



Kritik Mineraller Çağının Yeni Güç Parametresi: Nadir Toprak Elementleri

21.yüzyılın ekonomik, teknolojik ve jeopolitik dönüşümü; enerji, veri, savunma ve yüksek teknoloji ekseninde yeniden şekillenirken, bu dönüşümün merkezinde yer alan en kritik hammaddelerden biri hiç kuşkusuz nadir toprak elementleridir (NTE). Elektrikli araçlardan rüzgâr türbinlerine, yapay zekâ altyapılarından savunma sanayiine, uzay teknolojilerinden ileri elektronik sistemlere kadar çağımızın stratejik sektörleri, büyük ölçüde bu elementlerin sağladığı benzersiz manyetik, optik ve katalitik özelliklere dayanmaktadır. Bugün artık nadir toprak elementleri yalnızca bir madencilik konusu değil; enerji güvenliği, sanayi politikası, teknolojik egemenlik ve ulusal güvenlik meselesi olarak ele alınmaktadır.

Bu dosyada, nadir toprak elementlerini yalnızca teknik yönleriyle değil; ekonomik, jeopolitik, çevresel ve stratejik boyutlarıyla ele alan kapsamlı bir perspektif sunulmaya çalışılmıştır. Alanında uzman akademisyenler ve araştırmacıların yazılılarıyla, NTE'lerin kimyasal yapısından küresel tedarik zincirlerine, devlet stratejilerinden geri dönüşüm teknolojilerine kadar uzanan çok katmanlı bir değerlendirmenin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Doç. Dr. M. Şeref Sönmez'in çalışmasında vurguladığı gibi, "yaygın isimlendirmenin aksine, nadir toprak elementleri yer kabuğunda nadir bulunan maddeler değildir." Asıl mesele, bu elementlerin ekonomik olarak ayrıştırılması, saflaştırılması ve yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülmesidir. Bu nedenle küresel güç dengesi artık yalnızca rezerv büyüklükleriyle değil, işleme kapasitesi ve teknoloji üstünlüğüyle tanımlanmaktadır. Çin'in bugün sinterlenmiş NdFeB mıknatıs üretiminin yaklaşık %94'ünü kontrol ediyor olması, bu dönüşümün en somut göstergelerinden biridir.

Prof. Dr. Fırat Burat'ın ifade ettiği üzere, "gerçek güç, yer altındaki potansiyelden ziyade değer zincirinin orta ve üst basamaklarında yer alabilmekten" geçmektedir. Bu yaklaşım, günümüz tekno-politik rekabetinin özünü oluşturmaktadır. NTE'ler artık yalnızca çıkarılan hammaddeler değil; işlenen, rafine edilen, mıknatısa dönüştürülen ve ileri teknoloji sistemlerine entegre edilen stratejik araçlardır.

Bu nedenle ABD, Avrupa Birliği, Japonya, Avustralya ve Kanada gibi ülkeler; yalnızca yeni maden sahaları geliştirmeye değil, aynı zamanda rafinasyon, geri dönüşüm ve ileri malzeme üretim kapasitesini artırmaya yönelik büyük ölçekli politikalar yürürlüğe koymaktadır.

Bu dosyada dikkat çekmek istediğimiz yönlerinden biri de nadir toprak elementleri meselesini yalnızca ekonomik büyüme perspektifinden değil, sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluk ekseninde de değerlendirmesi olmuştur. Doç. Dr. Ahmet Turan ve arkadaşlarının vurguladığı üzere, “üretilen her ton nadir toprak oksit için yaklaşık 2.000 ton toksik atık ortaya çıkmaktadır.” Bu durum, birincil madenciliğin çevresel maliyetlerini açık biçimde ortaya koyarken; geri dönüşüm ve “kent madenciliği” yaklaşımlarının neden stratejik önem kazandığını da göstermektedir. Aynı çalışmada belirtildiği gibi, geri dönüşüm yoluyla yapılan üretim, enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını %64 ila %96 oranında azaltabilmektedir. Dolayısıyla geleceğin NTE politikaları yalnızca yeni rezerv keşifleriyle değil; döngüsel ekonomi, geri kazanım teknolojileri ve sürdürülebilir üretim modelleriyle şekillenecektir.

Doç. Dr. Burak Birol’un değerlendirmesi ise ülkelerin NTE stratejilerinin artık doğrudan ekonomik güvenlik politikalarının bir parçası haline geldiğini göstermektedir. Çin’in ihracat kontrolleri, ABD’nin kritik mineral hamleleri, Avrupa Birliği’nin Kritik Hammaddeler Tüzüğü (CRMA), Japonya’nın arz çeşitlendirme politikaları ve Avustralya’nın “egemen işleme kapasitesi” hedefi; küresel sistemde yeni bir “mineral diplomasisi” çağının başladığını göstermektedir.

Türkiye açısından bakıldığında ise Eskişehir-Beylikova başta olmak üzere sahip olunan rezerv potansiyeli, önemli bir stratejik fırsat sunmaktadır. Ancak tüm yazarlarca ortak biçimde vurgulanan temel gerçek şudur: rezerv sahibi olmak tek başına yeterli değildir. Türkiye’nin gerçek avantajı; Ar-Ge, kimyasal ayrıştırma teknolojileri, solvent ekstraksiyon kapasitesi, ileri metalurji, mıknaş üretimi ve yüksek katma değerli

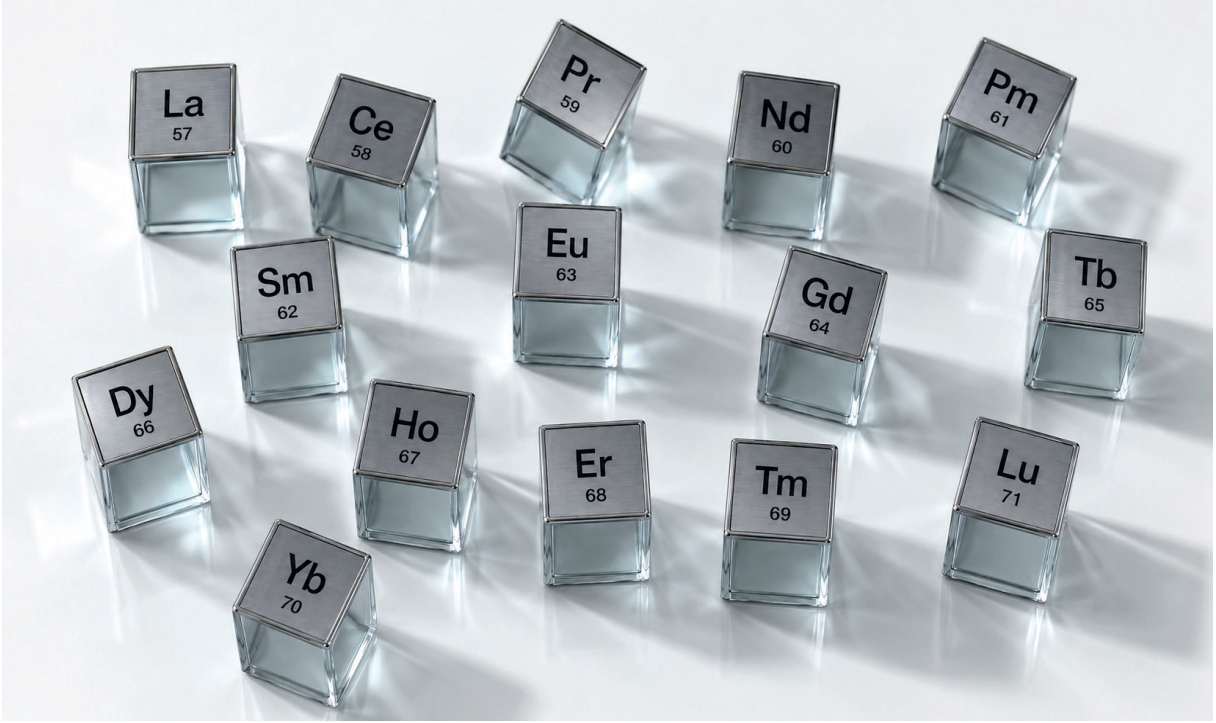
sanayi entegrasyonu alanlarında göstereceği gelişimle ortaya çıkacaktır. Bu bağlamda TENMAK NATEN, Eti Maden ve üniversite-sanayi iş birliklerinin önümüzdeki dönemde belirleyici rol üstlenmesi beklenmektedir.

Önümüzdeki yıllarda enerji dönüşümünün hızlanmasıyla birlikte nadir toprak elementlerine yönelik küresel talebin katlanarak artacağı öngörülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı’nın projeksiyonlarına göre temiz enerji teknolojilerinde kullanılan kritik minerallere olan talep, önümüzdeki yirmi yılda birçok element için onlarca kat büyüyecektir. Bu gelişme, NTE’leri yalnızca ekonomik bir kaynak değil; aynı zamanda jeopolitik rekabetin, teknolojik bağımsızlığın ve sürdürülebilir kalkınmanın temel belirleyicilerinden biri haline getirmektedir.

Özetle, dünya teknoloji yarışının görünmeyen yapı taşları olarak da nitelenen nadir toprak elementleri, önümüzdeki dönemde yalnızca sanayi politikalarını değil; küresel güç ilişkilerini de belirleyen temel parametrelerden biri olmaya devam edecek gibi görünmektedir.

Bu dosya, Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası tarafından Ocak 2026’da düzenlenen Nadir Toprak Elementleri (NTE) Sempozyumu’nda sunulan ve sonrasında yayımlanan NTE Özel Sayısında yer alan bazı bildirimlerden yapılan seçilmiş alıntılar ile Prof. Dr. Fırat Burat’ın konuya ilişkin çalışmasından derlenerek hazırlanmıştır. Yayın hacmindeki sınırlılıklar nedeniyle bildirimlerde yer alan ayrıntılı kaynakça ve referans listelerine bu özel sayıda yer verilememiştir. İlgili akademik kaynaklar ve atıflar, bildirimlerin özgün tam metinlerinde bulunmaktadır.

Birlik Yayın Kurulu



NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ: KAVRAM, KAPSAM VE ÖNEMİ

Doç. Dr. M. Şeref Sönmez*

Giriş

Nadir toprak elementleri, skandiyum ve itriyumla birlikte lantanit grubundan oluşan 17 adet elementi içermektedir. Lantanitler atom numarası 57 ile 71 arasındaki elementlerdir ve prometyum dışındakiler doğada bulunmaktadır.

Kavram ve Kapsam

Nadir toprak elementleri, kimyasal benzerlikleri nedeniyle doğadaki minerallerde daima bir arada bulunur ve adeta tek bir kimyasal yapı gibi hareket ederler. Bu karakteristik özellikleri sebebiyle keşif süreçleri oldukça uzun sürmüştür; 1788'den 1941'e kadar yaklaşık 160 yıllık bir döneme yayılmıştır. Keşiflerin ardından gelen en büyük teknolojik zorluk ise bu elementlerin bilimsel araştırmalar veya endüstriyel üretim için birbirlerinden saf halde ayrılması olmuştur. Ayrıştırma girişimleri 1839-1841 yıllarında Mosander'in çalışmalarıyla başlamış, 1891-1940 yılları arasında ise bu çabalar yoğunlaşmıştır. Bu dönemde, karışık bileşiklerden çeşitli nadir toprak alaşımları üretilmiş; tam olarak ayrıştırılamamış veya kaba yöntemlerle ayrılmış elementler için ilk ticari uygulamalar hayata geçirilmiştir. Bu yirmi yıllık süreç, etkin yöntem geliştirme açısından en verimli dönem olarak kabul edilir. Bu evrede, özellikleri detaylıca incelenebilecek miktarda saf nadir toprak bileşiği elde edilmesini sağlayan modern ayrıştırma yöntemleri geliştirilmiştir. Ayrıca, saf metallerin ve alaşımların üretimi için kritik olan indirgeme (redüksiyon) süreçleri üzerine önemli araştırmalar yapılmıştır. 1960'lardan itibaren yüksek saflıktaki nadir toprakların seri üretiminde büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu durum, elementlerin yeni özelliklerinin keşfedilmesine ve günümüzdeki pek çok stratejik ticari uygulamada yaygın olarak kullanılmasına olanak tanımıştır.

Bir elementin doğadaki mevcudiyeti, genellikle yer kabuğundaki ortalama konsantrasyonu ifade eden "kabuk bolluğu" terimiyle tanımlanır. Yaygın isimlendirmenin aksine, nadir toprak elementleri (NTE) yer kabuğunda nadir bulunan maddeler değildir. Toplam nadir toprak elementi bolluğu yaklaşık 220 ppm düzeyindedir. Bu miktar karbonun (200 ppm) bolluğundan daha fazladır ve birçok nadir toprak elementi, endüstride çok daha yakından tanınan metallere daha yüksek oranlarda bulunur. Nadir toprak elementleri kendi içlerinde belirgin bir bolluk varyasyonu gösterir. Bu dağılım üzerinde iki temel bilimsel prensip rol oynar: Öncelikle çift atom numarasına sahip elementler, tek atom numaralı komşularından doğada daha yaygın bulunur. İkinci olarak, daha düşük atom numaralı (hafif) nadir toprak elementleri, daha büyük iyon yarıçaplarına sahip oldukları için minerallerin kristal yapılarına daha zor uyum sağlarlar. Bu "uyumsuz" yapıları nedeniyle hafif nadir toprak elementleri, yüksek atom

* İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği



numaralı (ağır) olanlara kıyasla yerkabuğunda daha yoğun bir şekilde birikirler. Bu doğal süreçlerin bir sonucu olarak lantan, seryum, praseodim ve neodim en bol bulunan nadir toprak elementleridir. Tüm grup içerisinde seryum en yüksek bolluğa sahipken, tulyum en az bulunan elementtir. Mevcut veriler ışığında yapılan kıyaslamalar, bu elementlerin aslında ne kadar yaygın olduğunu çarpıcı bir şekilde ortaya koymaktadır. Seryumun yerkabuğundaki miktarı bakırdan daha fazladır; neodim, itriyum ve lantan ise kobalt veya kurşun gibi yaygın metallerle kıyasla daha bol bulunur. Benzer şekilde praseodim, samaryum, gadolinyum, disprosyum ve erbiyumun her birinin bolluğu kalay miktarını aşmaktadır. Grubun en nadir üyeleri olan iterbiyum ve tulyum dahi, doğada cıva veya gümüşten daha yüksek konsantrasyonlarda yer almaktadır.

Bununla birlikte yerkabuğundaki nadir toprak elementlerinin bolluğundaki farklılıklar biri nükleer diğeri jeokimyasal olmak üzere iki etkiyle açıklanmaktadır. Birincisi, çift atom numaralı nadir toprak elementleri (58Ce, 60Nd, ...) bitişik tek atom numaralı nadir toprak elementlerine (57La, 59Pr, ...) göre daha boldur. İkincisi, daha hafif nadir toprak elementleri daha uyumsuzdur (daha büyük iyonik yarıçaplara sahip oldukları için) ve bu nedenle yerkabuğunda daha ağır nadir toprak elementlerine göre daha yoğun bir şekilde bulunur. Çoğu nadir toprak yatağında, ilk dört nadir toprak elementi (La, Ce, Pr ve Nd) toplamın %80 ila %99'unu oluşturur. Bu nedenle, nispeten yüksek oranda daha nadir ve daha değerli ağır nadir toprak elementleri (HREE: Gd'den Lu'ya, Y) ve Eu içeren yataklar daha değerlidir.

Nadir toprak elementlerinin en önemli özelliklerinden biri "Lantanit büzülmesi" olarak tanımlanmaktadır. Bu terim, lantanit serisinde lantandan lütesyuma doğru ilerledikçe atom ve iyonların boyutundaki önemli ve sürekli azalmayı ifade etmek için kullanılır. Bu nedenle, lantan en büyük, lütesyum ise en küçük yarıçapa sahiptir. Büzülmenin nedeni, aynı alt kabuktaki bir elektronun diğerini yetersiz şekilde koruması olarak belirtilir. Lantandan lütesyuma doğru ilerledikçe, her elementte hem çekirdek yükü hem de 4f elektron sayısı bir artar. Orbitalerin şekli nedeniyle, bir 4f elektronunun diğerini koruması çok yetersizdir. Atom çekirdeği, oldukça yönlü 4f elektronları tarafından zayıf bir şekilde korunur

ve sonuç olarak, atom numarasının her artışında 4f elektronunun maruz kaldığı etkin çekirdek yükü artar, bu da tüm 4f kabuğunun boyutunda azalmaya veya büzülmesine neden olur. Atom numarasındaki ardışık artışla birlikte, bu büzülme birikir ve boyutun sürekli azalmasına neden olur. Lantanit büzülmesi, nadir toprak elementlerinin kimyasının birçok özelliğinin temel nedenidir. Lantan atomu ve üç pozitif yüklü iyonu, karşılık gelen itriyum türlerinden önemli ölçüde daha büyük olmasına rağmen, lantanit büzülmesinin büyüklüğü o kadar fazladır ki, lantanit türlerinin yarıçapları genel holmiyum-erbiyum bölgesinde itriyum türlerinin yarıçaplarına kadar azalır. En dıştaki elektronik düzenlemedeki benzerlik ve lantanit büzülmesinden kaynaklanan boyut benzerliği, itriyumun daha ağır lantanitlerle birlikte bulunmasını açıklar.

Avrupa Birliği (AB), kritik hammaddelere olan bağımlılığını azaltmak ve tedarik güvenliğini sağlamak amacıyla 2011 yılından itibaren belirli periyotlarla kritik hammadde listeleri yayınlamaktadır. Beşinci ve en güncel rapor 2023 yılında yayınlanmıştır. 34 adet kritik hammaddede içeren bu listenin oluşturulmasında tedarik riski (TR) ve ekonomik değer (ED) kavramları üzerinden bir değerlendirme yapılmıştır. Bir hammaddenin kritik olması için gerekli olan şartlar $TR \geq 1$ ve $ED \geq 2,8$ olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte kritiklik kriterini sağlamayan nikel ve bakır ise kritik teknolojilerde kullanıldıklarından AB komisyonu tarafından stratejik hammadde olarak tanımlanmıştır. Bu değerlendirmeye göre; nadir toprak elementleri en üst seviyelerde kritik hammadde olarak değerlendirilmiş ve ayrıca nadir toprak elementi cevherleri de (florit, barit) kritik hammadde olarak tanımlanmıştır.

Sadece AB değil birçok farklı ülke tarafından da kritik hammadde tanımları ve listeleri oluşturulmuş ve bağımlılığı azaltmak adına farklı aksiyonlar alınmıştır. Amerika Birleşik Devletleri (ABD), temiz enerji teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla artan talep ve tedarik zinciri kırılganlıkları nedeniyle kritik hammaddelere yönelik stratejik bir yaklaşım benimsemiştir. Son olarak 2023 yılında yayınlanan raporda kritiklik değerlendirmesi, malzemelerin enerji teknolojilerindeki önemi ve tedarik riski faktörlerine dayandırılmış, bu değerlendirme sonuçlarının,



The image shows a standard periodic table of elements. The elements are color-coded: Green for main group elements (s and p blocks), Yellow for transition metals (d block), Blue for lanthanides and actinides (f block), and Red for noble gases (group 18). The table includes element symbols, atomic numbers, and names.

araştırma-geliştirme önceliklerinin belirlenmesinde ve politika kararlarının alınmasında önemli rol oynayacağı ifade edilmiştir. Özellikle, nadir toprak elementleri (NTE), elektrikli araç motorları ve rüzgâr türbini jeneratörleri gibi önemli uygulamalarda kullanımları nedeniyle kritik malzeme listesinde yer almakta ve bu elementlerin ekstraksiyonu, ABD'nin temiz enerji hedeflerine ulaşması açısından stratejik bir öneme sahip olduğu raporda vurgulanmıştır.

Kanada, AB ve ABD gibi, kritik mineral tedarik zincirlerinin güvenliğini sağlamak ve bu minerallerin ekonomik önemini vurgulamak amacıyla benzer kriterler kullanarak lityum, nikel, kobalt ve nadir toprak elementleri (NTE) gibi 31 elementten oluşan bir kritik hammadde listesi oluşturmuştur.

Japonya, modern teknolojilerin ve temiz enerji teknolojilerinin vazgeçilmez unsurları olan kritik hammaddelerin temininde özellikle 2010 yılında Çin'in NTE ihracatını kısıtlamasıyla önemli zorluklarla karşı karşıya kalmıştır. Ülke, NTE gibi bazı minerallerde büyük ölçüde dışa bağımlıdır ve bu durum birçok ülkede olduğu gibi Japon ekonomisinde de ekonomik ve stratejik açıdan kırılganlık yaratmaktadır. Bu zorluklara yanıt olarak Japonya, kritik hammaddelerin istikrarlı tedarikini sağlamak amacıyla tedarik kaynaklarını çeşitlendirme, yerli ve alternatif kaynakları geliştirme, geri dönüşümü teşvik etme ve uluslararası işbirlikleri kurmak gibi önlemler almaktadır.

Türkiye ise 2025 yılında Kritik ve Stratejik Madenler listesi yayınlamıştır. Bu listenin belirlenmesinde göz önüne alınan kriterler kritik madenler için; arz kesintisi veya yüksek fiyat artışı halinde ciddi ekonomik sorunların veya tedarik güvenliği zafiyeti, sanayi üretiminin temel girdileri olmaları ve yüksek arz riski taşımaları, stratejik madenler için ise; ulusal güvenlik ve ekonomik refah için temel öneme sahip olan ve iç veya dış etkenler nedeniyle arzı kısıtlanabilir olmaları olarak belirtilmiştir. Nadir toprak elementleri bu listede de yer almaktadır.

Sonuç

Bu çalışmada nadir toprak elementlerinin tanımı yapılmış, kendine has kimyasal özellikleri üzerinde durulmuş ve uygulama alanlarına bağlı olarak bu elementlerin önemi değerlendirilmiştir. Üretimin özellikle Çin başta olmak üzere belirli ülkeler tarafından gerçekleşmesi nedeniyle AB, ABD vd. gelişmiş ülkelerin tedarik riski sorununu aşmak amacıyla nadir toprak elementlerini ve diğer hammaddeleri kritik olarak değerlendirdikleri aşikardır.

Bu doğrultuda bazı sayısal veriler nadir toprak elementleri üzerindeki hassasiyeti daha açık ortaya koyacaktır: Günümüzde Çin, otomobillerde, rüzgâr türbinlerinde, endüstriyel motorlarda, veri merkezlerinde ve savunma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan sinterlenmiş kalıcı mıknatısların (NdFeB) üretiminin %94'ünü karşılamaktadır (bu oran yirmi yıl önce %50 idi). Nadir toprak elementlerinin ihracatında dünya genelinde Çin hakimiyeti söz konusudur. 2008 yılındaki ihracat düşüşünün nedeni sıkı kotalar, yasadışı/verimsiz madenlerin kapatılması yükselen iç talep ve katma değerli üretimdir. 2008-2016 yılları arasında sektör konsolidasyonu, sıkı kotalar, çevre politikaları ve yurt içi kullanım önceliği ihracatı etkilemiştir. 2016 sonrasındaki ihracat artışının nedenleri ise kotaların gevşetilmesi, verimlilikteki artış ve küresel talepte artış olarak değerlendirilmektedir. Çin'in nadir toprak bileşikleri (oksitler, florürler, klorürler, karbonatlar vb.) ihracatı yıllık bazda %9 artarak 2024 yılında yaklaşık 46.500 tona ulaşmıştır ve bu hacmin %17'si AB'ye gönderilmiştir. Almanya, 2024 yılında yaklaşık 11.000 ton ile Çin'in yenilenebilir enerji hammaddelerinin Avrupa'daki en büyük tüketicisi olarak belirlenmiştir. İki Çinli, iki Avustralyalı ve bir ABD şirketinden oluşan beş nadir toprak elementi üreticisinin temsili grubunun kümülatif piyasa değeri, 1 Ocak ile 31 Ekim 2025 tarihleri arasında %175 artmıştır.

Bu kapsamda yapılan çalışma ve hazırlanan raporlarda görüleceği gibi son dönemde AB, ABD vb. gelişmiş ülkelerin üretim fırsatlarını iyileştirmesi, geri dönüşüm proseslerinin geliştirilmesi, yeniden kullanımın artırılması, ikame malzemelerin geliştirilmesi, uluslararası iş birliklerinin arttırılması gibi değerlendirmeler yapılmaktadır. Nadir toprak elementlerinin keşfinden modern sanayideki stratejik konumuna kadar uzanan bu süreç, sadece bir "teknolojik başarı hikayesi" olarak okunamaz. Bu elementlerin mülkiyeti ve tedarik zinciri üzerindeki küresel rekabet, sermaye birikiminin yeni alanlarını ve beraberinde getirdiği eşitsiz güç ilişkilerini kristalize etmektedir. Kritik hammaddeler ve özeldir nadir toprak elementleri için sadece "tedarik çeşitlendirmesi" veya "alternatif kaynak bulma" gibi piyasa merkezli yaklaşımların değil, kaynakların yönetimine dair radikal bir paradigma değişimi de göz önüne alınmalıdır.



NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNİN DÜNYA EKONOMİSİ VE TEKNO-POLİTİĞİNDEKİ YERİ

Prof. Dr. Fırat Burat*

Özet

Nadir toprak elementleri (NTE), enerji dönüşümü, elektrikli ulaşım, savunma sanayi ve dijital teknolojilerin temel girdileri olarak küresel ekonomi ve jeopolitiğin merkezine yerleşmiş durumdadır. Bu nedenle, artık yalnızca bir madencilik konusu değil, aynı zamanda sanayi politikası, enerji güvenliği ve ulusal strateji meselesidir. Günümüzde asıl belirleyici olan unsur sadece rezerv büyüklüğü değil, bu kaynakları zenginleştirme, kimyasal olarak ayırma, rafine etme ve yüksek katma değerli nihai ürünlere dönüştürme kapasitesidir. Dolayısıyla NTE bağlamında gerçek güç, yer altındaki potansiyelden ziyade değer zincirinin orta ve alt basamaklarında yer alabilmekten ve bu zinciri teknoloji temelli bir sanayi yapısıyla entegre edebilmekten geçmektedir.

Stratejik ve Kritik Mineral Çağı

Yer altı kaynakları, ülkelerin ekonomik kalkınmasında tarihsel olarak belirleyici rol oynamıştır. Tarım ve sanayinin temel girdilerini oluşturan madenler, ekonomik büyümenin omurgasıdır. Ancak günümüzde bazı madenler, klasik ekonomik önemlerinin ötesine geçerek stratejik ve jeopolitik anlam kazanmıştır.

Bir madenin "stratejik" olarak tanımlanabilmesi; dünya rezervlerinin önemli bölümüne sahip olunması, savunma ve ileri teknoloji sektörlerinde vazgeçilmez olması ve alternatifsiz nitelik taşıması gibi kriterlere bağlıdır. "Kritik" kavramı ise genellikle yüksek ekonomik önem ile yüksek tedarik riskinin kesiştiği noktayı ifade eder (Schrijvers vd., 2020; Nassar & Fortier, 2021). NTE'leri bu iki tanımın tam merkezinde yer almaktadır.

Güncel literatürde, "kritiklik" değerlendirmeleri esas olarak tedarik zincirinin son aşamasındaki aktörler tarafından yönlendirilir. Üretimde açığı olan ülkeler ve belirli endüstriler veya uygulamalar için ihtiyaç duyulan minerallerin tedarikiyle ilişkili riskleri belirlemeyi ve değerlendirmeyi amaçlar (Schrijvers vd., 2020; U.S. Department of Energy, 2023). Enerji ve dijital geçişlerle ilgili artan talep, küresel tedarik zincirlerinin artan karmaşıklığı ve bu dinamiklerin yarattığı jeopolitik gerginlikler riskleri daha da arttırmaktadır. Minerallere erişim ve üretimle ilişkili artan riskleri yönetmek için, tedarik kesintilerine karşı en savunmasız olan ülkeler ve endüstriler, zayıf kaynaklarını daha iyi belirlemek ve madencilik üretim değer zincirleri boyunca sıkışma noktalarını ve küresel tedarik zincirlerindeki ilgili zayıflıkları anlamak için risk değerlendirmeleri yapmaktadır (Nassar & Fortier, 2021).

* TMMOB Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Yönetim Kurulu Üyesi



Enerji Dönüşümü ve Mineral Yoğun Ekonomi

2050 yılına kadar net sıfır CO2 emisyonuna ulaşma zorunluluğu, küresel ekonomiyi fosil yakıtların egemen olduğu bir ekonomiden yenilenebilir enerji teknolojilerinin egemen olduğu bir ekonomiye dönüştürmek için kritik öneme sahip olacak çeşitli hammaddelerin üretiminin ve uluslararası ticaretinin önemli ölçüde artırılmasını gerektirecektir (Hund vd., 2023). Bu tür teknolojiler genellikle fosil yakıtlı muadillerine göre mineralleri daha yoğun kullanır. Örneğin, tipik bir elektrikli otomobil, geleneksel bir otomobilin altı katı mineral girdisi bir kara rüzgar santrali ise, gazla çalışan bir santralden dokuz kat daha fazla mineral kaynağı gerektirir. Bu nedenle, yeşil dönüşüm küresel olarak fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltırken, diğer hammaddelerin üretimi ve verimli uluslararası değişimi üzerindeki baskıyı yoğunlaştıracaktır. Örneğin, enerji sektöründeki yeni yatırımlarda yenilenebilir kaynakların payının artması nedeniyle, yeni bir güç üretim kapasitesi birimi için gereken ortalama mineral miktarı 2010'dan bu yana %50 artmıştır. Geleneksel olarak endüstriyel üretimi destekleyen görece bol miktarda bulunan ham maddeler (örneğin alüminyum, bakır, demir cevheri) de yeşil sektörlerde ve bunları mümkün kılan



teknolojilerde önemli olmaya devam edecektir. NTE (özellikle neodimyum ve disprozyum), lityum, kobalt, nikel gibi diğer malzemeler de yeni teknolojilerde yaygın kullanım alanları bulmakta ve bu nedenle taleplerinin önemli ölçüde artması beklenmektedir (Gielen, 2021). Örneğin IEA, önümüzdeki yirmi yılda temiz enerji sektörünün kobalt, doğal grafit veya lityum gibi malzemelere olan talebinin yirmi kattan kırk kata çıkacağını tahmin etmektedir. Genel olarak, yeşil dönüşümün varsayılan hızına bağlı olarak, minerallere olan talebin (enerji ve diğer sektörlerden) 2020 ile 2030 arasında ortalama dört ila altı kat artacağı tahmin edilmektedir (IEA, 2023).

NTE'ler: Rezervden Çok İşleme Gücü

NTE'ler bağlamında en önemli gerçek, küresel gücün rezerv büyüklüğünde değil, değer zincirinin hangi aşamasında yer aldığıdır. Madencilik yalnızca ilk adımdır. Asıl katma değer:

- Zenginleştirme
- Kimyasal ayırma
- Yüksek saflıkta oksit üretimi
- Kalıcı miktatsız ve alaşım üretimi

aşamalarından oluşmaktadır.

Bu süreçler ciddi farklı mühendislik bilgi birikimi ve altyapıları, solvent ekstraksiyon teknolojileri ve çevresel kontrol gerektirmektedir. Küresel ölçekte işleme kapasitesinin sınırlı sayıda ülkede yoğunlaşmış olması, NTE'leri jeopolitik bir emtia (doğal kaynak) haline getirmiştir. ABD Enerji Bakanlığı ve Avrupa Birliği'nin kritik maden stratejileri, tedarik risklerini azaltmak ve işleme kapasitesini artırmak amacıyla oluşturulmuştur. Bu çabalar, mineral güvenliğinin artık ulusal güvenlik boyutuna ulaştığını göstermektedir.

Kritikliğin Değerlendirilmesi: Arz Riski ve Jeopolitik Gerilim

Güncel literatürde kritiklik değerlendirmeleri çoğunlukla tedarik zincirinin son aşamasındaki aktörler tarafından yürütülmektedir. Ülkeler ve sanayi sektörleri, arz kesintisi risklerini belirlemek amacıyla nicel modeller geliştirmektedir (Schrijvers vd., 2020). Arz riski; üretimin coğrafi yoğunlaşması, ithalat bağımlılığı ve ikame imkanlarının sınırlılığı gibi faktörlere dayanmaktadır (Nassar & Fortier, 2021). Öte yandan üretici konumunda olan ülkeler, bu kaynakları jeopolitik bir pazarlık unsuru olarak değerlendirebilmektedir. Küresel sistemde mineral politikaları artık yalnızca ekonomik değil, diplomatik araçlar olarak da kullanılmaktadır.

Türkiye'nin Konumu: Potansiyel ve Tekno-Politik Eşik

Sanayileşmenin hızlanması, nüfus artışı, deniz aşırı ticaretin yaygınlaşması, tüketim alışkanlıklarının değişmesi ve teknolojik gelişmeler gibi faktörler enerji talebini süregelen biçimde artırmaktadır. Büyüyen enerji talebi ise çevre ve doğal kaynaklar üzerinde daha fazla baskı yaratmakta ve zaman zaman arz güvenliğine

yönelik endişeleri arttırmaktadır. Enerji talebi bu şekilde büyürken hem çevresel sürdürülebilirliğin hem de toplumsal huzur ve refahın temini için enerji verimliliği uygulamalarının yaygınlaştırılması en öncelikli seçenek haline gelmektedir. Enerji kaynaklarının üretimden tüketime kadar tüm aşamalarda en yüksek etkinlikte değerlendirilmesini ifade eden enerji verimliliği, yeni ve yenilikçi teknolojilerin kullanımıyla üretimin, hizmet sunumunun, konfor standartlarının veya sosyal refahın olumsuz yönde etkilenmesine meydan vermeden enerji tüketiminin azaltılmasını sağlamaktadır. Bu yönüyle sürdürülebilir kalkınmanın en önemli bileşenlerinden birisi olan enerji verimliliği; enerji sektöründeki diğer ulusal hedefleri tamamlayan, düşük karbonlu ekonomiye geçişi destekleyen ve sürdürülebilirliğe katkı sağlayan bir alandır (Yüce vd., 2025).

Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın resmi açıklamasına göre, Eskişehir–Beylikova sahasında yapılan jeolojik çalışmalar sonucunda yaklaşık 694 milyon ton nadir toprak elementi içeren cevher rezervi tespit edilmiştir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023). Bu kaynak özellikle hafif NTE'ler açısından dikkat çekicidir. Ancak uluslararası deneyimler göstermektedir ki rezerv büyüklüğü tek başına stratejik güç anlamına gelmemektedir.

Türkiye için asıl eşik:

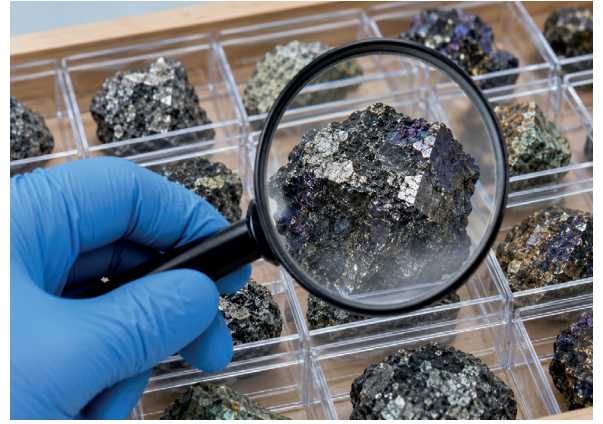
- Konuyla ilgili Ar-Ge çalışmalarının desteklenmesi
- Kimyasal zenginleştirme ve ayırma kapasitesinin geliştirilmesi
- Pilot ölçekli entegre tesislerin kurulması
- Endüstriyel ölçekte ileri malzeme üretimine geçiş olarak öne çıkmaktadır.

Ayrıca, kömür hazırlama atıkları ve endüstriyel artıkların NTE geri kazanımı açısından değerlendirilmesi, ikincil kaynak potansiyeli sunmaktadır. Bu yaklaşım, döngüsel ekonomi ile stratejik maden politikasını bütünleyici bir rol oynayacaktır.

Jeopolitik Denge Politikası ve Türkiye

Türkiye'nin stratejik yeraltı kaynaklarının ekonomik değeri ve uluslararası yerini inceleyen İTO raporunda, hammadde rezervlerinin yalnızca ekonomik değil stratejik öneme sahip olduğu vurgulanmaktadır (Alkin vd., 2003).

Küresel sistemde ABD–Çin rekabeti mineral güvenliği alanında da belirgindir. Türkiye'nin hem Batı ile hem de Asya ile ilişkilerini sürdürebilmesi, kritik mineraller alanında denge politikası yürütmesine imkan



tanıyabilir. Türkiye, kendisini tarafsız ve güvenilir bir tedarikçi olarak konumlandırabilirse:

- Sabit yatırımları çekebilir
- Batarya üretim zincirlerinde yer alabilir
- Savunma sanayinin mineral güvenliğini güçlendirebilir

Ancak, bu strateji, ham madde ihracatına dayalı bir modele sıkışmadan, değer zincirinin orta basamaklarına yatırım yapmayı gerektirmektedir.

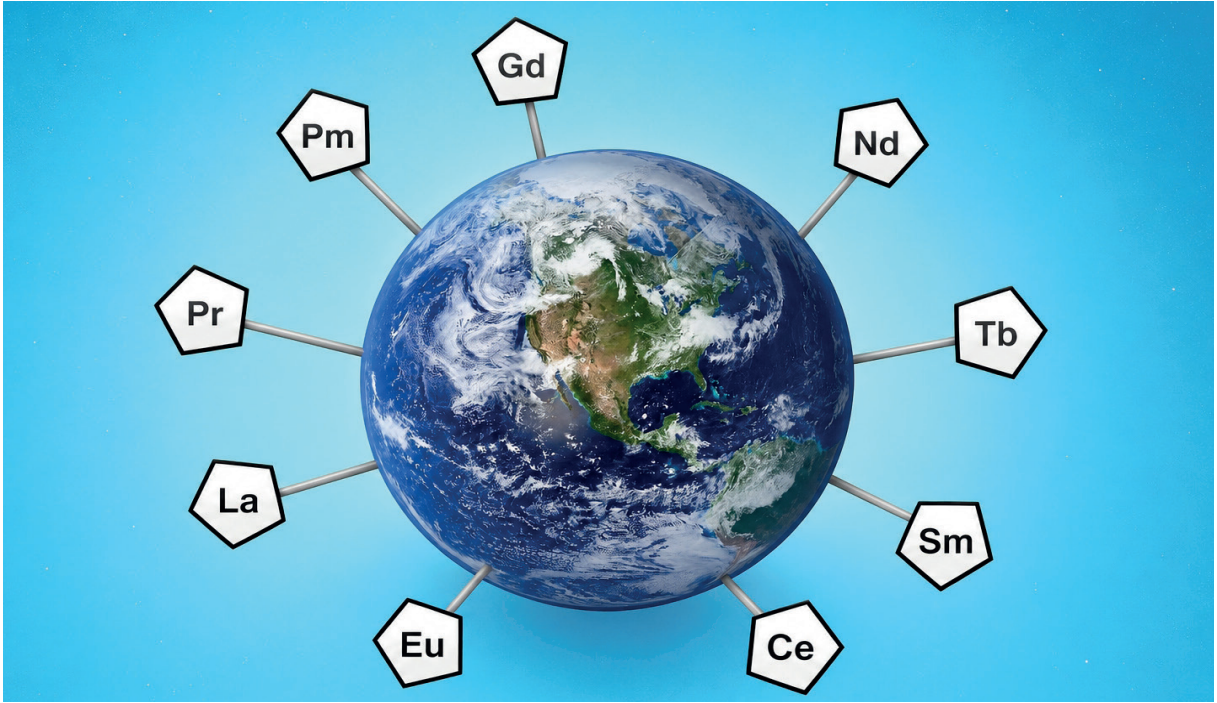
Sonuç: NTE'ler Yeni Güç Parametresi

2050 net sıfır hedefleri doğrultusunda dünya ekonomisi mineral yoğun bir yapıya dönüşmektedir (IEA, 2021). Bu dönüşüm, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltırken, kritik minerallere olan bağımlılığı artırmaktadır. NTE'ler bu dönüşümün merkezindedir. Küresel güç dengesi giderek daha fazla şu soruya bağlı hale gelmektedir:

“Kim çıkarıyor?” değil, “Kim işliyor ve yüksek katma değerli ürüne dönüştürüyor?”

Türkiye açısından mesele, jeolojik potansiyeli stratejik avantaja dönüştürmektir. Bunun yolu ise öncelikle yerli emtialarda (doğal kaynaklarda) hammadde veya yarı mamul ürün pazarlama yaklaşımından kesinlikle uzaklaşılmalı, ulusal kaynakların öncelikle kendi gereksinimlerimiz için nihai ürünlere dönüştürülmesinde gerekli Ar-Ge ve Ür-Ge yatırımlarına ağırlık verilmesi, çevreye duyarlı bir madencilik ile birlikte teknoloji, kimyasal işleme ve sanayi entegrasyonundan geçmektedir.

NTE'ler artık yalnızca bir maden grubu değil; enerji dönüşümünün, savunma sanayinin ve küresel teknolojik rekabetin temel parametrelerinden biridir.



ÜLKELERİN NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ, STRATEJİLERİ VE BAZI PROJELER

Doç. Dr. Burak BİROL*

ÖZET

Nadir toprak elementleri (NTE), sahip oldukları benzersiz manyetik, optik ve katalitik özellikler sayesinde modern yüksek teknoloji üretiminin temel girdileri arasında yer almakta ve enerji dönüşümü, dijitalleşme ve savunma sanayii gibi stratejik sektörlerde kritik bir rol oynamaktadır. Elektrikli araç motorları, rüzgâr türbinleri ve ileri elektronik sistemler gibi teknolojilere olan talebin artması, küresel ölçekte NTE ihtiyacını hızla yükseltmektedir. Bununla birlikte, nadir toprak elementlerinin madencilikten rafinasyona uzanan değer zincirinin sınırlı sayıda ülke tarafından kontrol edilmesi, küresel arz güvenliği açısından önemli kırılganlıklar yaratmaktadır. Özellikle Çin'in üretim ve ayrıştırma kapasitesindeki belirgin hâkimiyeti, bu kaynakları jeoekonomik ve jeopolitik rekabetin önemli bir unsuru hâline getirmiştir.

Bu çerçevede ABD, Avrupa Birliği, Japonya ve Avustralya gibi ülkeler tedarik zincirini çeşitlendirmeye, yerli üretim kapasitesini artırmaya ve geri dönüşüm teknolojilerini geliştirmeye yönelik stratejiler geliştirmektedir. Artan küresel rekabet ortamında Türkiye de Beylikova başta olmak üzere sahip olduğu potansiyel rezervler ve yürütülen kurumsal stratejiler ile nadir toprak elementleri değer zincirinde yer alma yönünde önemli bir potansiyele sahiptir. Küresel talebin hızla arttığı bu alanda yeni üretim projeleri, ileri ayrıştırma teknolojileri ve sürdürülebilir üretim yaklaşımları, nadir toprak elementleri tedarik sisteminin geleceğini şekillendiren temel unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

1.Giriş

Nadir toprak elementleri (NTE), modern sanayi ve ileri teknolojilerin gelişiminde oynadıkları kritik rol nedeniyle literatürde sıklıkla yüksek teknoloji ekonomisinin “vitaminleri” veya “tohumları” olarak tanımlanmaktadır. Toplamda 17 elementten (15 lantanit ile skandiyum ve itriyum) oluşan bu grup, benzersiz manyetik, optik ve katalitik özellikleri sayesinde akıllı telefonlar, rüzgâr türbinleri, elektrikli araç motorları ve savunma sanayii sistemleri gibi çok sayıda stratejik uygulamanın vazgeçilmez girdileri arasında yer almaktadır.

Küresel ekonominin dijitalleşme ve karbon-nötr büyüme hedefleri doğrultusunda yeniden yapılandığı günümüzde, özellikle temiz enerji teknolojileri, batarya sistemleri ve ileri savunma uygulamalarındaki hızlı genişleme, NTE'lere

* Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü



yönelik talebin önümüzdeki on yıllarda keskin biçimde artmasına yol açmaktadır. Uluslararası kuruluşlar, bu talebin 2040 yılına kadar mevcut seviyelerin birkaç katına ulaşabileceğini öngörmektedir.

Buna karşın, nadir toprak elementlerinin arzı, jeolojik bulunurluktan ziyade ekonomik olarak çıkarılabilir ve işlenebilir rezervlerin sınırlılığı nedeniyle ciddi yapısal kısıtlarla karşı karşıyadır. Madencilikten ayrıştırma ve rafinasyona uzanan süreçlerin teknik karmaşıklığı, yüksek sermaye gereksinimi ve çevresel maliyetleri, küresel NTE tedarik zincirlerinde kalıcı kırılmalara yol açmaktadır. Bu koşullar altında NTE arzı, salt ticari bir konu olmaktan çıkarak, devletlerin sanayi politikaları, ulusal güvenlik stratejileri ve jeopolitik rekabet dinamikleriyle iç içe geçen stratejik bir alan hâline gelmiştir.

2.Önemli Üretici ve Rezerv Sahibi Ülkeler

Çin:Küresel NTE ekosisteminin merkezidir. 2024 yılı madencilik kotası 270.000 ton, rafinasyon kotası ise 254.000 tondur. 44 milyon tonluk rezerviyle dünya lideridir. 17 elementin tamamını işleyebilen tek ülkedir; özellikle neodimyum (Nd), praseodim (Pr) gibi hafif NTE'ler ile disprosyum (Dy) ve terbiyum (Tb) gibi ağır NTE'lerin ana tedarikçisidir.

Avustralya: 2024 yılı üretimi yaklaşık 13.000 ton olarak tahmin edilmektedir. 3,4 milyon tonluk rezerve sahiptir. En önemli projesi olan Nolans, özellikle miknatıs yapımında kullanılan neodimyum ve praseodim (NdPr) odaklıdır. Myanmar (Burma): 2024 yılında 31.000 ton üretim yapması beklenmektedir. Özellikle ağır NTE kaynakları açısından zengindir ve bu cevheri işlemek üzere büyük oranda Çin'e ihraç etmektedir.

Rusya: 18 milyon ton ile dünyanın en büyük dördüncü rezervine sahiptir. 2024 üretimi 2.500 ton civarındadır. Rusya, son dönemde gübre üretiminden kalan fosfogips (phosphogypsum) atıklarından NTE geri kazanımı stratejisine odaklanmıştır.

Vietnam: 22 milyon tonluk devasa bir rezerve sahip olmasına rağmen üretimi yıllık 300 ton seviyesindedir. Dong Pao madeni, ülkenin en büyük yataklarından biri olarak Japon ortaklığıyla geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Brezilya: 21 milyon ton rezerve sahiptir; ancak 2024 üretimi sadece 20 ton olarak öngörülmektedir.

Hükümet, 2024'te arama ve ESG standartlarını iyileştirmek için 200 milyon dolarlık bir fon açıklamıştır. Hindistan: 6.9 milyon ton rezerve sahip olup yıllık 2.900 ton üretim yapmaktadır. Genellikle savunma sanayi ihtiyaçlarını karşılamak üzere hafif NTE rafinasyonu gerçekleştirmektedir.

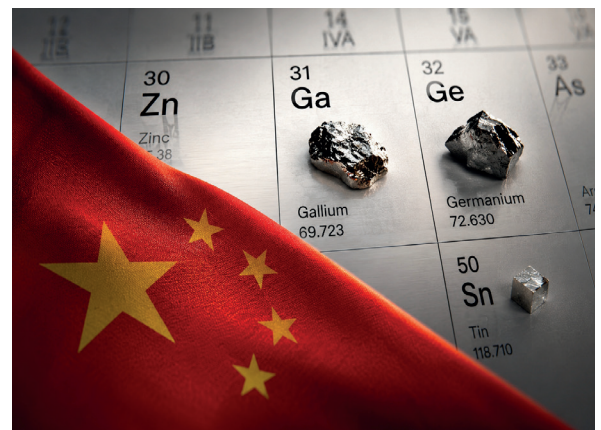
3.Ülkelerin Nadir Toprak Elementleri Politikası

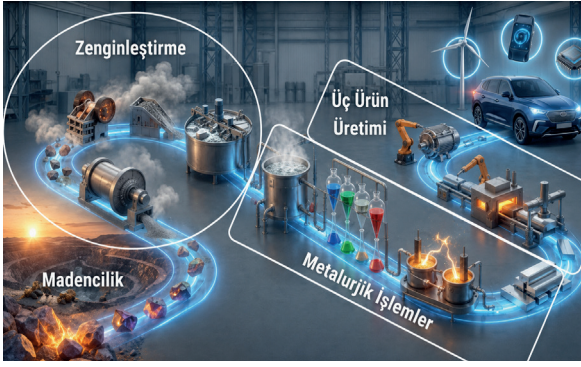
Nadir toprak elementleri, yüksek teknoloji üretimi, enerji dönüşümü ve savunma sanayii uygulamalarındaki kritik rolleri nedeniyle ülkelerin sanayi ve ulusal güvenlik politikalarının önemli bir bileşeni hâline gelmiştir. Küresel tedarik zincirinde yaşanan yoğunlaşma ve jeopolitik riskler, birçok ülkeyi nadir toprak elementleri alanında uzun vadeli stratejiler geliştirmeye yöneltmiştir. Bu kapsamda ülkeler; madencilik faaliyetlerinin artırılması, rafinasyon kapasitesinin geliştirilmesi, geri dönüşüm teknolojilerinin yaygınlaştırılması ve uluslararası iş birliklerinin güçlendirilmesi gibi farklı politika araçlarını devreye almaktadır.

3.1. Çin'in NTE Politikası

1960'lardan itibaren nadir toprak elementleri (NTE) üretiminde erken bir avantaj elde eden Çin, bu kaynakları yalnızca jeolojik bir varlık olarak değil, uzun vadeli sanayi ve güç projeksiyonu aracı olarak konumlandırmıştır. 2010'lu yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nin NTE tedarikinin yaklaşık %80'inin Çin'den ithal edilir hâle gelmesi, Çin'in düşük maliyetli üretim, devlet destekleri ve görece pek sıkı olmayan çevresel düzenlemeler yoluyla küresel piyasada bilinçli bir arz fazlası yarattığı yönünde değerlendirilmektedir. Deng Xiaoping'in 1987'de dile getirdiği "Ortadoğu'nun petrolü varsa, Çin'in nadir toprakları vardır" ifadesi, bu yaklaşımın erken dönemde stratejik bir vizyona dayandığını göstermektedir.

2024–2025 döneminde Çin, küresel NTE madenciliğinin %60–61'ini, rafinasyon ve ayrıştırma kapasitesinin ise %90'dan fazlasını kontrol etmektedir. 1 Ekim 2024'te yürürlüğe giren "Nadir Toprak Elementleri Yönetimi Yönetmeliği", NTE kaynaklarını açık biçimde devlet mülkiyetine almış; çıkarım, işleme ve ticareti yetkilendirilmiş kuruluşlarla sınırlandırmıştır. Merkezi





üretim planlaması, izlenebilirlik yükümlülükleri ve ihracatın ulusal güvenlik mevzuatına bağlanması, NTE arzının kurumsal olarak sıkı biçimde denetlendiğini göstermektedir. Böylece yönetmelik, Çin'in NTE ekosistemi üzerindeki yapısal hâkimiyetini pekiştirirken, bu kaynakların uluslararası düzeyde jeopolitik bir etki unsuru hâline gelmesini de kurumsal olarak mümkün kılmaktadır.

2025 yılında Çin bu stratejisini bir adım ileri taşıyarak, Nisan ve Ekim aylarında iki büyük ihracat kontrol dalgası başlatmıştır. Yurt dışında üretilen bir ürünün %0,1'den fazla Çin menşeli NTE içermesi veya Çin teknolojisiyle üretilmiş olması hâlinde lisans zorunluluğu getirilmesi, küresel tedarik zincirlerinde fiili bir denetim alanı yaratmıştır. Her ne kadar Çin hükümeti, 7 Kasım 2025'te ikinci dalga ihracat kontrollerinin 10 Kasım 2026'ya kadar geçici olarak askıya aldığını duyursa da bu durum, nadir toprak elementlerinin Çin tarafından jeoekonomik ve jeopolitik bir araç olarak kurumsallaştırıldığını ortaya koymaktadır.

3.2. Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nin NTE Politikası

ABD'nin 2025'te hız kazanan NTE politikası, Çin merkezli işleme ve türev ürün hâkimiyetini doğrudan ulusal güvenlik riski olarak tanımlamaktadır. 15 Nisan 2025 tarihli Section 232 Yürütme Emri, NTE içeren işlenmiş mineralleri ve türev ürünleri savunma sanayii ve ileri teknolojiler için vazgeçilmez girdiler olarak konumlandırmakta; tarifeler, ithalat kısıtlamaları ve yerli üretim teşviklerini içeren kapsamlı bir soruşturma süreci öngörmektedir.

Bu yaklaşım, yalnızca ticaret ve sanayi politikasıyla sınırlı kalmayarak arz coğrafyasının genişletilmesini de kapsamaktadır. 24 Nisan 2025 tarihli "Offshore Kritik Minerallerin Serbestleştirilmesi" Yürütme Emri, NTE dâhil kritik mineraller için derin deniz ve kıta sahanlığı kaynaklarını stratejik bir ulusal güvenlik alanı olarak tanımlamakta; hızlandırılmış ruhsatlandırma, haritalama ve yatırım mekanizmalarıyla deniz tabanı madenciliğini ABD'nin uzun vadeli arz güvenliği vizyonuna entegre etmektedir. Kara temelli Çin-dominant tedarik zincirlerine alternatif olarak deniz tabanı kaynaklarının devreye alınması, ABD'nin NTE stratejisinde jeoekonomik rekabetin yeni bir fazına geçildiğini göstermektedir.

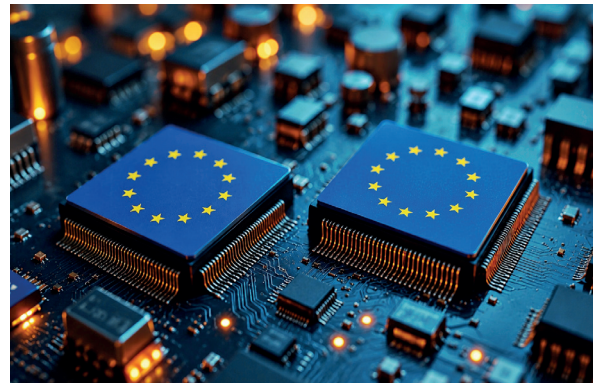
ABD politikası, ikili ve çok taraflı ortaklıklarla desteklenmektedir. Avustralya ve Japonya ile yapılan anlaşmalar, NTE değer zincirinin madencilikten işleme ve türev ürünlere kadar uzanan aşamalarında ortak finansman, uzun vadeli alım anlaşmaları, fiyat istikrarı mekanizmaları ve ulusal güvenlik temelli varlık denetimleri yoluyla Çin'e bağımlılığı azaltmayı hedeflemektedir. Malezya ve Tayland ile yapılan mutabakatlar ise Güneydoğu Asya'yı ABD öncülüğündeki "yüksek standartlı" NTE ekosistemine entegre ederek, işleme, rafinasyon ve katma değerli üretimi teşvik eden alternatif tedarik rejimleri oluşturmayı amaçlamaktadır. Güney Kore ile geliştirilen ortaklıklar ve ABD'de kurulması planlanan entegre NTE işleme ve miktatsız üretim tesisleri, bu müttefik temelli yaklaşımın türev ürün boyutunu güçlendirmektedir.

Kanada merkezli Cyclic Materials'ın Arizona'da nadir toprak geri dönüşümüne yönelik ilk ABD ticari tesisine yaptığı yatırım ve İçişleri Bakanlığı'nın enerji ve kritik mineraller için izin süreçlerini azami 28 güne indirme kararı, ABD'nin Çin-dominant NTE tedarik zincirlerine karşı yerli üretim, geri dönüşüm ve hızlandırılmış madencilik kapasitesi inşa etme hedefini yansıtmaktadır. Ayrıca 30 Nisan 2025'te imzalanan ABD-Ukrayna Mineral Anlaşması ile Ukrayna'nın zengin rezervlerine erişim sağlanarak Çin bağımlılığına alternatif bir hat oluşturulmuştur. Bu bütüncül yaklaşım, ABD'nin Çin'in yapısal hâkimiyetine karşı yalnızca ticari değil, aynı zamanda jeopolitik ve sanayi temelli bir karşı-strateji inşa ettiğini ortaya koymaktadır.

3.3 AB Kritik Hammaddeler Tüzüğü (CRMA) ve NTE

Avrupa Birliği'nin 2024'te yürürlüğe giren Kritik Hammaddeler Tüzüğü (CRMA), NTE'leri yeşil dönüşüm, savunma ve dijitalleşme açısından stratejik girdiler olarak tanımlamakta ve yüksek dış bağımlılığı yapısal bir risk olarak ele almaktadır. Özellikle kalıcı miktatsızlar, elektrikli araçlar, rüzgâr türbinleri ve savunma sistemleri için kritik öneme sahip olan NTE'lerde Çin kaynaklı yoğunlaşma, bu tüzüğün temel müdahale gerekçesini oluşturmaktadır.

CRMA, NTE değer zincirinde madencilik-işleme-geri dönüşüm entegrasyonunu güçlendirmeyi





hedeflemekte; 2030 yılına kadar NTE tüketiminin %10'unun yerli madenlerden, %40'ının yerli rafinasyondan ve %15'inin geri dönüşümden karşılanmasını öngörmektedir. Buna ek olarak, NTE'ler dâhil hiçbir stratejik hammaddede tek bir üçüncü ülkeye bağımlılığın %65'i aşmaması hedeflenerek, arzın jeopolitik risklere karşı çeşitlendirilmesi amaçlanmaktadır. Tüzüğün diğer bir dikkat çekici boyutlarından biri, kalıcı mıknatıslar üzerinden NTE'lere özgü döngüsellik ve şeffaflık yükümlülükleri getirmesidir. Buna göre, mıknatıs içeren ürünlerin NTE bileşimine ilişkin etiketleme zorunluluğu getirilmekte; geri dönüşüm, ikincil hammadde kullanımı ve atık yönetimi üye devletler için bağlayıcı politika alanları hâline getirilmektedir. Stratejik Projeler, hızlandırılmış izin süreçleri ve AB içi-dışı ortaklıklar (Global Gateway ve Mineral Güvenliği Ortaklığı dâhil) yoluyla NTE arzının güvence altına alınması hedeflenmektedir. Bu çerçevede CRMA, AB'nin nadir toprak elementlerini yalnızca sanayi girdisi değil, ekonomik güvenlik ve stratejik özerklik unsuru olarak yeniden konumlandığını göstermektedir.

RESourceEU Eylem Planı, AB'nin kritik hammaddeler ve özellikle nadir toprak elementleri (NTE) alanında Çin merkezli tedarik bağımlılığını azaltmak ve 2024'te yürürlüğe giren Kritik Hammaddeler Yasası'nın (CRMA) hedeflerini hızlandırmak amacıyla Aralık 2025'te kabul edilen bütüncül bir ekonomik güvenlik stratejisidir. Plan, NTE değer zincirinde özellikle kalıcı mıknatıslara odaklanarak, 2030'a kadar tek ülkeye bağımlılığı çıkarımda %95'ten %42'ye, işleme ve geri dönüşümde %100'den %60'a, mıknatıs üretiminde ise %90'dan %80'e indirmeyi hedeflemektedir. Bu doğrultuda Avrupa Kritik Hammaddeler Merkezi'nin kurulması, stratejik stoklama ve ortak satın alma mekanizmalarının devreye alınması ve InvestEU ile İnovasyon Fonu üzerinden yaklaşık 3 milyar avroluk finansmanın stratejik projelere yönlendirilmesi öngörülmektedir.

Planın ikinci ayağını, NTE arz güvenliğini kalıcı hâle getirmeyi amaçlayan döngüsellik, piyasa koruması ve jeopolitik iş birliği araçları oluşturmaktadır. Kalıcı mıknatıs hurdalarının AB dışına ihracatına kısıtlamalar getirilmesi, geri dönüşüm içeriği ve etiketleme

yükümlülüklerinin genişletilmesiyle iç piyasada ikincil hammadde arzının güçlendirilmesi hedeflenmektedir. Buna paralel olarak büyük şirketlere tedarik zinciri risk analizi yükümlülükleri getirilmesi, stratejik projelerin FDI taramasında daha sıkı denetlenmesi ve Brezilya, Ukrayna, Batı Balkanlar ile G7 çerçevesinde yeni ortaklıkların geliştirilmesi planlanmaktadır. Bu yönüyle RESourceEU, AB'nin NTE krizine karşı finansman, düzenleme ve diplomasi araçlarını birleştiren, jeoekonomik riskleri azaltmaya odaklı bir "stratejik müdahale rejimi" olarak konumlanmaktadır.

3.4. Japonya'nın NTE Stratejisi

2010 yılında Çin'in nadir toprak elementleri (NTE) ihracatını fiilen kısıtlamasıyla karşı karşıya kalan Japonya, bu şoku kapsamlı ve uzun vadeli bir arz güvenliği ve sanayi politikası dönüşümünün tetikleyicisi olarak değerlendirmiştir. Japon NTE stratejisi, METI ve JOGMEC öncülüğünde dört temel sütun üzerine inşa edilmiştir: (i) tedarik kaynaklarının çeşitlendirilmesi, (ii) teknolojik ikame ve NTE kullanım azaltımı, (iii) geri dönüşüm ve "urban mining", ve (iv) stratejik stoklama ve kamu finansmanı. Bu çerçevede Japonya, Lynas üzerinden Avustralya ile uzun vadeli "offtake" anlaşmaları yaparak Çin dışı madencilik ve işleme kapasitesini finanse etmiş; aynı zamanda Vietnam, Hindistan ve Kazakistan gibi ülkelerde yukarı akış (upstream) projelere kamu destekli yatırımlar yönlendirmiştir.

Akademik çalışmalar, Japon firmalarının özellikle kalıcı mıknatıslar ve elektrik motorlarında dysprosium ve terbium kullanımını azaltan malzeme mühendisliği çözümleri geliştirdiğini ve bu sayede yüksek riskli ağır NTE'lere olan bağımlılığı yapısal olarak düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Buna paralel olarak Japonya, elektronik atıklardan NTE geri kazanımını sistematik bir sanayi politikasına dönüştürmüştür; "urban mining" yaklaşımı, hem arz güvenliği hem de çevresel sürdürülebilirlik bağlamında literatürde örnek vaka olarak incelenmiştir. 2020'li yıllarda ise Japon NTE stratejisi, ekonomik güvenlik kavramının merkezine yerleşmiş; 2022 Ekonomik Güvenlik Yasası ve deniz tabanı minerallerine yönelik Ar-Ge programlarıyla, NTE'ler savunma sanayii, ileri teknoloji ve jeopolitik risk yönetimi bağlamında devlet destekli stratejik varlıklar olarak yeniden tanımlanmıştır.





3.5. Avustralya'nın NTE Stratejisi

Avustralya'nın "2023–2030 Kritik Mineraller Stratejisi", ülkeyi küresel enerji geçişinde sadece bir hammadde tedarikçisi olmaktan çıkarıp, işlenmiş minerallerle dünya lideri bir "yenilenebilir enerji süper gücü" haline getirmeyi hedefleyen kapsamlı bir ulusal çerçeve sunmaktadır. Bu vizyonun merkezinde, madenlerin yerli imkanlarla uç ürünlere dönüştürülmesini sağlayan egemen işleme kapasitesinin (sovereign capability) inşa edilmesi ve katma değerli ihracat yoluyla ekonomik getirinin maksimize edilmesi yer almaktadır. Stratejik olarak belirlenen altı odak alanı; projelerin finansal risklerden arındırılması, uluslararası ortaklıkların tesisi ve altyapı yatırımlarıyla desteklenerek, 2030 yılına kadar Avustralya'nın küresel tedarik zincirlerinde hem ham hem de rafine edilmiş kritik mineraller açısından vazgeçilmez, dayanıklı ve sürdürülebilir bir aktör konumuna gelmesini amaçlamaktadır. Stratejinin operasyonel başarısı, kamu destekli finansman araçları ile yüksek çevresel, sosyal ve yönetim (ESG) standartlarının entegrasyonuna dayanmaktadır. Bu kapsamda, Kuzey Avustralya Altyapı Fonu (NAIF) aracılığıyla tahsis edilen 500 milyon dolarlık kaynak ve Iluka Resources'ın nadir toprak rafinerisi gibi stratejik projelere sağlanan milyar dolarlık krediler, özel sektör yatırımlarını teşvik ederek projeleri ticari olarak uygulanabilir kılmaktadır. Eş zamanlı olarak, Birleşik Devletler, Birleşik Krallık ve Japonya gibi "benzer düşünceye sahip" ortaklarla kurulan stratejik ittifaklar, tedarik zincirlerinin çeşitlendirilmesi ve pazar konsantrasyonunun azaltılması açısından hayati önem taşımaktadır. Ayrıca, First Nations (İlk Milletler) topluluklarıyla kurulan hak temelli ortaklıklar ve dünyaca tescilli ESG performansı, Avustralya'nın küresel pazarda "güvenilir ve etik tedarikçi" kimliğini pekiştirerek sürdürülebilir bir sanayi büyümesini teminat altına almaktadır.

Bunun yanında Avustralya ikili düzeyde ABD, Japonya, Güney Kore, Hindistan, Birleşik Krallık ve AB gibi başlıca müttefiklerle kritik mineraller, temiz enerji ve net-sıfır teknolojileri odaklı ortaklıklar kurarak tedarik zincirlerini çeşitlendirmeyi ve Çin dışı işleme–rafineri kapasitesini güçlendirmeyi amaçlamaktadır. Çok taraflı düzeyde ise IEA, Minerals Security Partnership, Sustainable Critical Minerals Alliance, ISO, OECD ve Quad gibi platformlarda aktif rol

üstlenerek; ESG standartlarının yerleştirilmesi, şeffaf veri paylaşımı, teknik standartların geliştirilmesi ve sorumlu madencilik normlarının küreselleştirilmesini hedeflemektedir. Buna ek olarak, Austrade aracılığıyla offtake anlaşmaları, ortak yatırımlar ve aşağı akış (downstream) projelerine yönelik ticari eşleştirmeler desteklenmekte; yayımlanan Australian Critical Minerals Prospectus ile ileri aşamadaki projeler uluslararası yatırımcılara sunulmaktadır. Bu bütüncül yaklaşım, Avustralya'yı yalnızca bir hammadde tedarikçisi değil, yüksek standartlı ve müttefik temelli kritik mineral ekosisteminin merkezi aktörlerinden biri olarak konumlandırmaktadır.

3.6. Kanada'nın NTE Stratejisi

Kanada'nın "Kritik Mineraller Stratejisi", NTE'ni ekonomik büyüme ve öncelikli tedarik zincirleri için en yüksek potansiyele sahip altı öncelikli minerallerden biri olarak tanımlamaktadır. Stratejinin temel vizyonu, Kanada'yı ham madde ihracatçısı olmaktan çıkarıp, "madenden geri dönüşüme" kadar tüm değer zincirini (upstream, midstream, downstream) kapsayan entegre bir endüstriyel ekosistem haline getirmektedir. Bu kapsamda NTE'ler; özellikle elektrikli araç motorları, rüzgâr türbinleri ve savunma teknolojileri için kritik olan kalıcı miktatısların üretiminde temel yapı taşı olarak kabul edilmekte ve yerli imalatın yakıtı olarak görülmektedir. Kanada, bu stratejiyle Kuzeybatı Toprakları'ndaki (Nechalacho madeni) zengin rezervlerini, Saskatchewan gibi bölgelerde kurulan türünün ilk örneği olan işleme ve ayrıştırma tesisleriyle birleştirerek küresel piyasadaki rekabet gücünü artırmayı hedeflemektedir. Stratejinin operasyonel boyutu, yaklaşık 4 milyar dolarlık bir bütçe ve hedeflenen teşvik mekanizmalarıyla desteklenmektedir. NTE arama faaliyetlerini teşvik etmek amacıyla yatırımcılara %30 oranında "Kritik Mineral Arama Vergi Kredisini" (CMETC) sunulmakta, ayrıca Stratejik İnovasyon Fonu (SIF) aracılığıyla ileri işleme ve rafinaj projelerine 1,5 milyar dolarlık doğrudan destek sağlanmaktadır. Jeopolitik açıdan Kanada, NTE arzının birkaç ülkede yoğunlaşmasından kaynaklanan riskleri azaltmak için müttefikleriyle (ABD, AB, Japonya) tedarik zinciri direncini artırmayı ve "tercih edilen güvenilir tedarikçi"





olmayı amaçlamaktadır. Bu süreçte, yerli halklarla (Indigenous Peoples) ekonomik uzlaşma stratejik bir öncelik olarak ele alınmakta; Nechalacho projesinde olduğu gibi maden çıkarma operasyonlarının doğrudan yerli toplulukların liderliğinde veya ortaklığında yürütülmesi, Kanada'nın yüksek ESG (Çevresel, Sosyal ve Yönetişim) standartlarını küresel bir avantaj olarak konumlandırmasını sağlamaktadır.

3.7. Diğer Ülkelerdeki NTE Stratejileri

Hindistan ve Güney Kore, nadir toprak elementleri (NTE) ve kritik mineraller stratejilerini teknolojik bağımsızlık ve ulusal güvenlik odaklı bir "kendi kendine yetme" modeli üzerine inşa etmektedir. Hindistan, 2025 yılında başlattığı Ulusal Kritik Mineral Misyonu (NCMM) ile 30 kritik mineral belirlemiş ve bunlardan 24'ünü merkezi hükümetin münhasır ihale yetkisine alarak yerli arama faaliyetlerini (1.200 proje hedefiyle) hızlandırmıştır. Hindistan'ın stratejisi, enerji geçişi ve savunma sanayii ihtiyaçlarını güvence altına almak için hem yerli üretimi ve geri dönüşümü artırmayı hem de KABİL gibi kamu iştirakleri aracılığıyla Arjantin ve Avustralya gibi ülkelerde denizaşırı varlıklar edinmeyi içermektedir.

Güney Kore ise teknolojik hegemonyasını korumak amacıyla birçok NTE'yi "kritik mineral" olarak sınıflandırmış ve Ulusal Kaynak Güvenliği Konseyi aracılığıyla kaynak güvenliğini en üst seviyeye çıkarmıştır. Kore stratejisi, Çin'e olan ham madde bağımlılığını azaltmak için derin deniz aramalarına (Tamhla 3 araştırma gemisi gibi) yatırım yapmayı, stratejik stoklama tesisleri kurmayı ve batarya gibi yeşil teknolojilerde Ar-Ge liderliğini sürdürmeyi hedeflemektedir.

Brezilya ve Afrika ise mineral zenginliklerini sadece ham madde olarak ihraç etmek yerine, bu kaynakları yerli sanayileşme ve ekonomik dönüşüm için bir kaldıraç olarak kullanmayı amaçlayan "katma değer" odaklı stratejiler izlemektedir. Brezilya, Ulusal Kritik ve Stratejik Mineraller Politikası (PNMCE) aracılığıyla "mineral güvenliği" ve ulusal egemenliğini güçlendirmeyi, ham maddelerin ülke içinde işlenmesini zorunlu kılan yerel içerik kurallarını ve vergi teşviklerini devreye sokmayı planlamaktadır. Brezilya'nın yaklaşımı, enerji geçişinin yanı sıra gıda güvenliği için hayati önem taşıyan agromineralleri de kapsamakta ve döngüsel ekonomi ile batarya geri dönüşümüne öncelik vermektedir.

Benzer şekilde, 2025 yılında kabul edilen Afrika Yeşil Mineraller Stratejisi (AGMS), kıtanın yeşil mineral rezervlerini ham halde ihraç etme modelinden vazgeçerek, mineral bazlı yerel sanayileşme ve elektrifikasyonu hedefleyen dört sütunlu bir yol haritası sunmaktadır. Afrika stratejisi, AfCFTA çerçevesinde bölgesel değer zincirleri oluşturmayı, işlenmemiş minerallerin ihracatını kısıtlamak için Ortak Dış Tarife (CET) uygulamayı ve yerel teknik becerileri geliştirmek için Bölgesel Mükemmeliyet Merkezleri kurmayı öngörmektedir.

3.8. Türkiye'nin NTE Stratejisi

Türkiye'nin NTE stratejisi, ham madde ihracatına dayalı geleneksel modelden vazgeçerek rafinasyon, metalurji ve mınatıs üretimini kapsayan uçtan uca entegre bir sanayi ekosistemi kurmayı hedeflemektedir. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından yürütülen çalışmalar sonucunda Türkiye'de Eskişehir-Beylikova, Malatya-Kuluncak, Sivas ve Burdur illerinde stratejik öneme sahip Nadir Toprak Elementleri (NTE) yatakları tespit edilmiş olup; bu sahalar arasında özellikle barit, fluorit ve bastnasit içeren Eskişehir-Beylikova yatağı, yaklaşık 52 milyon tonluk toplam rezerv miktarı ve %3,14 oranındaki ortalama NTE tenörü ile öne çıkmaktadır. Bu rezervin ekonomik ve ticari bir değer ifade edebilmesi için Beylikova'daki rezervlerin uluslararası geçerliliğe sahip JORC veya UMREK standartlarına göre doğrulanma ve sertifikasyon sürecinin tamamlanması yatırımcı güveni ve projenin ekonomik uygulanabilirliği açısından temel bir gerekliliktir.

Türkiye'nin NTE stratejisi, "Milli Enerji ve Maden Politikası" çerçevesinde, yüksek teknoloji ve savunma sanayii ekosistemleri için kritik hammadde arz güvenliğini bir "stratejik kaldıraç" olarak konumlandırmaktadır. Bu vizyonun bilimsel ve teknolojik merkez üssü olarak yapılandırılan TENMAK, bünyesindeki Nadir Toprak Elementleri Araştırma Enstitüsü (NATEN) aracılığıyla; yerli kaynaklardan NTE eldesi, saflaştırma teknolojileri ve bu elementlerin ileri teknoloji ürünlerine entegrasyonu süreçlerini koordine etmektedir. Stratejinin kurumsal mimarisi; TAEK, BOREN ve NATEN'in Ar-Ge altyapıları ile yetkin insan kaynağını tek çatı altında birleştirerek, projelerin





finansman ve verimlilik kapasitesini maksimize eden güçlü bir operasyonel sinerji yaratmayı hedeflemektedir. Somut bir performans göstergesi olarak, 2028 yılına kadar NTE teknolojileri ile ilgili proseslerin gerçekleştirme oranının %80 seviyesine çıkarılması planlanmaktadır.

Operasyonel düzeyde ise Eti Maden tarafından Eskişehir’de hayata geçirilen Beylikova Florit, Barit ve Nadir Toprak Elementleri İşletme Müdürlüğü, kompleks cevherlerin ekonomiye kazandırılması ve pilot tesislerden büyük ölçekli endüstriyel üretime geçiş süreçlerinde merkezî bir rol üstlenmektedir. Türkiye’nin On İkinci Kalkınma Planı ile uyumlu olan bu strateji, NTE ve lityum üretiminde dünyanın majör oyuncularından biri haline gelmeyi ve madencilik ürünlerini ham madde olarak ihraç etmek yerine, yurt içinde işleyerek savunma, otomotiv, enerji ve sağlık sektörlerine yönelik "yüksek katma değerli uç ürünlere" dönüştürmeyi esas almaktadır. Bu süreçte, teknoloji transferine dayalı ortaklıklar teşvik edilmekte ve küresel ölçekte know-how sahibi ülkelerle stratejik proje iş birlikleri geliştirilmektedir.

TENMAK bünyesinde yürütülen stratejik planlama kapsamında, nükleer enerji, kritik mineraller ve ileri enerji teknolojilerine yönelik kurumsal hedefler uzun vadeli bir perspektifle belirlenmiştir. NATEN strateji dokümanında yer alan bu yaklaşım doğrultusunda, kurumsal gelişim hedefleri yirmi yıllık bir zaman dilimi içerisinde dört adet beş yıllık dönem halinde planlanmış ve her dönem için öncelikli faaliyet alanları tanımlanmıştır. Türkiye’nin NTE stratejisindeki en kritik darboğaz, elementlerin birbirinden yüksek saflıkta ayrıştırılması için gereken solvent ekstraksiyon (SX) teknolojisidir. Şu anki üretim saflığı yaklaşık %92-93 seviyesinde olup, ticari kullanım için bu oranın %99,5 ve üzerine çıkarılması şarttır. Bu kapsamda TENMAK (NATEN) ve TÜBİTAK MAM üzerinden yerli ayrıştırma prosesleri geliştirilmekte, özellikle toryumun güvenli bir şekilde ayrıştırılması için nükleer standartlarda tesisleşme yürütülmektedir.

4. Sonuç

Nadir toprak elementleri, günümüzde enerji dönüşümü, dijital teknolojiler ve savunma sanayii gibi stratejik sektörlerin temel girdilerinden biri haline gelmiş ve bu nedenle küresel jeoekonomik rekabetin merkezinde yer almaya başlamıştır. Bu çalışma kapsamında yapılan değerlendirmeler, küresel NTE tedarik zincirinin yüksek derecede yoğunlaşmış bir yapıya sahip olduğunu ve özellikle Çin’in madencilik, rafinasyon ve ileri malzeme üretimi aşamalarında belirgin bir hakimiyet kurduğunu ortaya koymaktadır.

Son yıllarda ABD, Avrupa Birliği, Japonya ve Avustralya gibi ülkeler tarafından geliştirilen politikalar, bu bağımlılığı azaltmaya yönelik kapsamlı bir tedarik güvenliği stratejisinin oluştuğunu göstermektedir. Bu stratejiler genel olarak üç temel eksen etrafında şekillenmektedir: yeni madencilik projelerinin geliştirilmesi, işleme ve rafinasyon kapasitesinin artırılması ve geri dönüşüm teknolojilerinin yaygınlaştırılması. Buna paralel olarak, uluslararası ortaklıklar ve müttefik temelli tedarik zinciri modelleri de giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Küresel ölçekte yürütülen projeler incelendiğinde, nadir toprak elementleri sektöründe yalnızca yeni maden sahalarının devreye alınmasının yeterli olmadığı; ekonomik ve stratejik değer yaratabilmek için ayrıştırma teknolojileri, metalurjik prosesler ve miknatis üretimi gibi ileri aşamaların da yerli kapasite ile desteklenmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Ayrıca çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir üretim modellerinin geliştirilmesi, sektörün geleceği açısından kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, Beylikova sahası başta olmak üzere sahip olunan potansiyel rezervler ve TENMAK NATEN öncülüğünde yürütülen Ar-Ge faaliyetleri, ülkenin NTE değer zincirinde daha etkin bir rol üstlenebileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, özellikle yüksek saflıkta ayrıştırma teknolojilerinin geliştirilmesi, uluslararası standartlarda rezerv doğrulama çalışmalarının tamamlanması ve endüstriyel ölçekli işleme tesislerinin kurulması, Türkiye’nin bu alandaki rekabet gücünü belirleyecek temel unsurlar olacaktır.

Sonuç olarak, nadir toprak elementleri alanındaki küresel rekabetin önümüzdeki yıllarda daha da yoğunlaşması beklenmektedir. Bu bağlamda, madencilik faaliyetlerinin yanı sıra teknoloji geliştirme, geri dönüşüm ve uluslararası iş birliklerini içeren bütüncül politikalar, ülkelerin stratejik mineral güvenliğini sağlamasında belirleyici olacaktır.



NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ EKSTRAKSİYON SÜREÇLERİNDE ÇEVRESEL ETKİLER VE GERİ KAZANIM

Yük. Met. ve Malz. Müh. Anıl Umut ÖZDEMİR, Dr. İlayda ÖZBAĞ TOĞAÇAR, Doç. Dr. Ahmet TURAN*

Özet

Nadir toprak elementleri (NTE), 15 lantanit serisi elementi ile skandiyum ve itriyumdan oluşan, modern teknolojilerin temel yapı taşlarını meydana getiren stratejik bir element grubudur. Yenilenebilir enerji sistemleri, elektrikli araç motorları, tıbbi görüntüleme cihazları ve savunma teknolojileri başta olmak üzere pek çok ileri teknoloji uygulamasında kritik işlevler üstlenen bu elementlere olan küresel talep, yeşil enerji dönüşümüyle birlikte hızla artmaktadır. Bununla birlikte, NTE'lerin birincil kaynaklardan kazanılması; her ton nadir toprak oksit üretimi için yaklaşık 2.000 ton toksik atık, 75 m3 asidik atık çözelti ve binlerce metreküp asit gazı salımına yol açmakta, bunun yanı sıra radyoaktif toryum ve uranyum içeren artıklar nedeniyle ciddi çevresel ve halk sağlığı riskleri doğurmaktadır. Tüm bu olumsuz etkiler, NTE arzının sürdürülebilir biçimde güvence altına alınması için alternatif yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, ömrünü tamamlamış NTE içerikli ürünlerin geri dönüştürülmesi, yani "kent madenciliği", hem çevresel yükü azaltmak hem de arz güvenliğini pekiştirmek açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Yapılan çalışmalar, geri dönüşüm yoluyla NTE üretiminin birincil üretime kıyasla enerji tüketimini ve CO2 emisyonlarını %64-96 oranında azaltabildiğini ortaya koymaktadır. NdFeB kalıcı mıknatıslar, yüksek NTE içerikleri (%31-32 ağırlıkça) ve yaygın kullanım alanları nedeniyle ikincil metalurji süreçleri için en cazip hammadde kaynaklarından birini oluşturmaktadır. Bu çalışma, NTE geri kazanımına yönelik piro-metalurjik yaklaşımları, bu süreçlerin çevresel ve ekonomik boyutlarını ve ömrünü tamamlamış NdFeB mıknatısların işlenmesine ilişkin güncel gelişmeleri kapsamlı biçimde ele almaktadır.

NTE Metalurjisinin Çevresel Etkileri ve Geri Dönüşümün Önemi

NTE cevherinin işlenmesi, üretilen her ton nadir toprak oksit için yaklaşık 2.000 ton toksik atık ortaya çıkarmaktadır. Bu atıklar arasında ton başına ~13 kg toz, ~75 m3 asidik atık su ve 9.600- 12.000 m3 asit buharı ile partikül içeren atık gaz bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, pek çok NTE cevheri radyoaktif toryum (Th) ve uranyum (U) içermesi nedeniyle ek çevresel ve sağlık riskleri doğurmaktadır. Rafinasyon süreçlerinde açığa çıkan hidroflorik ve sülfürik asit gibi asit gazları ile ince partiküller, hava kalitesini olumsuz etkilemektedir.

Geri dönüşüm, bu olumsuz etkilerin azaltılmasında kritik bir rol üstlenmektedir. Yapılan çalışmalar, NdFeB mıknatısların geri dönüştürülmesinin birincil madencilğe kıyasla enerji tüketimini ton başına 2.000 - 4.000 kWh düzeyine indirdiğini, CO2 (karbon dioksit) emisyonlarını ise ton başına yalnızca 50 - 100 kg'a düşürdüğünü göstermektedir (birincil üretimde bu değer 200 - 500 kg CO2/ton düzeyindedir). Genel çevresel etki üzerinde %64-96 oranında azaltım sağlaması, geri dönüşümü hem ekolojik hem de stratejik bir zorunluluk kılmaktadır.

Ömrünü Tamamlamış NdFeB Mıknatıslardan NTE Geri Kazanımı: Piro-metalurjik ve Hidrometalurjik Yaklaşımlar

Ömrünü tamamlamış NdFeB mıknatıslar, yüksek NTE içerikleri nedeniyle ikincil metalurji süreçleri için önemli bir hammadde kaynağı oluşturmaktadır. Bu mıknatıslardan NTE geri kazanımında iki temel işlem yolu öne çıkmaktadır: pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler. Her iki yaklaşım da hammaddenin öncelikle demagnetizasyon ve

* Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü

boyut küçültme gibi ön işlemlerden geçirilmesini gerektirmektedir. Demagnetizasyon, mıknatısların Curie sıcaklığının üzerinde ısıtılması ya da mekanik işlem yoluyla gerçekleştirilmekte; ardından öğütme veya kırma ile homojen bir toz fraksiyonu elde edilmektedir.

Pirometalurjik yöntemler arasında en yaygın uygulanan kavurma işlemidir. Bu yöntemde NdFeB tozu, yüksek sıcaklıklarda (genellikle 700 - 1100°C aralığında) oksidatif atmosferde ısıtılarak Nd₂Fe₁₄B fazının termal olarak parçalanması ve bileşenlerin oksitlere dönüştürülmesi sağlanmaktadır. Kavurma sürecinde reaktör geometrisi, gaz akış hızı ve sıcaklık profili gibi parametreler, oluşacak faz bileşimini doğrudan belirlemektedir. Dinamik kavurmada numune sürekli bir gaz akışına maruz kalırken, statik kavurmada atmosfer sabit tutulmaktadır; bu fark, oksidasyon kinetiği ve faz seçiciliği açısından belirleyici rol oynamaktadır. Ellingham diyagramı, kavurma koşullarında hangi oksit fazlarının termodinamik olarak kararlı olduğunu öngörmek amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Kavurma ürünleri olan oksit karışımları, seçici liç ya da ergitme yoluyla NTE bakımından zengin fraksiyonlara ayrılabilir. Curuf metalurjisi de pirometalurjik yaklaşımlar arasında değerlendirilmekte olup bu yöntemde NTE'lerin sıvı curuf fazına seçici olarak geçirilmesi, ardından curufun katılaştırılıp liç ile işlenmesi esasına dayanmaktadır. B₂O₃ – Nd₂O₃ ve B₂O₃ – Nd₂O₃ – FeO gibi ikili ve üçlü faz diyagramları, bu süreçte curuf bileşiminin optimizasyonu ve uygun işlem pencerelerinin belirlenmesi için kritik bir tasarım aracı işlevi görmektedir.

Hidrometalurjik yöntemler ise NdFeB tozu veya kavurma ürünlerinin asit ya da baz çözeltilerinde çözündürülmesine dayanmaktadır. Liç işleminde hidroklorik asit (HCl), sülfürik asit (H₂SO₄) ve nitrik asit (HNO₃) en sık kullanılan çözücüler arasında yer almaktadır. Liç verimliliği; asit konsantrasyonu, çözelti sıcaklığı, katı-sıvı oranı, karıştırma hızı ve liç süresi gibi parametrelerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Doğrudan liç yönteminde ham NdFeB tozu asit çözeltilisine beslenerek Fe, Nd, Pr ve diğer elementlerin birlikte çözünmesi sağlanmakta; ardından seçici çökeltme, solvent ekstraksiyonu veya iyon değişimi yoluyla elementler ayrıştırılmaktadır. Kavurma ürününün liç edildiği iki aşamalı yöntemlerde ise demir oksitlerin seçici çözünürlüğü ile NTE oksitlerinin liç aşamalarında farklılaştırılması mümkün olabilmekte; bu sayede ayırma yükü azaltılmaktadır. Liç sonrası çözeltiden NTE'lerin geri kazanımı için oksalik asit ile çökeltme, amonyumla çöktürme ve solvent ekstraksiyon (D₂EH₂PA, Cyanex 572 gibi ekstraktanlarla) yaygın olarak uygulanmaktadır. Son aşamada elde edilen NTE tuzları, kalsinasyon yoluyla yüksek saflıkta oksitlere dönüştürülebilmektedir.

Her iki yöntem yaklaşımı da kendi içinde çeşitli avantajlar ve kısıtlamalar barındırmakta olup hammadde bileşimi, ölçek, enerji maliyeti ve hedef ürün saflığı gibi faktörler, uygulanacak proses rotasının seçiminde belirleyici olmaktadır.

Sonuçlar ve Değerlendirme

Nadir toprak elementleri, yeşil enerji teknolojilerinin ve ileri sanayi uygulamalarının temel girdileri olmaya devam etmekte; bu durum, söz konusu elementlere yönelik küresel talebin önümüzdeki on yıllarda da artış eğilimini koruyacağına işaret etmektedir. Bununla birlikte, birincil üretim süreçlerinin doğurduğu ağır çevresel yük - toksik atık üretimi, asidik atık su, radyoaktif atıklar ve yüksek sera gazı emisyonları - NTE arzının mevcut yapısının uzun vadede sürdürülebilir olmadığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu gerçeklik, ikincil kaynaklardan NTE geri kazanımını hem bir zorunluluk hem de stratejik bir fırsat olarak ön plana çıkarmaktadır.

Ömrünü tamamlamış NdFeB kalıcı mıknatıslar, %31-32 düzeyindeki yüksek NTE içerikleri ve belgelenmiş atık akış hacimleriyle ikincil metalurji için en değerli hammadde kaynaklarından birini oluşturmaktadır. Bu makale kapsamında ele alınan pirometalurjik ve hidrometalurjik yaklaşımlar, söz konusu hammaddeden NTE geri kazanımının teknik açıdan gerçekleştirilebilir olduğunu ve birbirini tamamlayan proses adımlarıyla verimli biçimde yürütülebileceğini göstermektedir. Ellingham diyagramı analizinden elde edilen termodinamik bulgu, NTE oksitlerin son derece yüksek kararlılığa sahip bileşikler olduğunu ve doğrudan karbotermik redüksiyon gibi geleneksel pirometalurjik yollarla metalik forma dönüştürülemeyeceğini ortaya koymaktadır. Bu temel kısıt, oksitleyici kavurma ile ardından uygulanan asit liçini kapsayan dolaylı proseslerin tasarımını bilimsel açıdan zorunlu kılmaktadır. Kavurma aşamasında sıcaklık, atmosfer türü ve süre parametrelerinin optimize edilmesi; faz denge diyagramlarının rehberliğinde curuf bileşiminin kontrol altına alınması ve liç koşullarının (asit türü, konsantrasyonu, sıcaklık) sistematik biçimde incelenmesi, bu proses zincirinin verimlilik ve seçicilik açısından iyileştirilmesinde kritik önem taşımaktadır.

Çevresel boyutuyla değerlendirildiğinde, geri dönüşüm yoluyla NTE üretimi birincil üretime kıyasla enerji tüketimini ve CO₂ emisyonlarını önemli biçimde - literatürde bildirilen tahminlere göre %64-96 oranında - azaltabilmektedir. Bu oranlar, NdFeB mıknatısı geri dönüşümünün yalnızca bir atık yönetimi stratejisi olmadığını; aynı zamanda NTE tedarik zincirinin karbonsuzlaştırılmasına somut katkı sağlayan, proaktif bir çevresel eylem olduğunu ortaya koymaktadır. Avrupa Birliği'nin 2023 Kritik Hammaddeler Yasası çerçevesinde benimsenen hedefler ve küresel ölçekteki düzenleyici baskılar göz önüne alındığında, NdFeB mıknatısı geri dönüşüm kapasitesinin geliştirilmesi yalnızca akademik değil, endüstriyel ve politika boyutlarıyla da ivedi bir öncelik niteliği taşımaktadır.

İleride yürütülecek çalışmalar; liç sonrası NTE zengin çözeltilerden seçici çökeltme ve solvent ekstraksiyon gibi ayırma adımlarının optimizasyonuna, endüstriyel ölçeğe geçişin ekonomik fizibilitesine ve farklı mıknatıs bileşimleri ile atık akışlarına uyarlanabilir esnek proses tasarımlarının geliştirilmesine odaklanmalıdır. Sonuç olarak, NTE geri kazanımı; sürdürülebilir malzeme döngüsü, yeşil dönüşümün hammadde güvencesi ve çevresel sorumluluk ilkelerinin kesişiminde, önemi giderek artan bir araştırma ve uygulama alanı olmayı sürdürmektedir.



Bilim ve Teknik için
tmmob
var!