döngüsel ekonomiye sağladığı katkı açıkça görülmektedir. Bu bağlamda, geri dönüşüm kalitesi ve uygulamalara yönelik talep her geçen gün artmakta, işlevsellik ve sökülebilirlik konuları ön plana çıkmaktadır. Daha verimli bir geri dönüşüm süreci için teknoloji ve lojistik planlamalarının iyileştirilmesi, atıkların minimize edilmesi ve çevresel etkilerin azaltılması büyük önem taşımaktadır. Şekil 7’de batarya geri dönüşüm süreci görülmektedir.



Şekil 7. Batarya geri dönüşüm süreci.

Geri dönüşüm kalitesi ve uygulamalara yönelik taleplerin, özellikle kapalı döngü geri dönüşüm süreçleri bağlamında incelenmesi önemlidir. Şekil 7’de verilen görselde sunulan bilgiler, endüstriyel süreçlerde geri dönüşümün farklı aşamalarını, malzeme akışını, enerji ve maliyet tasarrufu potansiyellerini ve bu süreçlerin çevresel ve ekonomik etkilerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Geri dönüşüm süreçlerinin standardizasyonu, fikri mülkiyet hakları ve bilgi yönetimi gibi konulara da değinerek, döngüsel ekonomi çerçevesinde sürdürülebilir üretim ve tüketim modellerine katkıda bulunmayı hedeflemektedir. Günümüzde LIB’lar, EA,

taşınabilir elektronik cihazlar ve enerji depolama sistemleri (EDS) gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bataryaların artan kullanımı, çevresel etkileri ve değerli malzeme içeriği nedeniyle geri dönüşüm konusunu önemli hale getirmiştir.

Döngüsel ekonomi malzemelerin ürün yaşam döngüsü boyunca sürekli olarak kullanılmasını sağlayan bir sistemdir. Bu süreç, hücre üretimi, paket üretimi, kullanım, toplama alanı, söküm işlemi, malzemenin yeniden işlenmesi ve atık depolama alanı gibi aşamalardan oluşmaktadır. Hidrometalurjik yöntemler, yüksek geri kazanım oranları ve düşük emisyonlar nedeniyle daha avantajlı olarak kabul edilirken, pirometalurjik yöntemler daha düşük maliyetli olabilir ancak çevresel etkileri daha yüksek olabilir. Her aşama, malzeme akışının optimize edilmesi ve kayıpların minimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Geri dönüşüm süreçlerinde malzeme akışı, üretim atıkları, kayıplar, ihracat ve ithalat gibi faktörlerden etkilenmektedir. Proses kayıpları, malzemenin yeniden işlenmesi sırasında ortaya çıkan verimsizlikleri ifade eder ve bu kayıplar, geri dönüşümün genel verimliliğini düşürebilir. Bu nedenle, proses kayıplarının azaltılması, kapalı döngü geri dönüşüm süreçlerinin başarısı için hayati öneme sahiptir.

Tersine lojistik, geri dönüşüm süreçlerinde enerji, maliyet ve malzeme tasarrufu sağlamak için kullanılan önemli bir stratejidir. Bu yaklaşım, atık malzemelerin toplanması, taşınması ve yeniden işlenmesi süreçlerini optimize ederek hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlar. Geri dönüşümün enerji ve maliyet harcamaları, sürecin genel verimliliğini belirleyen kritik faktörlerdir. Geri dönüşüm süreçlerinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, standardizasyon ve fikri mülkiyet haklarının dengelenmesi gerekmektedir. Standardizasyon, farklı endüstrilerde uyumlu geri dönüşüm uygulamalarının geliştirilmesine olanak tanırken, fikri mülkiyet hakları, yenilikçi geri dönüşüm teknolojilerinin korunmasını sağlar. Bu dengenin sağlanması, geri dönüşüm süreçlerinin daha yaygın ve etkili bir şekilde uygulanmasına katkıda bulunacaktır.

4. BATARYA YENİDEN ÜRETİMİ

Yeniden üretim, kullanılmış veya atık hale gelmiş piller üzerinde gerçekleştirilebilen çeşitli teknik işlemleri içeren, ileri düzeyde bir döngüsel ekonomi uygulamasıdır. Bu süreç, özellikle atık piller söz konusu olduğunda, yeniden kullanıma hazırlık veya yeniden kullanım için hazırlık olarak değerlendirilebilir. Ancak, yeniden üretimin temel amacı, bir pilin orijinal performansına ulaşmasını sağlamak olup, bu kapsamda pil hücrelerinin ve modüllerinin sökülmesi, değerlendirilmesi ve belirli bir kısmının değiştirilmesini gerektiren kapsamlı bir

teknik müdahale sürecidir. Yeniden üretimi sıradan yeniden kullanımdan ayıran temel kriterlerden biri, pil kapasitesinin orijinal nominal kapasitesinin en az %90'ına geri kazandırılmasıdır. Ayrıca, tüm bireysel pil hücrelerinin sağlık durumu arasındaki farklılık %3'ü aşmamalıdır. Bu kriterler sağlandığında, yeniden üretilen pilin başlangıçta tasarlandığı uygulama veya kullanım amacına uygun bir şekilde tekrar piyasaya sürülmesi mümkün olmaktadır [22].

4.1. Yeniden Üretimin Avantajları Enerji ve Hammadde Tasarrufu:

Yeni batarya üretimine kıyasla, yeniden üretim enerji ve hammadde tüketimini %40-70 oranında azaltabilir, lityum, nikel, kobalt ve grafit gibi kritik hammaddelerin geri kazanımını sağlayarak doğal kaynakların tükenmesini önler. Madencilik faaliyetlerini ve çevresel etkilerini azaltır, su tüketimini ve karbon emisyonlarını düşürür. Maliyet Avantajı: Kullanılmış bataryaların yeniden üretimi, yeni batarya üretimine göre daha düşük maliyetlidir. Atık Yönetimi: Yeniden üretim, batarya atıklarının oluşumunu azaltır ve bertaraf sürecindeki çevresel riskleri minimize eder. Döngüsel ekonomi modeline katkı sağlayarak, sürdürülebilir üretim ve tüketimi teşvik eder. Sanayi ve Ekonomiye Katkı: Yeniden üretim sektörü yeni iş alanları oluşturur ve batarya geri dönüşüm ekosistemini güçlendirir. Elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji depolama sistemleri ve mobil güç çözümleri gibi sektörlerde önemli bir pazar oluşturur.

4.2. Yeniden Üretim Sürecindeki Zorluklar

Standardizasyon Eksikliği: Farklı üreticilere ait bataryalar, farklı tasarım ve yapılandırmalara sahiptir, bu da yeniden üretimi zorlaştırabilir. Yüksek Teknolojik Gereksinimler: Yeniden üretim süreçleri, ileri düzey teknik bilgi ve ekipman gerektirir. Ekonomik Fizibilite: Yeniden üretim süreçlerinin ekonomik açıdan uygulanabilirliği, toplanan bataryaların durumu ve lojistik maliyetler gibi faktörlere bağlıdır.

5. BATARYA İKİNCİ ÖMÜR YENİDEN KULLANIMI

Bataryaların ikinci ömür uygulamaları, enerji depolama sistemlerinde yeniden kullanımı kapsar. Bataryaların bu süreçteki potansiyel uygulama alanları şunlardır: Yenilenebilir Enerji Depolama: Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin depolanması. Şebeke Dengeleme: Elektrik şebekesindeki dalgalanmaların

azaltılması ve enerji talebine yanıt verilmesi. Yedek Güç Sistemleri: Evler, işletmeler ve hastaneler gibi alanlarda yedek enerji kaynağı olarak kullanılması.

İkinci Ömür Uygulamalarının Avantajları

Karbon Ayak İzinin Azaltılması: Bataryaların yeniden kullanımı, enerji yoğun yeni batarya üretimine olan ihtiyacı azaltır.

Ekonomik Katkı: Batarya ömrünün uzatılması, enerji depolama sistemlerinin maliyetlerini düşürür ve yeni iş modelleri yaratır.

Kaynak Verimliliği: Bataryalarda kullanılan lityum, kobalt, nikel gibi değerli metallerin geri dönüşümü veya yeniden kullanımı, madencilik faaliyetlerinin çevresel etkisini azaltır.

Döngüsel Ekonomi: Bu uygulama, döngüsel ekonomi modellerinin benimsenmesine ve sürdürülebilir endüstriyel uygulamaların yaygınlaşmasına yardımcı olur.

Sürdürülebilirlik Hedeflerine Uyum: İkinci ömür bataryalar, Avrupa Birliği gibi bölgelerdeki sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm hedeflerine uyum sağlar [23].

Yasal Düzenlemeler: Batarya atıklarının azaltılmasına yönelik yasal düzenlemeler, ikinci ömür uygulamalarını teşvik eder.

İkinci Ömür Sürecindeki Zorluklar

Performans İzleme: Kullanılmış bataryaların kalan kapasitesinin ve güvenilirliğinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi gereklidir. Güvenlik Sorunları: İkinci ömür kullanımında, bataryaların yangın veya patlama riskine karşı güvenli bir şekilde çalıştırılması sağlanmalıdır. Lojistik ve Geri Dönüşüm: Kullanılmış bataryaların toplanması ve uygun şekilde taşınması için etkili lojistik sistemleri gereklidir. Elektrikli araçlarda (EA) kullanılan lityum-iyon bataryalar, araç için uygun kullanım ömrünü tamamladıktan sonra, hala önemli bir enerji depolama kapasitesine sahip olabilir.

Bu bataryalar, "ikinci ömür" uygulamaları kapsamında başka alanlarda yeniden kullanılabilir. Bu yaklaşım, döngüsel ekonomi ilkelerine dayanır ve çevresel etkilerin azaltılması, enerji kaynaklarının verimli kullanımı ve ekonomik faydalar yaratmayı hedefler. EA bataryalarının ikinci ömür yeniden kullanım alanları:

- Yenilenebilir Enerji Depolama
- Şebeke Dengeleme (Grid Balancing)
- Yedek Güç Kaynağı (UPS – Kesintisiz Güç Kaynağı)
- Mobil Şarj İstasyonları
- Mikro Şebekeler (Mikro elektrik şebeke sistemleri)
- Geçici Enerji Depolama Çözümleri

- Ticari ve Endüstriyel Kullanım olarak özetlenebilir.

EA bataryalarının ikinci ömür yeniden kullanım uygulamaları hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli katkılar sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji depolama, şebeke dengeleme, mikro şebekeler ve mobil şarj istasyonları gibi uygulamalar, döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu sürdürülebilir bir gelecek için kilit öneme sahiptir. İleriye dönük olarak, daha fazla Ar-Ge yatırımı, regülasyonlar ve kamu-özel sektör iş birliği ile bu uygulamaların daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

6. DÖNGÜSEL EKONOMİ ÇERÇEVESİNDE POLİTİKA VE STRATEJİLERİ

Döngüsel ekonomi uygulamalarının başarılı bir şekilde hayata geçirilmesi için politika ve stratejiler hayati önem taşır: Regülasyonların Geliştirilmesi: Batarya üretimi, kullanımı ve geri dönüşümünü kapsayan kapsamlı yasal düzenlemeler oluşturulmalıdır.

Teşvikler: Yeniden üretim ve ikinci ömür uygulamalarını destekleyen mali teşvikler ve sübvansiyonlar sağlanmalıdır.

Modüler Tasarımlar: Bataryaların demonte edilmesini kolaylaştıracak tasarım standartları teşvik edilmelidir.

Farkındalık Kampanyaları: Döngüsel ekonominin faydaları konusunda kamu ve sanayi bilgilendirilmelidir.

Yeniden üretim ve ikinci ömür uygulamalarının yaygınlaşması için aşağıdaki konular ele alınmalıdır:

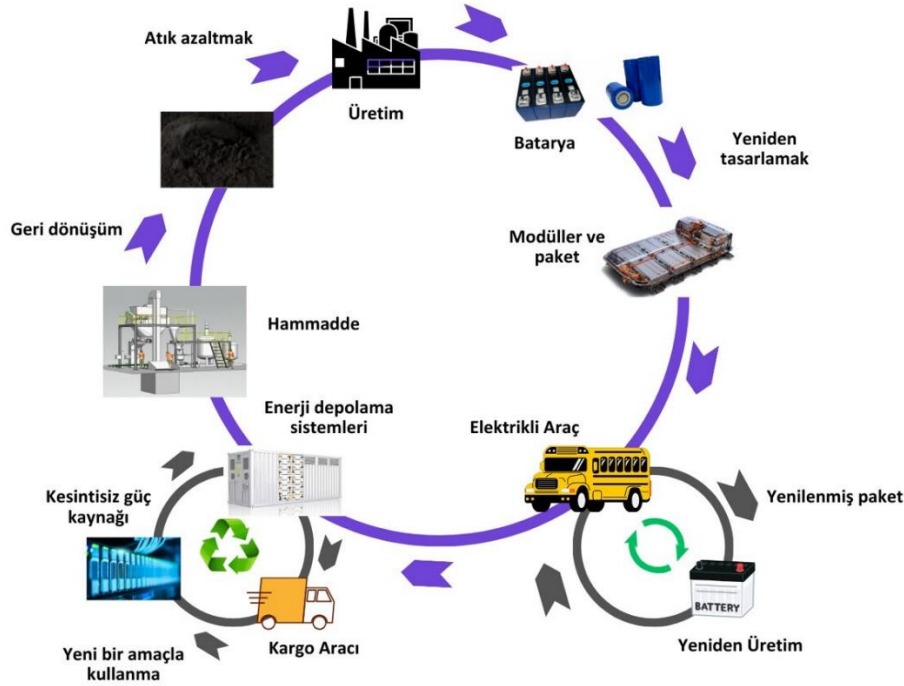
1. Teknolojik Gelişmeler: Bataryaların tasarım süreçlerinde döngüsel ekonomi prensiplerini destekleyecek şekilde modülerlik ve kolay demontaj özelliklerinin artırılması.
2. Regülasyon ve Politika: Küresel ve yerel ölçekte standartların oluşturulması, teşviklerin sağlanması ve yasal çerçevelerin geliştirilmesi.
3. Ekonomik Sürdürülebilirlik: Yeniden üretim ve ikinci ömür projelerinin maliyet etkinliğinin artırılması ve bu süreçlere yönelik iş modellerinin geliştirilmesi.
4. Çevresel Katkı: Geri dönüşümün öncesinde yeniden kullanım ve üretimin önceliklendirilmesi, doğal kaynakların korunması ve karbon ayak izinin azaltılması.

Döngüsel ekonomi perspektifi, elektrikli araç bataryalarının sürdürülebilir yönetimi için yenilikçi ve çevre dostu çözümler sunmaktadır. Elektrikli araç bataryalarının yeniden üretim ve ikinci ömür yeniden kullanım uygulamaları hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlayarak değer zincirini genişletir. Ancak bu uygulamaların başarılı bir şekilde hayata geçirilmesi için

çok paydaşlı bir yaklaşım ve güçlü bir iş birliği gereklidir. Avrupa'daki düzenlemeler, pilleri bağımsız bir ürün olarak veya EA gibi bir sistemin parçası olarak piyasaya süren şirketlerin, bu pillerin geri dönüşümü için nihai toplama sürecini ve uygun yönetimini organize etmekle yükümlü olduğunu belirtmektedir. Ancak, pillerin yeniden kullanımının teşvik edilmesi sürece yeni bir aktör dahil etmektedir. Kullanım ömrünü tamamlamış pillerin nihai yönetim sorumluluğu konusundaki belirsizlik, ilgili tüm paydaşların yasal çerçeveyi netleştirmek istediği kritik bir tartışma konusudur. İspanya örneğinde, bazı ikinci ömür batarya şirketleri, elektronik atık yönetimine ilişkin 2008/98 sayılı direktifin sunduğu olanaklardan yararlanmaktadır. Bu direktif, herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan, tüm bileşenlerin veya unsurların yeniden kullanımına yönelik bir kontrol, temizlik ve/veya onarım sürecini içeren "yeniden kullanıma hazırlık" sürecine ilişkin bir hüküm içermektedir. Bu bağlamda, bazı şirketler pilleri elektronik ekipman olarak değerlendirmekte olup, bu yaklaşımın tamamen doğru olmayabileceğinin farkındadırlar.

Ayrıca, tüm elektrikli araç bataryalarının ikinci ömür kullanımına uygun olmayabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Ulaşım elektrifikasyonu, Paris Anlaşması'nda belirtildiği üzere küresel ısınmanın 1,5°C'nin altında tutulması için en temel yollardan biridir [24]. Elektrikli araçlar (EA), hareket etmelerinde gerekli enerjiyi depolamak için büyük ölçüde lityum iyon bataryaları kullanmaktadır. Günümüzde bataryalar akademide, endüstride ve politika yapıcılar arasında aktif bir alan olmuştur ve EA bataryası geliştirmek için büyük yatırımlar yapılmaktadır. Kullanılmış bataryalar için geleneksel yaklaşım öncelikle yeniden amaçlandırma, yeniden kullanma veya geri dönüşümdür. Sürdürülebilir enerji çözümü için kullanılmış EA bataryalarının yeniden kullanımı ve geri dönüşümü gerekmektedir. Kullanılmış EA bataryalarının döngüsel ekonomisi için en ideal çözüm: yeniden üretim (remanufacturing), ikincil amaçlı kullanım (repurpose) ve kıymetli malzemelerin geri dönüşümüdür (recycling).

Kullanılmış EA bataryaları için döngüsel ekonomi modeli yaklaşımı Şekil 8'da verilmektedir. Kullanılmış EA bataryası yeniden kullanım için uygun değilse geri dönüşüm en uygun çözümdür. Yeniden üretilip kullanılan EA bataryası ikincil amaçlı olarak da kullanılabilir. İkincil amaçlı kullanılan EA bataryası geri dönüşüme gönderilir. Böylece EA bataryası için döngüsel ekonomi çevrimi kapanmış olur. EA bataryası için yeniden üretilip kullanma, ikincil amaçlı yeniden kullanım, yeniden tasarım, azaltma ve geri dönüşüm; ekonomik ve çevresel açıdan 5R stratejisi olarak isimlendirilmektedir.

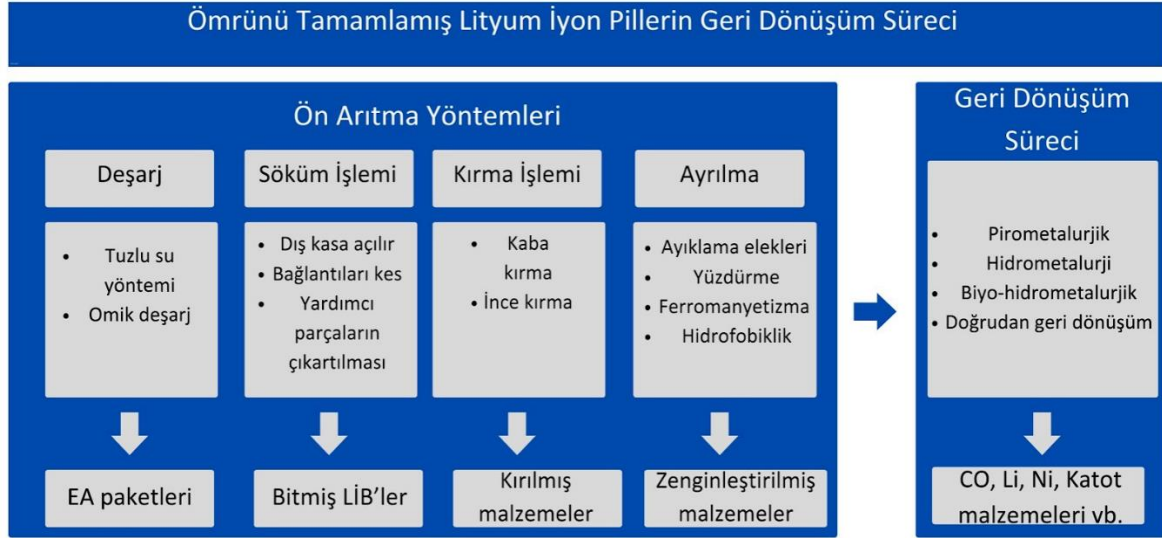


Şekil 8. Kullanılmış EA bataryaları için döngüsel ekonomi modeli yaklaşımı.

Kullanılmış EA bataryası toplanıp yeniden değerlendirileceği sahaya götürüldüğünde sonraki işlem basamağını belirlemek için öncelikle teknik olarak değerlendirilir. Bataryalar maliyet yanında batarya sağlık durumu (SOH), kalan faydalı ömür (RUL) emniyetli çalışma ve güvenlik yönünden teknik incelemeye alınır. Yapılan incelemede en iyi görülen bataryalar EA uygulamalarında kullanılmak üzere için yeniden üretilir. Batarya paketinde yapılan inceleme ile belirlenen yetersiz batarya hücreleri farklı paket içindeki daha iyi durumdaki hücreler ile değiştirilebilir. Yeniden üretim süreci, detaylı batarya testi, tarama, batarya paketinin kısmen parçalara ayrılması, yetersiz hücrelerin iyi durumdaki hücreler ile değiştirilmesi ve batarya paketinin yeniden monte edilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Böylece yeniden üretilen batarya paketi EA üreticisine gönderilir. EA bataryasının bu şekilde yeniden üretiminin yeni batarya göre %40 daha ucuz olacağı ifade edilmektedir. EA batarya testlerinde, güvenlik, sağlık durumu (SOH) ve kalan ömrün belirlenmesi (RUL) gibi testler uygulanmaktadır. Güvenlik testlerinde EA bataryası mekanik, elektriksel, çevre ve kimyasal testler yapılmaktadır.

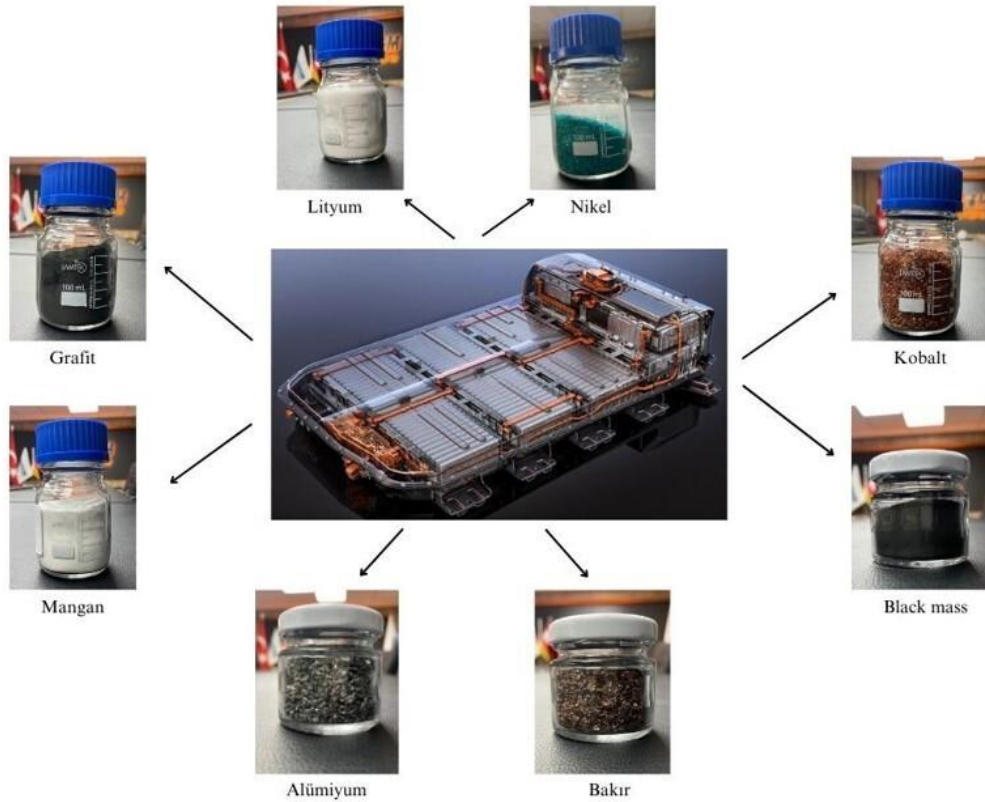
EA bataryasının geri dönüşümü, batarya içindeki değerli metallerin geri kazanılmasını sağlayarak hammadde ihtiyacını azaltmaktadır. Geri dönüşüm, ön işlem ve hammadde ayrılması olmak üzere iki basamaktan oluşur. Ön işlem aşamasında EA batarya paketi hücreleri paketten çıkarılıp küçük parçalara ayırma işlemi olup sırasıyla deşarj, demontaj, ezme, tarama

ve ayırma basamaklarından oluşmaktadır. Hammaddelere ayırma sürecinde ise pirometalurji, hidrometalurji, biyohidrometalurji ve doğrudan geri dönüşüm metotları olarak uygulanır. Ayrıca batarya elektrolit ve anottaki kıymetli bileşenler de bu şekilde geri kazanılabilir. Ömrünü tamamlamış EA bataryasının geri dönüşüm süreci Şekil 9’de verilmektedir.



Şekil 9. Ömrünü tamamlamış EA bataryasının geri dönüşüm süreci.

Kullanılmış EA bataryası kısa devre sonucu patlamaya veya yangına neden olabilecek artık bir enerjiye sahip olabilir. Bu nedenle EA bataryasının öncelikli olarak deşarj edilmesi gerekir. Geri dönüşüm aşamasındaki parçalara ayırma işleminde (demontaj) EA bataryası öncelikle modüle veya hücrelerine ayrılmaktadır. EA batarya dış muhafaza çerçevesinin açılması, hücre bileşenleri arasındaki elektriksel bağlantılarının kesilmesi, hücreler ve taban arasındaki mekanik bağlantıların sökülmesi ve diğer elektronik ekipmanların ayrılması gibi işlemlerden oluşmaktadır. Batarya ayırma işlemi genellikle el ile manuel olarak yapılmaktadır. EA bataryalarının elektrik şebekesi uygulamalarında “ikinci bir yaşam” için yeniden kullanılması, bu yüksek kaliteli bataryaların değerini EA hizmetinin ötesine taşımak ve şebeke ölçeğinde enerji depolamanın sermaye maliyetini azaltmak için potansiyel bir çözümdür. Boyut, şekil, kimya, performans ve termal yönetim açısından EA bataryaları arasındaki çeşitlilik göz önüne alındığında, farklı marka ve modellerdeki bataryaların performansının ikinci ömür uygulamasında farklılık göstermesi beklenmektedir.



Şekil 10. EA bataryaların geri dönüşümünden kazanılan hammaddeler.

Şekil 10’da, bir EA bataryasının geri dönüşüm süreciyle elde edilen temel hammaddeleri görülmektedir. Merkezde bir elektrikli araç bataryası yer alırken, çevresinde bu bataryanın geri dönüşümü sonucunda elde edilen elementler ve bileşikler bulunmaktadır:

1. **Lityum (Li)** – Bataryanın katot kısmında yer alan temel bir bileşendir. Yeniden rafine edilerek yeni batarya üretiminde kullanılabilir.
2. **Nikel (Ni)** – Bataryaların enerji yoğunluğunu artırmak için kullanılır. Katot malzemesi olarak önemli bir rol oynar.
3. **Kobalt (Co)** – Lityum-iyon bataryaların katotunda bulunan kritik bir malzemedir ve enerji depolama kapasitesini artırır.
4. **Grafit (C)** – Bataryaların anot kısmında kullanılan bir malzemedir. Lityum iyonlarının depolanmasını sağlar.
5. **Mangan (Mn)** – Batarya katotlarında kararlılığı artıran önemli bir bileşendir.
6. **Black Mass** – Geri dönüştürülmüş bataryalardan elde edilen ve lityum, nikel, kobalt gibi değerli metallerin bulunduğu karışık bir tozdur.

7. **Alüminyum (Al)** – Bataryaların dış yapısında ve elektrotlar arasında kullanılır.

8. **Bakır (Cu)** - Batarya içindeki iletken yapılar için kritik bir malzemedir.

Bu malzemeler, eski elektrikli araç bataryalarının geri dönüştürülmesiyle elde edilir ve yeni bataryaların üretiminde tekrar kullanılabilir [25]. Bu süreç, sürdürülebilir enerji döngüsü oluşturmak ve çevresel etkileri azaltmak açısından büyük önem taşır.

Tablo 2. Batarya hammaddelerin dünya pazarındaki fiyatları [26].

Hammaddeler	Ton Başına Fiyat (USD)
Lityum (Li)	9.100,00
Nikel (Ni)	15.140,00
Kobalt (Co)	20.560,00
Grafit (C)	1.000,00
Mangan (Mn)	3.900,00
Black Mass	4.700,00
Alüminyum (Al)	2.650,00
Bakır (Cu)	9.410,00

Genel Değerlendirme:

- Kobalt en pahalı hammadde olarak öne çıkmaktadır (20.560 USD/ton), bu da neden batarya üreticilerinin kobalt içeriğini azaltmaya çalıştığını açıklamaktadır.
- Nikel ve Bakır fiyatları oldukça yüksek (15.140 USD/ton ve 9.410 USD/ton), çünkü her ikisi de hem batarya üretiminde hem de diğer endüstrilerde kritik öneme sahiptir.
- Black Mass fiyatı da dikkat çekici (4.700 USD/ton), çünkü geri dönüşüm süreçleriyle işlenerek lityum, nikel ve kobalt gibi değerli metaller geri kazanılabilir.
- Grafit ve Alüminyum nispeten daha düşük maliyetli, ancak üretimde vazgeçilmez bileşenlerdir.
- Geri dönüşüm, özellikle lityum, nikel ve kobalt gibi pahalı metallerin geri kazanımı açısından büyük bir ekonomik avantaj sağlar.

Tablo 2, elektrikli araç bataryalarının geri dönüşümünün ekonomik olarak ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Kritik hammaddelerin fiyatlarının yüksek olması, batarya geri dönüşüm endüstrisinin sürdürülebilir bir enerji geleceği için kilit rol oynadığını kanıtlamaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrikli araç bataryalarının sürdürülebilir yönetimi, döngüsel ekonomi ilkelerine dayalı yeniden üretim ve ikinci ömür uygulamaları ile mümkün olabilir. Bu süreçlerin yaygınlaştırılması için döngüsel ekonomi uygulamalarını destekleyen yasal düzenlemeler ve teşvik mekanizmaları geliştirilmesi, bataryaların daha kolay yeniden üretim ve yeniden kullanımına olanak tanıyacak modüler tasarımlar geliştirilmesi ve tüketiciler ve sanayi için döngüsel ekonomi konusundaki farkındalık kampanyaları düzenlenmelidir. Batarya üreticileri, kullanıcılar, geri dönüşümcüler ve hükümetler arasında güçlü iş birlikleri oluşturulmalıdır. Sonuç olarak, elektrikli araç bataryalarının döngüsel ekonomi perspektifinde yönetimi hem çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacak hem de ekonomik fırsatlar yaratacaktır. Bu alandaki çalışmalar, sürdürülebilir bir gelecek için kritik bir öneme sahiptir.

EA bataryalarının sürdürülebilir yönetimi, döngüsel ekonomi yaklaşımının uygulanmasıyla büyük fırsatlar sunmaktadır. Yeniden üretim ve ikinci ömür uygulamaları, yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda ekonomik değer yaratır ve yenilikçi iş modelleri ortaya çıkarmaktadır. Bu alan, teknoloji, politika ve iş dünyası arasında güçlü bir işbirliği gerektirir. Gelecekte, daha modüler tasarımlar, standartlaştırılmış süreçler ve etkili teşvik mekanizmaları ile döngüsel ekonomi uygulamalarının daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

Bir EA bataryasının yaşam döngüsü önemli bir bilinmeyen olarak kalmaya devam ederken bu bilinmezlik tüketicilerin elektrikli araç satın alma konusundaki şüpheciliğine de katkıda bulunmaktadır. EA sektörünün karşılaştığı başlıca engellerden biri, batarya ömrüne ilişkin sınırlı şeffaflıktır. Bu sorunun ele alınması, anlamlı bir değişim için hem kurumsal girişimleri hem de hükümetler düzeyinde düzenlemelerini gerektirmektedir. Global Battery Alliance (GBA) bunu ele almak için şeffaflığı artırmaya yönelik yeni bir yaklaşım ortaya koymuştur. Geliştirdikleri “dijital batarya pasaportu” fiziksel bataryanın dijital bir ikizi olarak işlev görmek ve menşee, bileşim, malzeme akışı ve üretim geçmişi gibi hayati bilgileri bir QR kodunda yakalayıp saklamaktadır [27]. EA’ların yükselişi yadsınamaz, ancak içten yanmalı motorlardan (İYM) EA tam bir geçiş sağlamak önemli bir çaba gerektirmektedir. EA’lar ilgi

görmeye başlasa da henüz tam olarak otomotiv pazarına hâkim değildir. İYM araçlardan daha pahalı olmaya devam etmekte ve çevresel faydaları, elektrik şebekelerinin mevcut durumu nedeniyle bir miktar azalmaktadır.

Yerleşik İYM araç altyapısının temiz, verimli bir elektrikli araç ekosistemi ile değiştirilmesi, yerel toplumun bu değişime hazırlanması da dahil olmak üzere kapsamlı değişiklikler gerektirmektedir. EA endüstrisinin hızlı gelişimi, nispeten kısa bir süre içinde İYM araç sektörünün yerini almayı hedeflemektedir, ancak bu geçişin hızı, çevresel endişeler göz önüne alındığında, birçok kişinin istediğinden daha yavaştır. Birçok ülke bu geçişi taahhüt etmiş olsa da, EA bataryaları için döngüsel ekonomiye giden yol henüz başlangıç aşamasındadır. Çeşitli seviyelerde ilerleme kaydedilmektedir ve önemli çalışmalar devam etmekle birlikte, daha sürdürülebilir bir geleceğe doğru net ve hızlanan bir ivme olduğu görülmektedir. Bu çalışma, katı politikalar yerine gönüllü iş birliğinin, refah üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirirken EA bataryalarının geri dönüşümünü teşvik etmede daha etkili olduğunu vurgulamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Çalışma, araştırma ve yayın etiğine uygundur.

KAYNAKLAR

- [1] Shafique M, Ateeq M, Rafiq M, Azam A, Luo X. *Prospects of recycling from end-of-life of Li-ion batteries on alleviating materials demand-supply gap in new electric vehicles in Asia*. Waste Manage 2023;171:207–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.033>.
- [2] Moïse E, Rubínová S. Trade policies to promote the circular economy: *A case study of lithium-ion batteries*. Trade and environment working papers, no. 2023/01, OECD; 2023, <http://dx.doi.org/10.1787/d75a7f46-en>.
- [3] Manjong NB, Bach V, Usai L, Marinova S, Burheim OS, Finkbeiner M, Strømman AH. *A comparative assessment of value chain criticality of LithiumIon battery cells Sustain Mater Technol* 2023;36: e00614. <Http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00614>.
- [4] Gsell/Marscheider-Weidemann 2020 Gsell, M./Marscheider-Weidemann, F.: *Second Life von E-Batterien: Potenziale und Marktbarrieren*, 2020.

- [5] Kampker A, Heimes HH, Offermanns C, Frank M, Klohs D, Nguyen K. *Prediction of battery return volumes for 3R: Remanufacturing, reuse, and recycling*. *Energies* 2023;16(19):6873. <http://dx.doi.org/10.3390/en16196873>.
- [6] Islam MT, Iyer-Raniga U. *Lithium-Ion battery recycling in the circular economy: A Review*. *Recycling* 2022;7(3):33. <http://dx.doi.org/10.3390/recycling7030033>.
- [7] Antony Jose, S., Dworkin, L., Montano, S., Noack, W. C., Rusche, N., Williams, D., & Menezes, P. L. (2024). *Pathways to Circular Economy for Electric Vehicle Batteries. Recycling*, 9(5), 76. <https://doi.org/10.3390/recycling9050076>.
- [8] Herrmann, F.; Rothfuss, F. Introduction to Hybrid Electric Vehicles, *Battery Electric Vehicles, and off-Road Electric Vehicles*. In *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2015; pp. 3–16.
- [9] Can Güven, E., & Gedik, K. (2019). Ömrünü Tamamlamış Elektrikli Araç Bataryalarının Çevresel Yönetimi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(2), 726-737. <https://doi.org/10.21597/jist.446170>.
- [10] Hamurcu, M., Çakır, E., & Eren, T. (2021). Kullanıcı Perspektifli Çok Kriterli Karar Verme ile Elektrikli Araçlarda Batarya Seçimi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(2), 733-749. <https://doi.org/10.29137/umagd.906805>.
- [11] Lima MCC, Pontes LP, Vasconcelos ASM, de Araujo Silva Junior W, Wu K. Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles. *Energies*. 2022; 15(6):2203. <https://doi.org/10.3390/en15062203>.
- [12] https://www.mobilityhouse.com/int_en/knowledge-center/article/second-life-storage-projects [accessed on 15 April 2025].
- [13] TTGV, Öncül Proje Programı Batarya Geri Dönüşüm Ve İkincil Kullanım Teknolojileri Ön Araştırma Raporu, Mart 2025. [online] <https://ttgv.org.tr/yayinlar/batarya-geri-donusum-ve-ikincil-kullanim-teknolojileri-on-arastirma-raporu>.
- [14] “Electric Vehicles. Available” [online] <https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles> [accessed on 30 August 2024].
- [15] “Trends in the Electric Vehicle Industry”—Global EV Outlook 2024—Analysis Available [online]: [tps://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-the-electric-vehicle-industry](https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-the-electric-vehicle-industry) [accessed on 6 August 2024].
- [16] What Is the Circular Economy, and Why Does It Matter That It’s Shrinking” Available [online] <https://www.weforum.org/agenda/2022/06/what-is-the-circular-economy/>

- [17] Ibrahim, A.; Jiang, F. The Electric Vehicle Energy Management: *An Overview of the Energy System and Related Modeling and Simulation*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, 144, 111049.
- [18] Zhang, X.; Liang, Y.; Yu, E.; Rao, R.; Xie, J. *Review of Electric Vehicle Policies in China: Content Summary and Effect Analysis*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 70, 698–714.
- [19] Ralls, A.M.; Leong, K.; Clayton, J.; Fuelling, P.; Mercer, C.; Navarro, V.; Menezes, P.L. *The Role of Lithium-Ion Batteries in the Growing Trend of Electric Vehicles*. *Materials* 2023, 16, 6063.
- [20] Kıvrak, S., Özer, T., & Oğuz, Y. (2020). STM32f103C8 Mikroişlemcisi Kullanılarak Elektrikli Araçlar için Pasif Dengeleme Metodu Tabanlı Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı ve Uygulaması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 426-433. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.691456>.
- [21] “Electric Vehicles—Worldwide Statista Market Forecast. Available” [online] <https://www.statista.com/outlook/mmo/electric-vehicles/worldwide> [accessed on 10 August 2024].
- [22] Kastanaki E, Giannis A. *Dynamic estimation of end-of-life electric vehicle batteries in the EU-27 considering reuse, remanufacturing and recycling options*. *J Clean Prod* 2023; 393:136349. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136349](http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136349).
- [23] Saez-de-Ibarra, A., Martinez-Laserna, E., Koch-Ciobotaru, C., Rodriguez, P., Stroe, D.-I., Swierczynski, M., 2015. *Second-life battery energy storage system for residential demand response service*. In: 2015 IEEE Int. Conf. Ind. Technol, pp. 2941–2948. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125532>.
- [24] Mohammadzadeh, N.; Zegordi, S.H.; Kashan, A.H.; Nikbakhsh, E. *Optimal Government Policy-Making for the Electric Vehicle Adoption Using the Total Cost of Ownership under the Budget Constraint*. *Sustain. Prod. Consum.* 2022, 33, 477–507.
- [25] *Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC*.
- [26] Pereira, P.M.; Vieira, C.S. *A Literature Review on the Use of Recycled Construction and Demolition Materials in Unbound Pavement Applications*. *Sustainability* 2022, 14, 13918.
- [27] Marwan Hassini, Eduardo Redondo-Iglesias, Pascal Venet. *Battery Passports for Second-Life Batteries: An Experimental Assessment of Suitability for Mobile Applications*. *Batteries*, 2024, 10 (5), pp.153. [10.3390/batteries10050153](https://doi.org/10.3390/batteries10050153). hal-04564165.