



Derleme / Review

Kritik Hammaddelerin Geri Dönüşüm ile Döngüsel Ekonomiye Kazandırılması

Gaining of Critical Raw Materials to Circular Economy by Recycling

Ata Akcil^{a,*}, Ceren Erüst Ünal^{b,**}, M. Demet Okudan Altındaş^{c,***}^a Süleyman Demirel Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Isparta, TÜRKİYE^b Munzur Üniversitesi, Nadir Toprak Elementleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Tunceli, TÜRKİYE^c Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Sağlık Bilimleri Fakültesi İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

Geliş-Received: 12 August - Ağustos 2021 * Kabul - Accepted: 22 Şubat - February 2022

ÖZ

Endüstri 4.0 devrimi ve Nesnelerin İnterneti gibi teknolojilerle dijitalleşme, kaynaklarımızın ve ekonomilerimizin döngüsel olmasını gerektirmektedir. En başta Avrupa Birliği olmak üzere tüm ülkeler, kritik hammaddelerin sorumlu tüketiminin, üretiminin ve geri dönüşümünün sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmanın bir yolu olarak çok önemli olduğu konusunda hemfikirlerdir. Ömrünü tamamlamış ürünlerden kritik hammaddelerin geri kazanılması için uygun maliyetli bir geri dönüşüm yöntemi, madencilikten çok daha az çevresel etkiye sahiptir. Biyohidrometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler, kritik hammaddelerin, özellikle nadir toprak elementlerinin çıkarılması için hızlı gelişen, seçici, çevre dostu ve uygun maliyetli teknolojilerdir. Bu makale, ikincil kaynaklara genel bir bakış sağlamakta ve kritik hammaddelerin kazanımı için ekonomik bir yol olarak hizmet edebilecek bazı umut verici yöntemlerin kullanımına ilişkin yürütülen çalışmaların senaryosunu özetlemektedir.

Ahahtar Kelime: *Biyohidrometalurji, Döngüsel ekonomi, Geri dönüşüm, Hidrometalurji, Kritik hammadde*

A B S T R A C T

Digitalization with technologies such as the Industry 4.0 revolution and the Internet of Things requires our resources and economies to be circular. All countries, especially the European Union agree that responsible consumption, production and recycling of critical raw materials are essential as a means of achieving sustainable development goals. A cost-effective recycling method for the recovery of critical raw materials from end-of-life products has far less environmental impact than mining. Biohydrometallurgical and hydrometallurgical methods are fast developing, selective, eco-friendly, and cost-effective technologies for the extraction of critical raw materials especially rare earth elements. This article provides an overview of secondary resources and summarizes the scenario of studies regarding the use of some promising methods that can serve as an economical way to recover critical raw materials.

Keywords: *Biohydrometallurgy, Circular economy, Recycling, Hydrometallurgy, Critical raw material*

Giriş

Son on yılda, hammadde arzı ve aksaklıkların potansiyel olumsuz etkileri konusundaki artan endişelere yanıt olarak "kritik hammadde" kavramı ortaya çıkmıştır (Avrupa Komisyonu, 2010). Bir hammadde, üreten ülkelerin siyasi ve ekonomik durumları, arz yoğunluğu, tedarik daralmaları, ikame potansiyeli, geri dönüşüm oranı ve bunların ekonomi üzerindeki etkileri dikkatle değerlendirildikten sonra "kritik" olarak etiketlenmektedir (Massari ve Ruberti, 2013). Her üç yılda bir Avrupa Komisyonu tarafından yayınlanan

listeye yeni hammaddeler eklenmekte veya kritik durumda olmayan hammaddeler bu listeden çıkartılmaktadır.

2020 yılında Avrupa Komisyonu, bölgesel endüstrilerin ortaya çıkan birçok önemli teknoloji için kritik olan ve olası siyasi gerginlikler nedeniyle önemini vurgulayan 30 hammaddenin bir listesini yayınlamıştır (Avrupa Komisyonu, 2020a). 2017 ve 2020 kritik hammadde listesi karşılaştırıldığında; 2017 yılında kritik hammadde olarak görülmeyen Boksit, Lityum ve Titanyum'un listeye eklendiği ve tam tersi 2017'de kritik hammadde olarak görülen Helyum'un ise

* Sorumlu yazar / Corresponding author: ataakcil@sdu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-9991-0543>** cerenerust@gmail.com • <https://orcid.org/0000-0002-9459-3374>*** medihademet.okudan@sbu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-6014-903X>

2020 kritik hammadde listesinden çıkarıldığı görülmektedir. Ayrıca stronsiyum 2020 kritik hammadde listesinde yer alan tek yeni aday hammaddedir.

Çizelge 1. Kritik öneme sahip hammaddelerin listesi (Avrupa Komisyonu, 2020)

| 2017 ve 2020 Kritik Hammaddeler | | | |
|---------------------------------|-------------------------|---------------|------------|
| Antimon | Fosfor | Magnezyum | HNTE |
| Barit | Galyum | Niyobyum | PGM |
| Berilyum | Germanyum | Silikon metal | Helyum |
| Bizmut | Hafniyum | Skandiyum | Boksit |
| Borat | İndiyum | Tantalyum | Lityum |
| Doğal grafit | Kobalt | Tungsten | Titanyum |
| Doğal kauçuk | Koklaşabilir taş kömürü | Vanadyum | Stronsiyum |
| Fosfat kayaları | Kalsiyum florit | ANTE | |

- 2017 ve 2020 kritik hammaddeleri
- ◆ 2017’de kritik hammadde olup 2020’de listeden çıkarılanlar
- 2017’de kritik hammadde olmayıp 2020 listesine eklenenler
- 2017’de değerlendirilmeyip 2020’de değerlendirilen kritik hammaddeler

“Kritiklik Seviyesi” 2 ana başlık altında toplanmıştır:

1-) Ekonomik Önem (EÖ): Avrupa Birliği’ndeki son tüketim uygulamalarında kullanılan belirli bir hammaddenin önemine ve bu uygulamalarda yerine kullanılacak hammaddelerin önemine dayanır.

2-) Arz Riski (AR): Belirli bir hammaddenin tedarik edilememe riskini ölçen faktörlere dayanarak hesaplanır. Bu faktörlerden bazıları; küresel arz, kaynak sağlayan ülkeler, ülkeler arası ticaret kısıtlamaları ve anlaşmaları, ikame hammaddelerin varlığı, arzı sağlayan ülkelerin yönetim durumu gibi faktörlerdir.

Kritik hammaddeler, grafiğin kritiklik bölgesi (Arz Riski ≥ 1 ve Ekonomik Önem ≥ 2.8) içinde bulunmaktadır (Şekil 1). Bu kri-

tik hammaddeler listesinde, Çizelge 1’de verilen 27 hammadde ve 3 element grubu yer almaktadır (Avrupa Komisyonu, 2020a). Üç element grubu; Platin Grup Metalleri (PGM) (iridyum, paladyum, platin, rodyum, rutenyum), Ağır Nadir Toprak Elementleri (ANTE) (disporsiyum, erbiyum, evropiyum, gadolinyum, holmiyum, lutesyum, terbiyum, tulyum, iterbiyum, itriyum) ve Hafif Nadir Toprak Elementlerini (HNTE) (lantanyum, seryum, praseodim, neodimyum, samaryum) içermektedir.

Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülke kritik hammadde talebini karşılayamadığından, metal ve metal konsantrelerin ithalatına bağımlılıkları nedeni ile bölgesel kritik hammadde listelerini oluşturmuştur. AB’ye benzer şekilde Amerika Birleşik Devletleri (ABD) de, ulusal güvenliği ve ekonomisi için 35 hammaddenin kritik öneme sahip olduğunu tespit etmiş ve bunların içinde 31 hammaddenin ithalatında %50’den fazlasına bağımlı durumdadır (US-DOE, 2019). AB, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Avustralya kritik hammadde raporlarında sunulan ortak kritik hammaddelerin 2019 yılı verileri ile piyasa değerleri ve küresel üreticilerinin bir listesi Çizelge 2’de gösterilmektedir.

Endüstri 4.0 hedefleri ve nesnelerin interneti (IoT) teknolojilerinin benimsenmesiyle ileri teknoloji ürünlerinin ve mühendislik sistemlerinin üretiminde kullanılan bu kritik hammaddelerin kazanım oranlarını en üst düzeye çıkarmak için uluslararası atık yönetim çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Awasthi vd., 2018). Etkili toplama sistemleri, kritik hammaddelerin geri dönüşümü/kazanımı için bir ön koşuldur ve bu amaçla kullanılan altyapının yerel koşullara uygun olması gerekir. Atık miktarını azaltma, tamirat, yeniden kullanım ve geri dönüşümün daha belirgin hale gelmesiyle malzeme akışlarını ele alan ve döngüsel ekonomiye (DE) doğru ilerleyen çok yönlü bir yol izlenmelidir (Scott ve Barrett, 2015). Birincil kaynakların arama, madencilik ve işlenmesinden sonra elde edilen kritik hammaddelerin döngüsel ekonomi akış şeması Şekil 2’de gösterilmektedir. Döngüsel ekonomi, ürünlerin, malzemelerin ve kaynakların kullanım ömrünün mümkün olduğu kadar uzun sürdüğü, kaynak kullanımını ve geri dönüşüm yolu ile kaynak kaybını en aza indiren bir ekonomidir (Avrupa Komisyonu, 2017). Geri dönüşüm / kazanım ile hammadde kazanımı işlevsel hale getirilerek sürdürülebilir kaynak kullanımını hedeflenmektedir.

Çizelge 2. Piyasa değeri ve küresel üreticiler ile ortak kritik hammaddelerin listesi (Panda ve Akcil, 2021)

| Hammaddeler | Küresel Pazar Değeri (milyon \$) | En büyük üreticiler* |
|-------------|----------------------------------|--|
| Antimon | 153 | Çin (%63) |
| Galyum | 5.275 | Çin (%97) |
| Germanyum | 2.855 | Çin (%65) |
| İndiyum | 5.275 | Çin (%39) |
| Lityum | 1.978 | Avustralya (%61) |
| Kobalt | 1.576 | KDC ¹ (%71) |
| Niyobyum | 15.905 | Brezilya (%88) |
| NTE | 4.338 | Çin (%72) |
| PGM | 51.234 | GA ² (%57) |
| Skandiyum | 4.338 | - |
| Tantalyum | 6.029 | KDC ¹ (%41) |
| Titanyum | 4.485 | Çin (%40-Metal, %27 İlmenit) Avustralya (%29- Rutil) |
| Tungsten | 571 | Çin (%82) |
| Vanadyum | 5.099 | Çin (%54) |

*coğrafi potansiyeli gösterir.

¹Kongo Demokratik Cumhuriyeti, ²Güney Afrika

güvenli enerji arzı, sürdürülebilir tarım, sürdürülebilir akıllı ulaşım, iklim değişikliği ile mücadele, diplomasi, Avrupa Yeşil Mutabakatı bilgilendirme ve bilinçlendirme faaliyetleri) 32 hedef ve belirlenen hedeflere ulaşılması amacıyla 81 aşama yer almaktadır. Eylem Planının “Yeşil ve Döngüsel Bir Ekonomi” başlığı altında gerçekleştirilecek adımlar ile Avrupa Komisyonu Ekonomi Eylem Planına adaptasyonunun sağlanması ve AB’deki değişikliklerin ülkemiz üzerindeki olası etkilerine karşı hazırlıklı olunması hedeflenmektedir. Bu nedenle, ulusal döngüsel ekonomi eylem planının hazırlanması oldukça önemlidir. Bu doğrultuda geri kazanılmış ikincil ürün ve malzeme kullanımı için teknik kriterlerin belirlenmesi gerekmektedir (Yeşil Mutabakat Eylem Planı, 2021). Yeşil Mutabakat Eylem Planı 2021 doğrultusunda ülkemizin yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği çalışmalarının, Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında getirilen değişikliklere paralel olarak değerlendirilmesi ve ihtiyaç olması halinde geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu derleme; Avrupa ve dünya çapında yayınlanmış kritik hammadde ve döngüsel ekonomi raporlarını ve 30’dan fazla araştırma makalesini içermektedir. Teknik ve ekonomik fizibiliteye bağlı olarak, kritik metallerin ömrünü tamamlamış ürünlerden geri dönüş-

türülmesine odaklanan en son eğilimler yansıtılmış ve hidro&bi-yohidro-metalurjik çalışmalar özetlenmiştir. Stratejik sektörlerde kullanılan ve kritik hammadde sınıfında yer alan NTE’lerin geri kazanımı ve yönetim stratejileri hakkında da bazı çevre dostu yenilikçi çalışmalar yer almaktadır ve bu tür yaklaşımlar günümüzde oldukça fazla ilgi görmektedir.

1. Kritik hammaddeler nerede kullanılır?

Hammaddeler AB ekonomisinin tüm sektörleri için kilit unsurlardır. Özellikle kritik hammadde olarak değerlendirilenler (Avrupa Komisyonu, 2020a), yenilenebilir enerji, elektrikli araç teknolojisi (e-mobilite), savunma sanayi, havacılık ve dijital teknolojiler gibi stratejik sektörlerin geliştirilmesi için temel ön koşullardır (Buchert vd., 2012). Ayrıca çeşitli endüstriyel ekosistemlerin işleyişi ve bütünlüğü için gereklidir (Çizelge 3). Kritik hammaddeler kategorisinde yer alan tungsten, telefonlarda titreşim özelliğini sağlamaktadır. Galyum ve indiyum ise LED teknolojisinin bir parçasıdır. Yarı iletkenler silikon metale, hidrojen yakıt hücreleri ve elektrolizörler ise PGM’lere ihtiyaç duyarlar (Avrupa Komisyonu, 2020c).

Çizelge 3. Endüstriyel Ekosistemler için Kritik Hammaddelerin Uygunluğu (Avrupa Komisyonu, 2020c)

| | Havacılık Savunma | Elektronik | Mobilite Otomotiv | Enerji yoğun endüstriler | Yenilenebilir enerji | Sağlık | Dijital | İnşaat |
|----------------------------|----------------------|------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------|--------|---------|--------|
| Antimon | ✓ | | ✓ | | | | | ✓ |
| Barit | | | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ |
| Boksit | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Berilyum | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | |
| Bizmut | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Borat | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Kobalt | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | |
| Koklaşabilir taş kömürü | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | |
| Kalsiyum florit | | | | ✓ | | | | |
| Galyum | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Germanyum | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | | |
| Hafniyum | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | |
| İndiyum | ✓ | ✓ | | | ✓ | | ✓ | |
| Lityum | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| Magnezyum | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ |
| Doğal grafit | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Doğal kauçuk | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | |
| Niyobyum | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ |
| Fosfat kayaları | | | | ✓ | | | | |
| Fosfor | ✓ | | | ✓ | | | | |
| Skandiyum | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | |
| Silikon metal | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| Stronsiyum | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | | ✓ |
| Tantalyum | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | |
| Titanyum | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ |
| Tungsten | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | |
| Vanadyum | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| PGM | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| ANTE | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| HNTE | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |

Mevcut bilgilere dayanarak yayınlanan Avrupa Komisyonu öngörülerinde belirtilen stratejik teknolojiler ve sektörler, 2030 ve 2050 yılı için kritik hammadde görünümünü sağlayarak son verilere dayalı kritiklik değerlendirmesini tamamlamaktadır (Avrupa Komisyonu, 2020d). AB'nin (COVID-19 salgını öncesi) 2050 yılı için iklim nötrlüğü senaryolarını tahmini hammadde talebine çevirmekte ve tedarik zincirlerinin farklı seviyelerindeki tedarik risklerini ele almaktadır (Avrupa Komisyonu, 2020a). Buna göre; tüm AB ekonomisine mevcut arz ile kıyaslandığında elektrikli araç pilleri ve enerji depolama için, AB'nin 2030'da 18 kat daha fazla lityum ve 5 kat daha fazla kobalt ve 2050'de neredeyse 60 kat daha fazla lityum ve 15 kat daha fazla kobalt ihtiyacı olacaktır. Talepteki bu artışın arz sorunlarına yol açacağı açıkça görülmektedir.

Kalıcı mıknatıslarda kullanılan NTE'lere olan talep (örn. elektrikli araçlar) dijital teknolojiler veya rüzgar jeneratörleri için 2050 yılına kadar on kat artabilir (Avrupa Komisyonu, 2020c). NTE'ler, güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, elektrikli araçlar ve enerji verimli aydınlatmada ikamesi olmayan hammaddeler olup iklim değişikliğiyle mücadele ve çevresel kaygıların giderilmesi için de oldukça önemlidir. Örneğin, ülkelerin iklim ve enerji hedeflerini karşılaması için gerekli olan ve Avrupa Yeşil Mutabakatı ile belirtilen düşük karbonlu teknolojilerin üretiminde NTE'lere olan talebin 2030 yılına kadar 20 kat artması beklenmektedir (EIT Raw-Materials, 2020b;c).

Piller, elektrikli araçlar için bir güç kaynağı olmanın yanında güneş ve rüzgar gibi çeşitli kaynaklardan üretilen enerjiyi de depolar. Kobalt, lityum, grafit ve nikel, pil üretiminde kullanılan stratejik hammaddelerdir. Dispersiyum, neodimyum ve praseodim ise elektrikli araçlar ve rüzgar jeneratörleri için motor yapımında hayati önem taşıyan nadir toprak elementleridir. Lityum-iyon piller savunma uygulamaları için çok önemli olmakla birlikte, bunların


gelişimi ve gelecekteki kullanımı, öncelikle taşınabilir elektronik cihazlara, sabit enerji depolamaya ve elektrikli araçlara yönelik sivil talepten kaynaklanmaktadır (Bobba vd., 2020).

Orta ve uzun vadede yakıt hücreleri, hidrojen yakıt tedariki ile potansiyel bir temiz enerji çözümü sunacaktır. Yakıt hücreleri, sürdürülebilir ve güvenli enerji tedarik sistemlerine önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Yakıt hücrelerinde, oksidasyon redüksiyon reaksiyonları ile yakıttan güce dönüşüm için yüksek katalitik aktivite ve seçiciliği nedeni ile yaygın olarak platin veya platin grubu metallerden yapılan katalizörler kullanılmaktadır. Mevcut araştırmalar, katalizörlerde bu kritik metalleri azaltmaya veya ortadan kaldırmaya ve artan aktivite ve dayanıklılık üzerine odaklanmaktadır (Leader, Gaustad ve Babbitt, 2019).

Robotik; endüstri, tarım, tıp, ulaşım, sosyal hizmetler, askeriye, uzay araştırmaları ve denizaltı operasyonlarının birçok uygulama alanı için muazzam potansiyele sahip gelişmekte olan bir teknolojidir. Robotikte kullanılan 44 hammaddeden 19'u AB ekonomisi için kritik olarak etiketlenmektedir. Çin, robotik uygulamalarda kullanılan kritik hammaddelerin %40'ından fazlasını sağlaması sebebiyle en büyük kritik hammadde tedarikçisi konumundadır ve onu Güney Afrika (%10) ve Rusya (%9) izlemektedir (Bobba vd., 2020).

Dron olarak da bilinen "İnsansız Hava Araçları" (İHA), 1970'lerden itibaren başlayan sivil uygulamaları ile 2015 yılına kadar tarım, bilim, lojistik ve ticaret gibi çeşitli alanlarda gerçekleştirilen bir milyondan üzerinde ünite satışı sayesinde pazara hakim konumda olmuştur. Bununla birlikte, değer açısından pazar çoğunluğuna hala askeri uygulamalar hakim olup bunu ticari ve hobi uygulamaları izlemektedir (Statista, 2019). Çizelge 4'te stratejik sektörlerde kullanılan teknolojiler ve bu teknolojilerin içerdiği kritik hammaddeler belirtilmiştir.

Çizelge 4. Stratejik sektörlerde kullanılan teknolojiler ve kritik hammaddeler (Bobba vd., 2020)

| Teknolojiler | | Kritik Hammaddeler |
|---|--|---|
|  Lityum-iyon Pil Teknolojisi | Hem e-mobilite hem de aralıklı elektrik üretimi sağlayan enerji depolama sistemlerinde hızla yayılmaktadır. Savunma sanayi için giderek daha önemli hale gelmektedir. | C, Si, Ti, Co, Li, Nb |
|  Yakıt Hücreleri | Yakıt olarak hidrojen ile, henüz çok yaygın olmamasına rağmen, gelecekte enerji sistemlerinin dekarbonizasyonu ve e-mobilite için yüksek potansiyel sunacak olan önemli bir enerji dönüştürme teknolojisidir. | Co, Pd, Pt, C, Sr, Ti |
|  Rüzgar Enerjisi | İklim değişikliği için en uygun maliyetli yenilenebilir enerji teknolojilerinden birisi olup büyüyen bir sektör olmaya devam etmektedir. | Nb, B, Dy, Nd, Pr |
|  Elektrikli Çekiş Motorları | Elektrikli araçlarda temel bileşenlerdendir. NTE içeren kalıcı mıknatıslı motorlar, günümüzde ve gelecekteki e-mobilite uygulamaları için özellikle etkili ve caziptirler. | B, Dy, Nd, Pr, Si |
|  Fotovoltaik Teknolojiler | Rüzgar enerjisi ile elektrik sektörünün küresel dönüşümüne öncülük etmektedir. | B, Ge, Si, Ga, In, Mo |
|  Robotik | Enerji teknolojileri ve otomotiv uygulamalarında olduğu gibi savunma sanayi ve havacılık endüstrisinde de üretim aşamalarında rolü giderek artan, gelişmekte olan bir teknolojidir. | Be, Ga, In, Nb, Ti, B, Dy, Nd, Pr |
|  Dronlar | İHA, hem sivil hem de çeşitli savunma uygulamaları için giderek daha fazla kullanılmaktadır. | Be, Ga, Ge, In, Hf, Mg, Nb, Sc, Ti |
|  3D Baskı | Geleneksel tedarik zincirlerini hızla yeniden şekillendirecek ve özellikle savunma sanayi ve havacılıkta geleneksel imalatın yerini alacak, tüketilen hammadde ve işlenmiş malzeme miktarında ve türünde önemli bir değişikliğe yol açacaktır. | Ti, Mg, Co, Hf, Nb, Sc, Si, W, V |
|  Dijital Teknolojiler | Kritik hammaddelerin çoğu, bilgi ve iletişim teknolojisi (BIT) cihazları ve gelişmiş elektronik cihazlar için özellikle gereklidir. | B, Co, Ga, Ge, Si, Li, C, In, Mg, W, NTE, PGM |

Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve diğer ülkeler, gelecekteki tedarikleri güvence altına almak, kaynak açısından zengin ülkelerle ortaklıklar yoluyla tedarik kaynaklarını çeşitlendirmek ve kendi iç hammadde bazlı değer zincirlerini geliştirmek için hızlı bir şekilde çalışmalarını sürdürmektedirler (Avrupa Komisyonu, 2020c). Rademaker vd. (2013), özellikle AB'nin Çin'e bağımlılığı bulunan NTE'lerin kritiklik seviyelerini azaltmak için bu hammaddelerin geri dönüşümüne odaklanmıştır. 2030 yılına kadar rüzgar türbinleri, elektrikli araçlar ve sabit disk sürücülerinde kullanılan kalıcı mıknatısların içerdiği neodimyum ve dispersiyuma küresel talebin artacağını ve uzun vadede NTE geri dönüşümünün toplam talebin önemli bir bölümünü karşılayacağını ön görmektedir.

2. Kritik hammaddelerin döngüsel ekonomiye kazandırılması

Son yıllarda Avrupa Birliği'nde birincil üretimin kısıtlılığı, yüksek ithalat bağımlılık oranı, düşük ikame, düşük geri dönüşüm oranına sahip olan ve Endüstri 4.0 devriminin anahtarı olarak anılan kritik hammaddelerin geri dönüşümü daha da önemli hale gelmektedir (Løvik vd., 2018). Gelişmelere ek olarak, mevcut COVID-19 salgını küresel makroekonomik ölçekte derin etkilere neden olmuştur. Dünyanın neredeyse yarısı kilit altındayken, COVID-19 salgınına etkili bir yanıt için gerekli olan bazı kritik hammaddelerin arzının sürmesi endişe kaynağı haline gelmiştir (Akci vd., 2020; UNECE, 2020). Kritiklik sorununa en büyük çözüm, ürün/bileşenlerin yeniden kullanımı ve verimli olarak geri dönüşüm yoluyla birden çok ürünün yaşam döngüsü boyunca ekonomi içinde tutulduğu döngüsel ekonominin benimsenmesidir (Krystofik vd., 2018). Böylece kritik hammaddelerin ekonomik üretkenliği en üst düzeye çıkarılmış ve küresel talep azaltılmış olur.

Şu anda metallerin kazanımı için uygulanan mevcut yöntemler pirometalurjik, hidrometalurjik ve biyohidrometalurjik yöntemlerdir. Pirometalurjik yöntemler, genellikle materyallerin homojen olmaması, yüksek geri dönüşüm maliyetleri ve daha düşük ticari değere sahip saf olmayan geri dönüştürülmüş ürünler gibi farklı nedenlerden dolayı tercih edilmemektedir. Geri dönüşüm ürünlerinin birincil kaynak olan madencilik sektörüyle rekabet etmesi beklenmektedir (Jha vd., 2016). Hidrometalurjik yöntemler, liç yönteminin ardından çöktürme, sıvı-sıvı ekstraksiyon, adsorpsiyon ve iyon değişimi gibi çözümlü saflaştırma tekniklerine dayanmaktadır (Tan vd., 2016; Venkatesan vd., 2018; Yurramendi vd., 2019). Yüksek maliyeti ve asidik koşullar kullanımını zorlaştırırsa da metal-organik çözücü tabanlı yöntemler de çevre dostu olarak görülmekte ve bu konu üzerinde araştırma faaliyetleri gerçekleştirilmektedir (Cheisson vd., 2019; Sun vd., 2018). Son zamanlarda öne çıkan biyohidrometalurjik yaklaşımlar daha az maliyet gerektirmesi, büyük ölçekli uygulamalar için teknik fizibilite sağlaması ve toksik veya tehlikeli yan ürünler oluşturmaması sebebiyle kritik metallerin kazanılması için umut verici olmaktadır (Sethurajan ve Gaydardzhiev, 2021).

Uygun kazanım yöntemi ikincil kaynağın türü ve kritik hammadde içeriğine göre belirlenmektedir. İkincil kaynaklardan kritik hammaddelerin kazanımı için son yıllarda gerçekleştirilen hidrometalurjik ve biyohidrometalurjik çalışmalar Çizelge 6'da sunulmuştur. Işık yayan diyot (LED) endüstrisinde açığa çıkan Galyum nitrid (GaN) atığı yüksek ekonomik potansiyele sahip galyum içeriği nedeniyle oldukça önemlidir. Chen vd. (2018), GaN atığını farklı asitlerin etkisi, konsantrasyon, basınç, sıvı-katı oranı, sıcaklık ve zaman gibi farklı deneysel parametreler ile değerlendirmiş ve yaklaşık %98,5 verim ile galyum kazanmayı başarmışlardır. Kullanım ömrü dolmuş araçların içerdiği kritik metallerin kazanımı için bu araçların çeşitli parçaları üzerine birçok araş-

tırma faaliyetinde bulunulmuş ve çeşitli hidrometalurjik ve biyohidrometalurjik yöntemler test edilmiştir (Chan vd., 2020; Ilyas vd., 2020; Muddana ve Baral, 2019). Hammaddelerin geri kazanılması için EoL-fotovoltaik panellerin (PVs) geri dönüştürülmesine odaklanılmış araştırma faaliyetleri de zamanla artmaktadır (Chung vd., 2021; Savvilitidou ve Gidarakos, 2020).

Arz riski ve ekonomik önem açısından düşük-orta arz riski altında olduğu kabul edilen lityumun üretimi için birincil kaynaklar son yıllarda hızla tükenmektedir (Munir vd., 2020). Kullanılmış Lityum iyon bataryalar (LİB)'da bulunan Li miktarı, birincil Li kaynaklarından (spodümen cevheri) neredeyse 10 kat daha fazladır (Zhao vd., 2019). 100 kg katotlu bir lityum iyon araba aküsü 6-12 kg Co ve 36-48 kg Ni içermektedir. 2050 yılına kadar, yılda 50 milyon ile 80 milyon elektrikli araç üretmek için 500.000-800.000 ton kobalt ihtiyacı doğacaktır. Bu rakamlar 2030'un ötesinde, mevcut madencilik kapasitelerini çoktan aşacaktır (Turcheniuk vd., 2018). LİB'ler, arz riski ve ekonomik önemi daha yüksek olan Co ve bunun yanında Cu, Mn ve Ni gibi metaller için alternatif kaynak olarak görülmektedir. Kullanılmış LİB'lerin uygun yöntemler ile geri dönüşümü daha da acil hale gelmektedir (Sethurajan ve Gaydardzhiev, 2021). Bu nedenle çeşitli şirketler (Accurec (Krefeld, Almanya), Toxco Inc. (Anaheim, Amerika Birleşik Devletleri/ Kanada), Umicore (Brüksel, Belçika), Sony (Tokyo, Japonya), vb. tarafından birçok hidrometalurjik proses geliştirilmiştir (Çizelge 5).

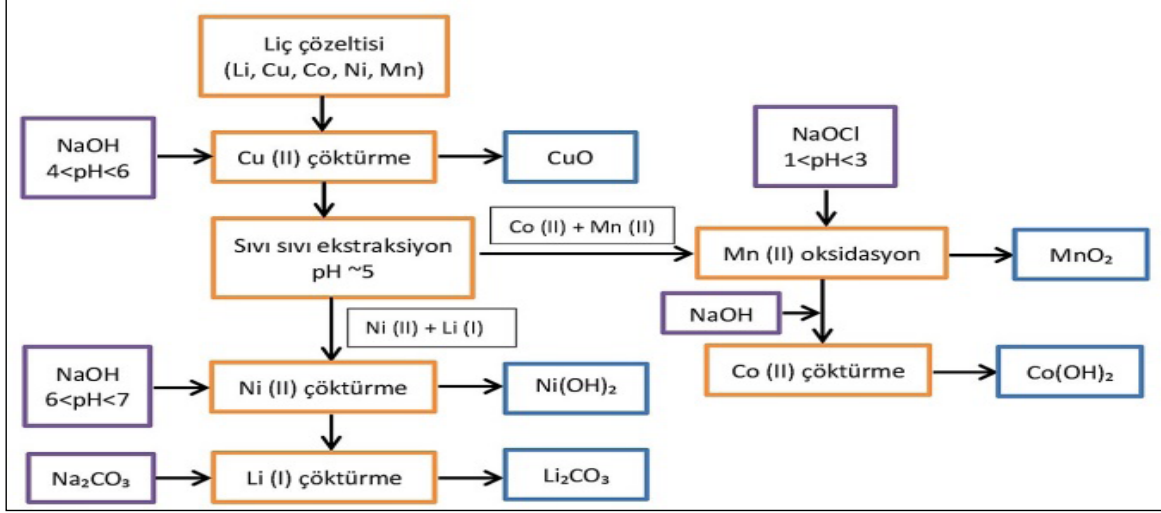
Çizelge 5. LİB geri dönüşümünde kullanılan endüstriyel uygulamaların özeti (Lv vd., 2018)

| Şirket | Proses | Kazanılan metaller | Kapasite (ton/yıl) |
|---|---------------------------------|--|--------------------|
| Umicore (Belçika) | Pirometalurji | CoCl ₂ | 7000 |
| | Hidrometalurji | Li ₂ CO ₃ Ni(OH) ₂ | |
| Glencore (Kanada+ Norveç) | Pirometalurji | Alaşım (Ni/Co/Cu) | 7000 |
| | Hidrometalurji | | |
| Accurec GmbH (Almanya) | Hidrometalurji | Co alaşım Li ₂ CO ₃ | 6000 |
| Retriev Teknolojileri (Amerika Birleşik Devletleri) | Hidrometalurji | Co tuzu Li ₂ CO ₃ | 4500 |
| Sumitomo-Sony (Japonya) | Pirometalurji Hidrometalurji | Alaşım (Ni/Co/Cu) CoO | 150 |

LİB'lere deşarj, sökmeye, kırma ve eleme gibi bir dizi ön işlem ve liç ve/veya biyoliç yönteminin ardından uygulanacak çöktürme yöntemi, yüklü çözümlerin içerdiği safsızlıklar nedeni ile Li ve Co ekstraksiyonu için sınırlı ve zaman alıcıdır (Provazi vd., 2011). Son çalışmalar, aşamalı çöktürme ve solvent ekstraksiyonuna dayalı tekniklerin sürekli modda çalışmaya olanak sağlaması, az reaktif tüketimi ve reaktif rejenerasyonu gibi sebepler dolayısıyla daha verimli olduğunu göstermektedir (Othman vd., 2020; Wellens vd., 2012). Djoudi vd. (2021), lityum, kobalt, nikel, mangan ve bakır LİB'lerin yüklü liç çözeltisinden kazanmak için hidrometalurjik bir süreç tasarlamışlardır (Şekil 4).

Çizelge 6. Kritik hammaddelerin ikincil kaynaklardan geri kazanımı üzerine son yıllarda gerçekleştirilen hidrometalurjik ve biyohidrometalurjik çalışmalar

| Atık Kaynağı | Yöntem | Optimum koşullar | Verim (%) | Referans |
|--|--|---|---|---------------------------------|
| Galyum Nitrür (GaN) atığı (LED endüstrisi) | Basıncılı HCl liçi | 0,25 mol/L HCl, 30 mL/g s/k oranı, 200°C (15 atm) sıcaklık, 180 dk liç süresi | Ga 98,46 | Chen vd., 2018 |
| NdFeB mıknatıslar (Rüzgar türbinleri) | 1-Demagnetizasyon 2-HCl liçi 3-Okzalit ile çöktürme 4-Kavurma | 1-850°C 2-0,5 M HCl, 95°C liç sıcaklığı, 100 g/L k/s oranı, 500 dev/dk karıştırma hızı, 300 dk liç süresi 3-1 M okzalit asit, pH 2'de 4-800°C kavurma sıcaklığı, 120 dk kavurma süresi | NTE 99 | Kumari vd., 2018 |
| NdFeB mıknatıslar nik sıvısı ile karşı akımlı solvent ekstraksiyonu | 1-Sentetik HCl liç çözeltisi | 1- 9,00 g/dm ³ Nd ₂ O ₃ , 0,50 g/dm ³ Tb ₂ O ₃ ve 2,55 g/dm ³ Dy ₂ O ₃ içeren sentetik liç çözeltisi | Nd(III) 99,7 | Pavón vd., 2018 |
| | 2- Primene 81R-Cyanex 572 iyo- | 2- 0,30 M P81R-Cy572, organik/sıvı faz oranı (O/S)=1/4, ardından 10 dakika çalkalama (2 aşamalı) | Tb(III) 99,99 | |
| | 3-Organik faz sıyırma | 3-1,2 M HCl ile sıyırma | Dy(III) 99 | |
| NdFeB mıknatıslar | 1-Demagnetizasyon 2-Öğütme 3-Organik asit liçi 4-Solvent ekstraksiyon | 1- 400 °C,1,5 saat 2- < 355 µm tane boyutu 3-1 M Glikolik asit, 70°C sıcaklık, 1/80 k/s oranı 4- 1 M D2EHPA, 1:1 organik/sıvı faz, 25°C | NTE 95 | Gergoric vd., 2019 |
| Akışkan katalitik kırma katalizörü | Fungal liç (<i>Aspergillus niger</i>) | 30°C sıcaklık, 6,4 pH, %1 katı yoğunluğu, 21 gün biyoliç süresi | Ti 76 V 52 | Muddana ve Baral, 2019 |
| Dizel oksidasyon katalizörleri | HCl +H ₂ O ₂ liçi | 8 mol/L HCl, %3 H ₂ O ₂ , %8 k/s oranı, 55°C sıcaklık, 180 dk liç süresi | Pd 94 Pt 90 | Ilyas vd., 2020 |
| Cu-In-Se (CIS) paneller | H ₂ SO ₄ liçi | 1 M H ₂ SO ₄ , 0,01 k/s oranı, 90°C sıcaklık, 500 dev/dk karıştırma hızı, 1 saat liç süresi | In 96,1 | Savvilotidou ve Gidarakos, 2020 |
| Lityum-iyon bataryalar (Elektrikli araçlar) | H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂ | 1,5 M H ₂ SO ₄ , %1 H ₂ O ₂ , 20 g/L k/s oranı, 50°C sıcaklık, 60 dk liç süresi | Li 100 Co 98,4 Ni 98,6 Mn 98,6 | Chan vd., 2020 |
| Lityum-iyon bataryalar (Dizüstü bilgisayarlar) | Orta derecede termofilik bakteri liçi (<i>Acidithiobacillus caldus</i> , <i>Leptospirillum ferriphilum</i> , <i>Sulfobacillus spp.</i> ve <i>Ferroplasma spp.</i>) | 45°C sıcaklık, 130 dev/dk karıştırma hızı, 24,25 g/l FeSO ₄ .7H ₂ O, 2 gün biyoliç süresi | Co 99,9 | Ghassa vd., 2020 |
| | | | Li 84 | |
| Lityum-iyon bataryaların LiCoO ₂ katot aktif malzemesi | Asidofilik bakteri liçi (<i>Leptospirillum ferriphilum</i> ve <i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>) | %5 k/s oranı, 1,25 pH, 42°C sıcaklık, 180 dev/dk karıştırma hızı, 0,3 g/L GSH (glutatyon) ilavesi, 1,5 gün biyoliç süresi | Li 98 Co 96 | Liu vd., 2020 |
| Lityum-iyon bataryalar | 1-Sentetik HCl liç çözeltisi | 1-4.0 M HCl çözeltisi içinde 1 g/L Co, 1,14 g/L Mn, 1,40 g/L Ni ve 0,39 g/L Li | Co >99 | Othman vd., 2020 |
| | 2- [P8888][Oleate] iyonik sıvısı ile solvent ekstraksiyon | 2- 8 M HCl'de (pH = -0,9), O/S=1, 22°C, 5 dk, 40 dev/dk karıştırma hızında solvent ekstraksiyon | Mn 89 | |
| c-Si fotovoltaik paneller | I ₂ -KI ve HNO ₃ liçi | 1:10 k/s oranı, 0,35 M I ₂ konsantrasyonu, 0,7 M I ⁻ konsantrasyonu ve 10 dk liç süresi | Ag 95 | Chung vd., 2021 |
| Lityum-iyon bataryalar | 1-Sentetik H ₂ SO ₄ liç çözeltisi | 1-2.0 mol/L H ₂ SO ₄ çözeltisi içinde 2590 mg/L Co, 2610 mg/L Ni, 1400 mg/L Mn, 800 mg/L Li | Co 92,0 | Nguyen ve Lee, 2021 |
| | 2- ALi-SCN iyonik sıvısı ile solvent ekstraksiyon | 2-0,3 mol/L ALi-SCN, O/S=1 solvent ekstraksiyon ve %5 NH ₃ ile Co sıyırma | Ni 99,9 | |
| | 3-Alamin 336, Cyanex 301 ve Ali-CY iyonik sıvıları ile solvent ekstraksiyon | 3-0,5 mol/L Alamin 336+Cyanex 301, pH 2'de SX ve %75 kral suyu ile Ni sıyırma-1 mol/L Ali-CY, pH 2'de SX ve 1 mol/L HCl ile Mn sıyırma | Mn 99,9 Li 99,9 | |
| Lityum-iyon bataryalar | 1-H ₂ SO ₄ liçi 2-NaOH ile kademeli çöktürme | 2- 1-2 M NaOH ile pH 4-6'da Cu, pH 6-7'de Ni, pH 8'de Co, pH 10'da Mn ve Na ₂ CO ₃ ile Li ₂ CO ₃ , | Co 100 | Djoudi vd., 2021 |



Şekil 4. LİB'lerden metallerin kazanımı için tasarlanmış hidrometalurjik süreç (Djoudi vd., 2021)

NdFeB mıknatıslar, ağırlıkça yaklaşık %30-35 oranında NTE içermektedir (Schulze ve Buchert 2016). Esas olarak Nd, Pr gibi HNTe'nin yanı sıra az miktarda Dy, Tb ve Gd gibi ANTE de içermektedir (Kumari vd., 2018). Rüzgar türbinlerinin jeneratörlerinde bulunan NdFeB mıknatısların ağırlığının 1000-2000 kg'a kadar çıktığı düşünüldüğünde rüzgar türbinlerinden kazanılan bu kritik hammaddeler toplam NTE arzında önemli bir rol oynayacaktır (Yang vd., 2017). Bu kapsamda, Kumari vd., (2018), kullanılmış rüzgar türbini mıknatıslarından NTE'leri (Nd, Pr ve Dy) geri kazanmak için bir piro-hidrometalurjik yöntem geliştirmiştir. Rüzgar türbinlerinin NdFeB mıknatısları için 850°C'de demagnetizasyon işleminin ardından 0,5 M HCl ile 95°C liç sıcaklığı, 100 g/L katı/sıvı (k/s) oranı, 500 dev/dk karıştırma hızı ve 300 dk liç süresinde NTE'lerinin neredeyse tamamı çözülmüştür. Okzalit ile çöktürme ve kavurma işlemlerinin ardından %99 saflıkta karışık nadir toprak oksitleri (NTO) elde edilmiştir. Itakura vd. (2006), 3 M HCl ve 0,2 N oksalik asit içeren sulu bir çözelti içinde 110°C'de 6 saat boyunca optimum koşullar altında ticari olarak temin edilebilen Ni kaplı NdFeB sinterlenmiş mıknatıslardan hidrotermal yöntem ile NTE'lerinin kazanımını sağlamışlardır. Başka bir çalışma, neodimyum ve dispersiyumun %80'den fazlasının seçici olarak kazanımının, kavrulmuş NdFeB mıknatıslardan 180°C'de bir otoklavda 0,02 mol/L HCl çözeltisi ile mümkün olduğunu göstermiştir (Koyama vd., 2009). Gergoric vd. (2019), benzer olarak asit liçinin ardından solvent ekstraksiyon yöntemi kullanarak %95'in üzerinde NTE kazanmışlardır.

Sürdürülebilirlik ve ekolojik açıdan, genellikle NTE ve Fe arasında yüksek seçiciliğe sahip olan iyonik sıvılar ile solvent ekstraksiyon yöntemi de atık asidin geri dönüştürülebilirliğini ve metallerin verimli bir şekilde ekstraksiyonunu sağlamaktadır (Kitagawa ve Uemura, 2017; Padhan ve Sarangi, 2017). İyonik sıvılar, sıvı sıvı ekstraksiyon işlemlerinde organik fazın yerini alabilir ve uçucu olmamaları nedeniyle daha güvenli sistemler ortaya çıkarabilirler (Wellens vd., 2012). Esasen bu işlem, NTE'lerin kendilerini iki karışmaz sıvı metal fazı arasında dağıttığı bir sıvı alaşım sistemi tarafından NTE alaşımının seçici olarak çözülmesinden oluşur (Binne-mans vd., 2013). Triheksil(tetradecil)fosfonyum klorür (Cyphos® IL101), üç değerlikli nadir toprak iyonlarının ekstraksiyonu ve HCl çözeltilerinden Fe³⁺ iyonlarının ekstraksiyonu için iyi karakterize edilmiş bir iyonik sıvıdır (Vander Hoogerstraete vd., 2013). Nd'nin klorürlü liç çözeltisinden ekstraksiyonu için Cyanex 302, PC88A, Cyanex 272, NaCyanex 302, NaPC88A ve NaCyanex 272 arasında karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirilmiş ve Cyanex 272'nin diğer solventlere göre daha yüksek ekstraksiyon hızına sahip oldu-

ğu fakat pH değişikliklerine oldukça duyarlı olduğu belirlenmiştir (Padhan vd., 2017). Pavón vd. (2018), sentezlenen Primene 81R-Cyanex 572 iyonik sıvıların, pH değerine duyarlılık eksikliklerinin üstesinden gelebildiğini bildirmişlerdir. 0,30 mol/L Primene 81R-Cyanex 572 iyonik sıvı ile iki aşamalı ters akım ekstraksiyon işleminde pH ayarlaması olmadan Nd/Tb/Dy içeren sentetik liç çözeltisinden %99,7 Nd ekstrakte etmeyi başarmışlardır. Kubota vd. (2012), iyonik sıvı 1-oktil-3-metilimidazolyum bis(triflorometansülfonil)imid içinde çözülmüş N,N-diocetildiglikolamik asitten (DODGAA) oluşan iyonik sıvı bazlı destekli bir sıvı membran sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemde nadir toprak iyonları, demir (III) iyonlarına karşı yüksek geçirgenlik göstermiştir.

İyonik sıvı ekstraksiyonunun hala belirsiz mekanizmalar olması ve çoğu iyonik sıvı türünün yüksek fiyata sahip olması, yaygın kullanımına engeldir. Fakat kimyasal tüketimini azaltan, seçiciliği yüksek iyonik sıvıların kullanıldığı ve geri dönüştürüldüğü kapalı döngü sistemleri de yeni araştırma konuları arasında yerini almaktadır (Kitagawa ve Uemura, 2017). Araştırma faaliyetlerinin genişletilmesi ile NTE geri dönüşümü, sıfır atık çözümlerinin elde edilmesi (yani, NTE'lerin geri kazanılması ve atıkların değerlendirilmesi) açısından önemlidir. Tüm bu örnekler ile önerilen geri dönüşüm akış çizelgelerinin ticarileştirilmesine ilişkin bilinçli kararların alınması, her zamanki gibi bir iş senaryosuna göre genel bir çevresel faydayı destekleyen sağlam Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) çalışmaları yapıldıktan sonra mümkün olacaktır.

3. Sonuçlar

Yüksek ekonomik değere ve arz riskine sahip kritik hammaddeleri barındıran atıkların geri dönüşümünü sağlamak ve bu kritik hammaddelerin sürdürülebilir tedarikini güvence altına almak, tüm ülkeler için zorunlu bir hedeftir. Atık NdFeB mıknatıslar, LİB'ler, PV'ler gibi ikincil kaynaklar, çevreye ve topluma fayda sağlayan geri dönüşüm teknikleri ile kritik metallerin talebini karşılamak için büyük bir potansiyele sahiptir. Teknoloji için kritik metallerin arzı halihazırda bir endişe konusu iken, COVID-19 salgını uluslararası tedarik zincirlerini bozarak daha fazla endişeye neden olmuştur.

Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Birleşmiş Milletler Paris Anlaşması gibi ulusal ve uluslararası önlemler ile iklim değişikliğinin önüne geçilmesi ve gelecek nesiller için yeterli kaynakların bırakılması hedeflenmektedir. Dijital ve temiz teknolojilerde kullanılan kritik

hammadelerin çoğu, özellikle NTE'ler, tedarik zincirleri ve döngüsel ekonomi için bir yol haritası oluşturarak, bu hedeflere ulaşılması yolunda atılan adımlardır. Bu bağlamda, kritik hammadde üretimi için ikincil kaynakların işlenmesini amaçlayan yeni geri dönüşüm teknolojileri, çevresel sorunları hafifletmenin yanı sıra değerli maden kaynaklarının korunmasına da olanak sağlayacaktır. Geri dönüşüm için geliştirilen hidrometalurjik ve biyohidrometalurjik süreçler, hammaddelerden katma değer sağlama olanaklarını ortaya koymaktadır. Hidrometalurjik yöntemlere entegre edilen yeni, ekonomik ve çevreye duyarlı biyohidrometalurjik yolların uygulanması umut verici bir seçenek olsa da bu çalışmalar pilot ölçekte testler, proses dizayn ve tekno-ekonomik analiz gerektirmektedir. Bu amaçla, küresel olarak HydroWEEE EUPF7, RE-E4EU H2020, EIT RawMaterials projeleri gibi endüstriyel süreç ve teknoloji geliştirme projelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüzde, kritik hammaddelerin kazanımı sürdürülebilir değildir. Kritik hammaddelerin atıklardan etkin ve sürdürülebilir bir şekilde kazanımı için çeşitli yeni teknolojilerin yakın zamandaki gelişimi, bilim dünyasında çok fazla dikkat çekmekte ve araştırma faaliyetleri hızla genişletilmektedir. Özellikle kapalı döngü geri dönüşüm sistemlerinin potansiyelini araştıran senaryolar arttıkça, endüstrideki kritik hammaddelerin döngüsellik potansiyelleri değerlendirilmekte ve uygun eko-tasarım yolları oluşturulmaktadır. Bu teknolojiler doğru kullanılırsa, yalnızca tedarik riskini azaltarak ülkelerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik arasında denge kurmaya da yardımcı olabilirler.

Kaynaklar

- Akcil, A., Sun, Z., Panda, S., 2020. COVID-19 disruptions to tech-metals supply are a wake-up call. *Nature*, 587, 365-367. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-03190-8>.
- Awasthi, A. K., Li, J., Koh, L., Ogunseitan, O. A., 2019. Circular economy and electronic waste. *Nature Electronics*, 2, 86-89. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0225-2>.
- Avrupa Komisyonu, 2010. Critical Raw Materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials. Erişim tarihi: 30.04. 2020. <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/5662/attachments/1/translations>.
- Avrupa Komisyonu, 2017. The role of waste-to-energy in the circular economy. Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. Erişim tarihi: 25.04.2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0034&from=EN>.
- Avrupa Komisyonu, 2020a. Study on the EU's list of Critical Raw Materials. Erişim tarihi: 25.04.2021. https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en.
- Avrupa Komisyonu, 2020b. Circular Economy Action Plan The European Green Deal. Erişim tarihi: 25.06.2021. https://ec.europa.eu/environment/pdf/circular-economy/new_circular_economy_action_plan.pdf.
- Avrupa Komisyonu, 2020c. Communication 'Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability', COM (2020) 474 final, 2020. Erişim tarihi: 28.06.2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>.
- Avrupa Komisyonu, 2020d. Critical Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU—A Foresight Study; European Commission: Brussels, Belgium. Erişim tarihi: 22.12.2021. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881>.
- Binnemans, K., Jones, P.T., Blanpain, B., Gerven, T.V., Yang, Y., Walton, A., Buchert, M., 2013. Recycling of rare earths: A critical review. *J. Clean. Prod.*, 51, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>.
- Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F., Pavel, C., 2020. Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU-A Foresight Study. ISBN 978-92-76-15336-8. doi: 10.2873/58081
- Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D., Pingel, D., 2012. Recycling Critical Raw Materials from Waste Electronic Equipment. *Freiburg: Öko-Institut*, 49(0), 30-40.
- Chan, K. H., Malik, M., Anawati, J., Azimi, G., 2020. Recycling of end-of-life lithium-ion battery of electric vehicles. Symposium on Rare Metal Technology, 2020 held at the 149th Annual Meeting and Exhibition, TMS 2020; San Diego; United States, 238549, 23-32. DOI: 10.1007/978-3-030-36758-9_3.
- Charles, R. G., Douglas, P., Dowling, M., Liversage, G., Davies, M. L., 2020. Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE—evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104923.
- Cheisson, T., Cole, B. E., Manor, B. C., Carroll, P. J., Schelter, E. J., 2019. Phosphoryl-ligand adducts of rare earth-TriNOx complexes: systematic studies and implications for separations chemistry. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 7, 4993-5001.
- Chen, W. S., Hsu, L. L., Wang, L. P., 2018. Recycling the GaN waste from LED industry by pressurized leaching method. *Metals*, 8, 861.
- Chung, J., Seo, B., Lee, J., Kim, J. Y., 2021. Comparative analysis of I2-KI and HNO3 leaching in a life cycle perspective: Towards sustainable recycling of end-of-life c-Si PV panel. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 123989.
- Deloitte Sustainability, 2017. Study on the review of the list of Critical Raw Materials — Criticality Assessment, Report prepared for the European Commission, doi:10.2873/876644.
- Djoudi, N., Le Page Mostefa, M., Muhr, H., 2021. Hydrometallurgical process to recover cobalt from spent li-ion batteries. *Resources*, 10(6), 58. <https://doi.org/10.3390/resources10060058>.
- EIT RawMaterials, 2020a. Erişim tarihi: 25.06.2021. [https://eitrawmaterials.eu/?attachment_id=6207#lightbox\[postimages\]/0](https://eitrawmaterials.eu/?attachment_id=6207#lightbox[postimages]/0)
- EIT RawMaterials, 2020b. EIT RawMaterials supports the world after COVID-19 in securing a sustainable supply of raw materials and advanced materials – for Europe's green future and competitiveness. Erişim tarihi: 20.05.2020. <https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2020/04/EIT-RawMaterials-Position-Paper-on-COVID-19.pdf>.
- EIT RawMaterials, 2020c. EIT RawMaterials supports the European Green Deal with a focus on raw materials and advanced materials to secure Europe's industrial leadership and sustainable future. Erişim tarihi: 20.05.2020. https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2020/01/2020-01-28_EIT-RawMaterials-Position-Paper-Green-Deal.pdf.
- Gergoric, M., Barrier, A., Retegan, T., 2019. Recovery of Rare-Earth Elements from Neodymium Magnet Waste Using Glycolic, Maleic, and Ascorbic Acids Followed by Solvent Extraction. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 5(1), 85-96.
- Ghassa, S., Farzanegan, A., Gharabaghi, M., Abdollahi, H., 2020. Novel bio-leaching of waste lithium ion batteries by mixed moderate thermophilic microorganisms, using iron scrap as energy source and reducing agent. *Hydrometallurgy*, 197, 105465.
- Ilyas, S., Srivastava, R. R., Kim, H., Cheema, H. A., 2020. Hydrometallurgical recycling of palladium and platinum from exhausted diesel oxidation catalysts. *Separation and Purification Technology*, 248, 117029.
- Itakura, T., Sasai, R., Itoh, H., 2006. Resource recovery from NdFeB sintered magnet by hydrothermal treatment. *J. Alloys Compd.*, 408, 1382-1385.
- Jha, M. K., Kumari, A., Panda, R., Kumar, Rajesh, J., Yoo, K., Lee, J. Y., 2016. Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals. *Hydrometallurgy*, 165, 2-26.
- Kitagawa, J., Uemura, R., 2017. Rare Earth Extraction from NdFeB Magnet Using a Closed-Loop Acid Process. *Scientific Reports*, 7(1), 8039.

- Koyama, K., Kitajima, A., Tanaka, M., 2009. Selective leaching of rare-earth elements from an Nd-Fe-B magnet. *Kidorui*, 54, 36-37.
- Krystofik, M., Bustamante, M., Badami, K., 2018. Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 24-33.
- Kubota, F., Baba, Y., Goto, M., 2012. Application of Ionic Liquids for the Separation of Rare Earth Metals. *Solv. Extr. Res. Dev. Jpn.*, 19, 17-28.
- Kumari, A., Sinha, M. K., Pramanik, S., Sahu, S. K., 2018. Recovery of rare earths from spent NdFeB magnets of wind turbine: Leaching and kinetic aspects. *Waste Management*, 75, 486-498.
- Leader, A., Gaustad, G., Babbitt, C., 2019. The Effect of Critical Material Prices on the Competitiveness of Clean Energy Technologies. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 8(2), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s40243-019-0146-z>.
- Liu, X., Liu, H., Wu, W., Zhang, X., Gu, T., Zhu, M., Tan, W., 2020. Oxidative stress induced by metal ions in bioleaching of LiCoO₂ by an acidophilic microbial consortium. *Frontiers in Microbiology*, 10, 3058. Doi:10.3389/fmicb.2019.03058.
- Løvik, A. N., Hagelūken, C., Wāger, P., 2018. Improving supply security of critical metals: Current developments and research in the EU. *Sustainable Materials and Technologies*, 15, 9-18.
- Lv, W., Wang, Z., Cao, H., Sun, Y., Zhang, Y., Sun, Z., 2018. A Critical Review and Analysis on the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 6, 1504-1521.
- Massari, S., Ruberti, M., 2013. Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy*, 38, 36-43.
- Muddana, M. H., Baral, S.S., 2019. A comparative study of the extraction of metals from the spent fluid catalytic cracking catalyst using chemical leaching and bioleaching by *Aspergillus Niger*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 7(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103335>.
- Munir, H., Srivastava, R. R., Kim, H., Ilyas, S., Khosa, M. K., Yameen, B., 2020. Leaching of exhausted LNCM cathode batteries in ascorbic acid lixiviant: a green recycling approach, reaction kinetics and process mechanism. *J. Chem. Tech. Biotech.*, 95, 2286-2294.
- Nguyen, V.N.H., Lee, M.S., 2021. Separation of Co(II), Ni(II), Mn(II) and Li(I) from synthetic sulfuric acid leaching solution of spent lithium ion batteries by solvent extraction. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 96(5), 1205-1217.
- Othman, E.A., van der Ham, A.G.J., Miedema, H., Kersten, S.R.A., 2020. Recovery of metals from spent lithium-ion batteries using ionic liquid [P8888][Oleate]. *Separation and Purification Technology*, 252, 117435. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117435>.
- Padhan, E., Nayak, A.K., Sarangi, K., 2017. Recovery of neodymium and dysprosium from NdFeB magnet swarf. *Hydrometallurgy*, 174, 210-215. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.10.015>.
- Padhan, E., Sarangi, K., 2017. Recovery of Nd and Pr from NdFeB magnet leachates with bi-functional ionic liquids based on Aliquat 336 and Cyanex 272. *Hydrometallurgy*, 167, 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.11.008>.
- Panda, S., Akcil, A., 2021. Securing supplies of technology critical metals: Resource recycling and waste management. *Waste Manag.*, 123, 48-51.
- Pavón, S., Fortuny, A., Coll, M.T., Sastre, A.M., 2018. Neodymium recovery from NdFeB magnet wastes using Primene 81R-Cyanex 572 IL by solvent extraction. *Journal of Environmental Management*, 222, 359-367.
- Provazi, K., Campos, B.A., Espinosa, D.C.R., Tenório, J.A.S., 2011. Metal separation from mixed types of batteries using selective precipitation and liquid-liquid extraction techniques. *Waste Manage.*, 31, 59-64.
- Rademaker, J. H., Kleijn, R., Yang, Y., 2013. Recycling as a Strategy against Rare Earth Element Criticality: A Systemic Evaluation of the Potential Yield of NdFeB Magnet Recycling. *Environ. Sci. Technol.*, 47, 10129-10136.
- Resmi Gazete, 2021. Yeşil Mutabakat Eylem Planı. Erişim tarihi: 23.07.2021. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/07/20210716-8.pdf>.
- Savvilotidou, V., Gidarakos, E., 2020. Pre-concentration and recovery of silver and indium from crystalline silicon and copper indium selenide photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 250, 119440.
- Schulze, R., Buchert, M., 2016. Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material. *Resources, Conservation and Recycling* 113, 12-27.
- Scott, K., Barrett, J., 2015. An integration of net imported emissions into climate change targets. *Environ. Sci. Policy*, 52, 150-215.
- Sethurajan, M., Gaydardzhiev, S., 2021. Bioprocessing of spent lithium ion batteries for critical metals recovery - A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 165, 105225.
- Sun, D. T., Gasilova, N., Yang, S., Oveisi, E., Queen, W. L., 2018. Rapid, selective extraction of trace amounts of gold from complex water mixtures with a metal-organic framework (MOF)/polymer composite. *J. Am. Chem. Soc.*, 140, 16697-16703.
- Tan, Q., Deng, C., Li, J., 2016. Innovative application of mechanical activation for rare earth elements recovering: process optimization and mechanism exploration. *Sci. Rep.*, 6, 1-10.
- US-DOE, 2019. Testimony of Assistant Secretary Daniel Simmons for Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy Before the U.S. Senate Committee on Energy & Natural Resources, Erişim tarihi: 25.06.2021. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/11/f68/11-6-19-Daniel-Simmons-FT-SENRF.pdf>.
- Turcheniuk, K., Bondarev, D., Singhal, V., Yushin, G., 2018. Ten years left to redesign lithium-ion batteries. *Nature*, 559 (7715), 467-470.
- UNECE, 2020. Securing critical raw materials supply is key to the response to COVID-19. Erişim tarihi: 27.05.2020. <https://www.unece.org/info/media/presscurrent-press-h/sustainable-energy/2020/securing-critical-raw-materials-supply-is-key-to-the-response-to-covid-19/doc.html>.
- Vander Hoogerstraete, T., Wellens, S., Verachtert, K., Binnemans, K., 2013. Removal of transition metals from rare earths by solvent extraction with an undiluted phosphonium ionic liquid: separations relevant to rare-earth magnet recycling. *Green Chem.*, 15, 919-927.
- Venkatesan, P., Vander Hoogerstraete, T., Binnemans, K., Sun, Z., Sietsma, J., Yang, Y., 2018. Selective Extraction of Rare-Earth Elements from Nd-FeB Magnets by a Room-temperature Electrolysis Pretreatment Step. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 6, 9375-9382.
- Wellens, S., Thijs, B., Binnemans, K., 2012. An environmentally friendlier approach to hydrometallurgy: highly selective separation of cobalt from nickel by solvent extraction with undiluted phosphonium ionic liquids. *Green Chem.*, 14 (2012), 1657-1665.
- Yang, Y., Walton, A., Sheridan, R., Güth, K., Gauß, R., Gutfleisch, O., Buchert, M., Steenari, B.-M., Van Gerven, T., Jones, P. T., Binnemans, K., 2017. REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(1), 122-149.
- Yeşil Mutabakat Eylem Planı 2021. Erişim tarihi: 03.08.2021. <https://ticaret.gov.tr/data/60f1200013b876eb28421b23/MUTABAKAT%20YE%20C5%9E%20C4%B0L.pdf>.
- Yurramendi, L., Gijsemans, L., Forte, F., Aldana, J. L., del Río, C., Binnemans, K., 2019. Enhancing rare-earth recovery from lamp phosphor waste. *Hydrometallurgy*, 187, 38-44.
- Zhao, J., Qu, X., Qu, J., Zhang, B., Ning, Z., Xie, H., Zhou, X., Song, Q., Xing, P., Yin, H., 2019. Extraction of Co and Li₂CO₃ from cathode materials of spent lithium-ion batteries through a combined acid-leaching and electro-deoxidation approach. *J. Hazard. Mater.* 379, 120817.