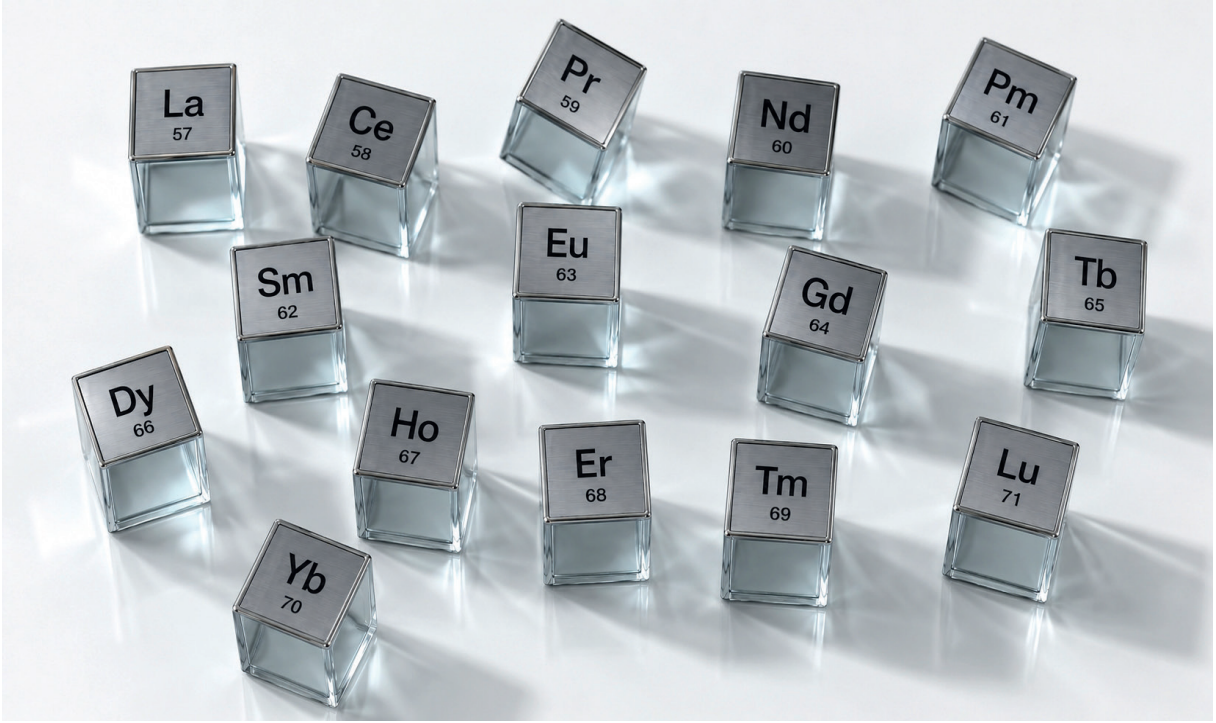




NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ: KAVRAM, KAPSAM VE ÖNEMİ

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 inner transition metals (f block), and Red for noble gases (group 18). The table includes element symbols, atomic numbers, and names in both English and Turkish.

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 artırılması 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.