Metalurji ve Malzeme

TMMOB METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLERİ ODASI YAYIN ORGANI | MAYIS 2026

Sayı 10
ISSN: 2757-9484

NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ (NTE)

DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE MEVCUT DURUM VE GELECEK SENARYOLARI SEMPOZYUMU

ÖZEL SAYI

TMMOB METALURJİ ve MALZEME MÜHENDİSLERİ ODASI

TMMOB METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLERİ ODASI 35. DÖNEM YÖNETİM ORGANLARI / MERKEZ YÖNETİM KURULU	
AHMET İRFAN TÜRKKOLU	Yönetim Kurulu Başkanı
AHMET TURAN	Yönetim Kurulu 2. Başkan
TURGAY ALDI	Yönetim Kurulu Yazman Üye
ULAŞ YAPRAK	Yönetim Kurulu Sayman Üye
MEHMET ŞEREF SÖNMEZ	Yönetim Kurulu Üyesi
DEVRİM KARAHAN	Yönetim Kurulu Üyesi
YAĞMUR LALECİ GİTMEZ	Yönetim Kurulu Üyesi

TMMOB METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLERİ ODASI İSTANBUL ŞUBESİ 17. DÖNEM YÖNETİM KURULU	
ERDAL YOLLU	Yönetim Kurulu Başkanı
SEZGİ AKYOL TATAROĞLU	Yönetim Kurulu 2. Başkan
UMUR BERKAN ÇELİK	Yönetim Kurulu Yazman Üye
İZEL KOCABAŞ	Yönetim Kurulu Sayman Üye
EKREM ALTUNCU	Yönetim Kurulu Üyesi
EMREHAN DOĞAN	Yönetim Kurulu Üyesi
EZGİ ÖZYURT CENGİZ	Yönetim Kurulu Üyesi

TMMOB METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLERİ ODASI İZMİR ŞUBESİ 4. DÖNEM YÖNETİM KURULU	
ALİŞAN YILMAZ	Yönetim Kurulu Başkanı
TUĞBANUR SEZER BOZARDIÇ	Yönetim Kurulu 2. Başkan
EMRE BARAN	Yönetim Kurulu Yazman Üye
SEMİH KAYA	Yönetim Kurulu Sayman Üye
HAKAN KARACA	Yönetim Kurulu Üyesi
İSMAİL FİDAN	Yönetim Kurulu Üyesi
BAŞAK KALAYLI	Yönetim Kurulu Üyesi

Oda WhatsApp Topluluğuna katılım için Qr Kodu okutabilirsiniz.

TMMOB METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLERİ ODASI İLETİŞİM BİLGİLERİ

MERKEZ		İSTANBUL ŞUBE	
Adres	Kültür Mahallesi, Çaldıran Sokak Nida Apt. No: 14 / 13 Kızılay Çankaya ANKARA	**Adres**	Barbaros Mah. Yavuz Selim Caddesi No:4 Ataşehir 34746 İSTANBUL
Telefon	(312) 425 4160 - (312) 419 3818	**Telefon**	(216) 330 9178
e-posta	oda@metalurji.org.tr	**e-posta**	metalist@metalurji.org.tr
İZMİR ŞUBE		**BURSA İL TEMSİLCİLİĞİ**	
Adres	Anadolu Cad. Tepekule İş Merkezi Kat:2 No: 205 Bayraklı/İzmir	**e-posta**	bursa@metalurji.org.tr
Telefon	(232) 486 56 80	**ADANA İL TEMSİLCİLİĞİ**	
e-posta	izmir@metalurji.org.tr	**e-posta**	adana@metalurji.org.tr

AKDENİZ BÖLGE TEMSİLCİLİĞİ		MERSİN İL TEMSİLCİLİĞİ	
Adres	Yenişehir Mah. 26 Sokak Ahmet Sakacı Apt. NO:12 İskenderun - HATAY	**Telefon**	0(532) 799 76 30
e-posta	iskenderun@metalurji.org.tr		

Web	www.metalurji.org.tr	**Facebook**	@tmmobmetalurji	**Twitter**	TMMOBMetalurji
Linkedin	Linkedin.com/company/tmmobmetalurji				

İÇİNDEKİLER

TMMOB Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası
Metalurji ve Malzeme Dergisi
Yaygın Süreli Yayın
3 Ayda bir Türkçe yayınlanır

İmtiyaz Sahibi
TMMOB Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası Adına
Yönetim Kurulu Başkanı
Ahmet İrfan TÜRKKOLU

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü
Alişan YILMAZ
İzmir Şube Yönetim Kurulu Başkanı

Yayın Kurulu
Ahmet TURAN (Başkan)
Berkay CENGİZ
Cansu NOBERİ
Cüneyt DİNÇEL
Emine Bengü KAYA

Reklam, Dağıtım
Umur Berkan ÇELİK

Dergi Yönetim ve Yazışma Adresi
TMMOB Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası
Kültür Mahallesi, Çaldıran Sokak Nida Apt. No: 14 / 13
Kızılay Çankaya ANKARA
Tel: 0312 425 41 60
e-mail: oda@metalurji.org.tr
http://www.metalurji.org.tr

Üyelere ücretsiz gönderilir.

Basıma hazırlayan : Adresist Reklamcılık
Barbaros Mh. Ihlamur Bulvarı No : 3/15
Ataşehir İstanbul
Tel: 0533 369 23 29
www.adresist.com

Baskı: Bilnet Matbaacılık ve Yayıncılık A.Ş.
Dudullu Organize San. Bölgesi 1.Cad. No:16
Ümraniye-İSTANBUL
Tel: 444 44 03 • Fax: (0216) 365 99 07
www.bilnet.net.tr
Sertifika No: 42716

Basım Tarihi
MAYIS 2026
Yazılardaki görüş ve düşünceler yazarlarına aittir.

TMMOB METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLERİ ODASI VE NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ
A. İrfan Türkkolu — **3**

NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ: DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE DURUM VE GELECEK SENARYOLARI
NTE Sempozyum Yürütme Kurulu — **5**

NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ: KAVRAM, KAPSAM VE ÖNEMİ
Doç. Dr. M. Şeref SÖNMEZ — **9**

ÜLKELERİN NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ STRATEJİLERİ VE BAZI PROJELER
Doç. Dr. Burak BİROL — **17**

CEVHERDEN UÇ ÜRÜNE: NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ ÜRETİMİNDE METALURJİK SÜREÇLER
Dr. Ş. Samet Kaplan — **32**

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 — **35**

TÜRKİYE'DE KRİTİK STRATEJİK MİNERALLERDE KRİTİKLİK HESAPLAMASI
Doç. Dr. Mertol GÖKELMA — **41**

TMMOB METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLERİ ODASI

1970

Oda WhatsApp Topluluğuna
katılım için Qr Kodu okutabilirsiniz.

TMMOB METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLERİ ODASI VE NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ

TMMOB Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası olarak Nadir Toprak Elementleri konusunda; "Nadir Toprak Elementleri (NTE) Dünyada ve Türkiye'de Mevcut Durum ve Gelecek Senaryoları Sempozyumu"nu gerçekleştirdik. Ve her zaman olduğu gibi başarı ile tamamladık.

Bu etkinlik ile birlikte meslek odamız açısından da birçok ilki gerçekleştirmiş olduk. Öncelikle; isminden dolayı çok popüler olan ve giderek bölgesel paylaşım savaşlarına neden olacağı görülen Nadir Toprak Elementleri konusunda yapılan ilk mesleki etkinlik.

Öte yandan Meslek Odası olarak 30 yıldır Ankara'da etkinlik yapmamışız. Bu anlamda da bir ilki yaşıyoruz. Dileğimiz o ki devamını getirtelim.

Yıllardır Ankara'da etkinlik yapmamış olmamızın da etkisi olsa gerek; bugüne dek üst birliğimiz TMMOB'nin başkanlarını etkinliklerimizde göremiyorduk. Bu defa hem etkinliğe katılan hem de konuşma yaparak konuya ilişkin TMMOB'nin görüşlerini dile getiren Emin Koramaz başkan da bize teşekkürlerle ifade ettiğimiz bir ilki yaşattı.

Teknolojik gelişmelerin nadir toprak elementlerinin çıkarılması ve işlenebilmesi olanaklarını yaratması doğal olarak ekonomik ve politik sonuçlara yol açıyor. Bölgesel paylaşım savaşları giderek nadir toprak elementleri kaynaklarına sahip olma savaşlarına dönüşüyor. Her yeni teknolojide olduğu gibi nadir toprak elementlerini doğal kaynak olmaktan stratejik ürünlere dönüştürme süreci ekolojik sorunlar yaratmaktadır. Bu konuda da Danimarka Teknoloji Enstitüsü'nün "Yeni teknolojiler yarattığı konfordan daha fazla sorun üretmemelidir" yaklaşımını dikkate almak gerektiği kanısındayız. Ne var ki günümüzde egemenlik ve sömürü odaklı iktidarlar teknolojiyi toplumun refahı için değil emperyal amaçları için kullanmaktalar.

Bilindiği üzere Meslek Odalarının genel tanımı içinde; teknolojik gelişmeleri takip etmek, bu gelişmeler doğrultusunda meslek alanı içine giren her türlü endüstriyel ve teknik uygulamalarda ulusal doğal kaynakların, sürdürülebilir kalkınma kavramı çerçevesinde ve kamu yararı gözetilerek, akılcı bir şekilde araştırılması, bulunması ve değerlendirilmesi için gerekli bilimsel, teknik ve hukuki çalışmaları yaparak ülke kalkınmasına katkıda bulunmak, oluşacak çevre sorunları konularında görüş belirtmek ve önerilerde bulunmak, üretimde çevre dostu teknoloji ve yöntemleri kullandırmak ve bunları denetlemek var.

Bu doğrultuda ele aldığımız nadir Toprak elementleri elbette multidisipliner bir konu. Bu anlamda diğer mühendislik disiplinleri ile aynı anlayışta ortaklaşarak çalışmalar yapmak gerekliliği açıktır. Genelde yer altı varlıklarımıza yönelik yaklaşımımız bilinmektedir. Özellikle altın madeni konusunda yıllardır sürdürdüğümüz ekolojik mücadele ki son olarak Erzincan İliç felaketi nedeniyle TBMM'de oluşan Komisyona bu konudaki yaklaşımımızı açıkça beyan ettik, Bu anlamda da toplumsal sorumluluğumuzu yerine getirme konusundaki hassasiyetimize dikkat çekmek isterim.

Organizasyon, içerik, sunumlar ve katılımcıların ilgisi açısından oldukça başarılı ve interaktif bir sempozyum gerçekleştirdik. Çok kısa bir zaman dilimi içinde böylesine yeni bir konuda gerçekten kaliteli ve bilimsel düzeyi yüksek bir etkinlik düzenleyebilmiş olmaktan dolayı Oda Yönetim Kurulu olarak mutluyuz. Bu anlamda Sempozyum yürütme kuruluna teşekkür ediyoruz.

Elbette yoğun mesaileri içinde bize vakit ayırarak sunumları ve açıklamaları ile böylesi "nadir" bir konuyu anlaşılabilir kılan konuşmacı konuklarımıza da çok teşekkür ediyoruz. Soru ve kısa açıklamaları ile konuyu derinleştiren, özellikle ülkemiz açısından ortada dolaşan magazinel haberlerin karşısında gerçeklerin açıklanmasına vesile olan katılımcılara da çok teşekkür ediyoruz. İnanıyoruz ki; sempozyum özellikle genç meslektaşlarımız açısından faydalı olmuştur.

Çalışmalarını meslek aşkı, meslektaş hakkı ve memleket sevdası doğrultusunda sürdüren bizler; kendimiz üretmez isek bağımsız olamayacağımızın bilinciyle; Nadir Toprak Elementleri konusunda da emperyalist tekellere ödün vermeden halkın çıkarları doğrultusunda politikalar üretilmesini zorunluluk olarak görüyoruz.

Tüm süreçlerde olduğu gibi nadir Toprak Elementlerinin çıkarımı, işlenmesi ve son ürüne dönüşmesi aşamalarında çevre, ekoloji ve sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda hareket edilmelidir. Ekolojik kırıma neden olan üretim süreçleri yanında iklim krizini de dikkate aldığımızda gezegenimizi yaşanabilir bir habitat olarak koruma zorunluluğu açıkça görülmektedir.

Başta Nadir metaller olmak üzere tüm teknolojik gelişmelerin; evrensel değerler doğrultusunda, barış ve özgürlük içinde daha iyi bir yaşam sağlaması gerektiğini savunuyoruz. Ne var ki; Hitler artığı pedofilleri ortaya çıkaran sistemi yok etmedikçe teknolojik gelişmeleri barış ve insanlık için kullanmak pek kolay olmayacak.

Bu sempozyumun sadece teknolojik gelişmeleri tartışmak değil, teknolojiyi barış içinde daha güzel bir dünya umudunu gerçekleştirmek doğrultusunda da küçük bir adım olduğu inancıyla oda çalışanlarımıza ve katkı koyan herkese teşekkür ediyorum.

Saygılarımla

A. İrfan Türkkolu

Yönetim Kurulu Başkanı

NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ: DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE DURUM VE GELECEK SENARYOLARI

Nadir toprak elementleri (NTE), ileri teknoloji ürün ve üretim süreçlerinin temel girdileri arasında yer almakta ve bu özellikleri nedeniyle küresel ekonomi-politik sistem içerisinde giderek artan bir stratejik değer kazanmaktadır. Lantanitler serisi ile birlikte skandiyum ve itriyumdan oluşan bu element grubu; elektronik, yenilenebilir enerji, savunma sanayi ve diğer birçok ileri teknoloji uygulamalarında yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu bağlamda NTE'ler, yalnızca ekonomik birer doğal kaynak olmanın ötesinde, teknolojik rekabet ve jeopolitik güç dengeleri açısından da belirleyici unsurlardan biri haline gelmiştir.

Küresel ölçekte NTE arzı incelendiğinde, üretim ve işleme kapasitesinin büyük ölçüde Çin tarafından kontrol edildiği görülmektedir. Bu durum, özellikle sanayileşmiş ülkeler açısından tedarik zinciri güvenliği bağlamında önemli riskler barındırmaktadır. Nitekim son yıllarda ABD ve Avrupa Birliği gibi aktörler, kritik hammaddelere erişim konusunda dışa bağımlılığı azaltmak amacıyla yeni stratejiler ve politikalar geliştirmektedir. Bu politikalar; alternatif tedarik kaynaklarının çeşitlendirilmesi, geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi ve yerli üretim kapasitesinin artırılması gibi unsurları içermektedir. Bu bağlamda geri dönüşüm, birincil üretimin yarattığı tedarik zinciri risklerini azaltmanın yanı sıra çevresel etkileri minimize etme açısından da kritik bir işlev üstlenmektedir. Kullanım ömrünü tamamlamış elektronik cihazlar ve kalıcı mıknatıslar başta olmak üzere NTE içeren atık akışlarının geri kazanılması, hem kaynak verimliliğini artırmakta hem de Çin'e olan bağımlılığı hafifletme potansiyeli taşımaktadır. Türkiye'nin bu alanda henüz erken aşamada olduğu göz önünde bulundurulduğunda, NTE geri dönüşümüne yönelik teknolojik altyapı ve politika çerçevesinin oluşturulması öncelikli bir gündem maddesi olarak değerlendirilmelidir.

NTE'lerin stratejik öneminin artmasında dünyanın önemli meselelerinden biri olan yeşil enerjiye geçiş süreçleri de belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu çerçevede, NTE'ler düşük karbon ekonomisinin kritik bileşenleri arasında yer almaktadır. Dolayısıyla bu kaynaklara erişim, yalnızca ekonomik rekabet açısından değil, aynı zamanda iklim politikaları ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından da stratejik bir nitelik taşımaktadır.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, NTE'ler hem ekonomik kalkınma hem de stratejik özerklik bağlamında önemli fırsatlar sunmaktadır. Özellikle Eskişehir Beylikova bölgesinde keşfedilen rezervler, Türkiye'nin bu alanda potansiyel bir üretici ülke haline gelebileceğine işaret etmektedir. Ancak bu potansiyelin etkin biçimde değerlendirilebilmesi için yalnızca çıkarım faaliyetlerine odaklanılması yeterli değildir. NTE'lerin yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülmesi, ileri işleme teknolojilerinin geliştirilmesi ve bu süreçlerin sanayi politikalarıyla entegre edilmesi gerekmektedir.

Bu noktada, teknoloji geliştirme kapasitesi ve AR-GE yatırımları belirleyici faktörler olarak öne çıkmaktadır. NTE cevherlerinin işlenmesi karmaşık ve maliyetli süreçler gerektirdiğinden, bu alanda rekabet edebilmek için güçlü bir bilimsel ve teknolojik altyapının oluşturulması zorunludur. Ayrıca, üniversite-sanayi iş birliğinin güçlendirilmesi ve nitelikli insan kaynağının yetiştirilmesi de bu sürecin önemli bileşenleri arasında yer almaktadır.

Öte yandan, NTE madenciliği ve metalurjisi önemli çevresel riskler de barındırmaktadır. Bu süreçlerde ortaya çıkan atıklar ve kimyasal kullanımının doğaya verebileceği zararlar göz önünde bulundurulduğunda, sürdürülebilir ve çevre dostu üretim modellerinin geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, çevresel düzenlemeler ve denetim mekanizmaları, NTE politikalarının ayrılmaz bir parçası olmalıdır. Bu çerçevede, birincil üretime olan baskıyı azaltacak kapalı döngü sistemlerin ve kent madenciliği kavramı çerçevesinde NTE geri dönüşümünün teşvik edilmesi, hem çevresel hem de stratejik açıdan bütünleşik bir çözüm sunmaktadır.

Nadir toprak elementleri sahip oldukları özgün özellikler nedeniyle metalurji ve malzeme bilimi ve mühendisliği alanlarının merkezinde bulunmaktadır. Bu elementler, özellikle

malzemelerin performansını artırma, yeni nesil fonksiyonel malzemeler geliştirme ve ileri mühendislik uygulamalarını mümkün kılma açısından kritik bir rol oynamaktadır.

NTE'ler, alaşım tasarımında önemli katkılar sağlamaktadır. Fonksiyonel malzemelerin geliştirilmesinde de kritik önemdedir. NTE'lerin metalurji ve malzeme bilimi ve mühendisliği açısından değerlendirilmesi yalnızca kullanım alanlarıyla sınırlı değildir. Bu elementlerin cevherlerinden ayrıştırılması, saflaştırılması ve işlenmesi oldukça karmaşık ve çok aşamalı süreçler gerektirmektedir. Bu süreçler; pirometalurji, hidrometalurji, elektrometalürji ve son yıllarda gelişen çevre dostu ekstraksiyon tekniklerini içermektedir. Dolayısıyla NTE'ler, ileri düzey proses geliştirme ve optimizasyon çalışmaları çerçevesinde de önemli bir araştırma ve geliştirme alanını oluşturmaktadır. Özetle nadir toprak elementleri cevherden başlayarak, mevcut malzemelerin performansının artırılması, yeni fonksiyonel malzemelerin geliştirilmesine kadar çok geniş bir yelpazede metalurji ve malzeme bilimi arasında güçlü bir köprü kurmaktadır. Bu nedenle NTE'ler, hem temel bilim ve araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda yenilikçi çözümlerin anahtar bileşenleri arasında sayılmakta ve bu alanlardaki disiplinlerarası çalışmaları giderek daha önemli hale getirmektedir.

Sonuç olarak, nadir toprak elementleri günümüzde küresel güç rekabetinin merkezinde konumlanan stratejik kaynaklar arasında hızla yerini almıştır. Türkiye'nin bu alandaki potansiyelini etkin biçimde değerlendirebilmesi, yalnızca doğal kaynak varlığına değil; aynı zamanda teknoloji, sanayi ve çevre politikalarını bütüncül bir yaklaşımla ele almasına bağlıdır. Bu çerçevede geliştirilecek uzun vadeli ve entegre politikalar, Türkiye'nin küresel değer zincirlerinde daha güçlü bir konum elde etmesine katkı sağlayacaktır.

Stratejik önemi ve aynı zamanda mesleğimiz ile yakın ilişkisi nedeniyle TMMOB Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası **10 Ocak 2026** tarihinde NTE'leri hem teknik hem de stratejik bakımdan ele alan **"Nadir Toprak Elementleri: Dünyada ve Türkiye'de Durum ve Gelecek Senaryoları"** sempozyumunu gerçekleştirmiştir.

Sempozyumda sunulan bildirilerin yer aldığı bu "Nadir Toprak Elementleri Özel Sayısı"nı saygıyla ilgilerinize sunuyoruz.

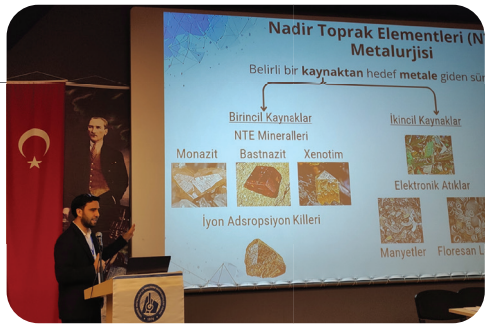
Sempozyum Yürütme Kurulu

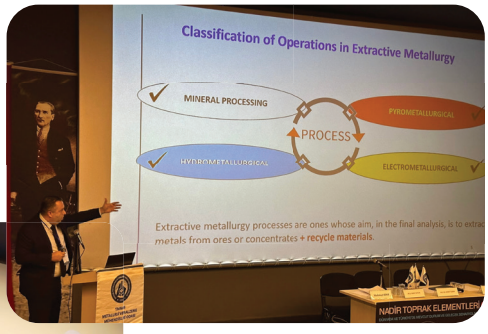
Nadir Toprak Elementleri (NTE)
Dünyada ve Türkiye'de Mevcut Durum ve Gelecek Senaryoları Sempozyumu

Program

10 OCAK 2026

09:30 – 10:00	**Açılış Konuşmaları** **A. İrfan Türkkolu** *TMMOB Metalurji ve Malzeme Müh. Odası Yönetim Kurulu Başkanı* **Emin Koramaz** *TMMOB Yönetim Kurulu Başkanı*	
OTURUM1	**Oturum Başkanı: Prof. Dr. C. Hakan Gür -** Orta Doğu Teknik Üniversitesi	
10:00 – 10:30	Nadir Toprak Elementleri (Metalleri) Kavram, Kapsam ve Önemi	**Doç. Dr. Şeref Sönmez** İstanbul Teknik Üniversitesi
10:30 – 11:00	Nadir Toprak Elementleri Madenciliği ve Dünyada ve Türkiye'de Bilinen Başlıca Maden Yatakları (Rezervler)	**Necati Yıldız** Maden Yük. Müh.
11:00 – 11:30	Ara	
OTURUM2	**Oturum Başkanı: Mahmut Kiper -** TMMOB Metalurji ve Malzeme M.O.	
11:30 – 12:00	Nadir Toprak Elementlerinin Metalurjisi	**Dr. Ş. Samet Kaplan** Hitit Üniversitesi
12:00 – 12:30	Nadir Toprak Elementleri Ekstraksiyon Süreçlerinde Çevresel Etkiler ve Geri Kazanım	**Doç. Dr. Ahmet Turan** Yeditepe Üniversitesi
12:30 – 13:00	Ülkelerin Nadir Toprak Elementleri Stratejileri ve Bazı Projeler	**Doç. Dr. Burak Birol** Yıldız Teknik Üniversitesi
13:00 – 14:00	Yemek Arası	
PANEL	**Nadir Toprak Elementleri için Dünyada Gelecek Senaryoları ve Türkiye için Öneriler**	
14:00 – 16:30	**Panel Yöneticisi:** **Doç. Dr. Şeref Sönmez** *(İstanbul Teknik Üniversitesi)* **Panelistler:** **Doç. Dr. Mertol Gökelma** *(İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü)* **Dr. Elif Emil Kaya** *(Norwegian University of Science and Technology - NTNU)* **Doç. Dr. Ahmet Turan** *(Yeditepe Üniversitesi)* **Prof. Dr. Bengi Yağmurlu** *(Technische Universitat Clausthal)* **Dr. Duygu Yılmaz** *(Institute for Energy Technology - IFE)*	
16:30 – 16:45	Değerlendirme ve Kapanış	





NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ (NTE)

DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE MEVCUT DURUM VE GELECEK SENARYOLARI SEMPOZYUMU

NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ: KAVRAM, KAPSAM VE ÖNEMİ

Doç. Dr. M. Şeref SÖNMEZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

GİRİŞ

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 [1].

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 sürmüş; 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 [1].

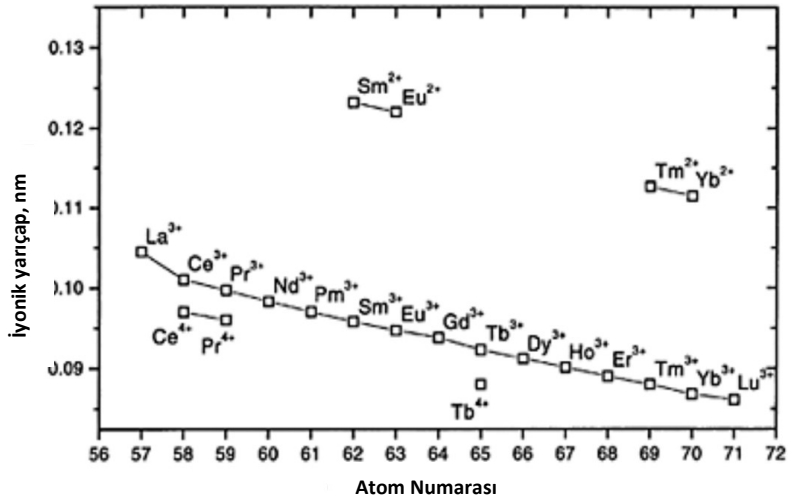
Bir elementin doğadaki mevcudiyeti, genellikle yer kabuğundaki ortalama konsantrasyonu ifade eden "kabuk bolluğu" terimiyle tanımlanır. Yaygın isimlendirmenin aksine, nadir toprak elementleri (NTE) yerkabuğunda nadir bulunan maddeler değildir. Toplam nadir toprak elementi bolluğu yaklaşık 220 ppm düzeyindedir (Tablo 1); bu miktar karbonun (200 ppm) bolluğundan daha fazladır ve birçok nadir toprak elementi, endüstride çok daha yakından tanınan metallerden 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 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 metallere 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 [1].

Tablo 1. *Nadir toprak elementlerinin yerkabuğunda bulunma oranları [1].*

Element	Miktar (ppm)
Skandiyum (Sc)	22
İtriyum (Y)	33
Lantan (La)	39
Seryum (Ce)	66.5
Praseodim (Pr)	9.2
Neodim (Nd)	41.5
Samaryum (Sm)	7.05
Evropiyum (Eu)	2.0
Gadolinyum (Gd)	6.2
Terbiyum (Tb)	1.2
Disprosyum (Dy)	5.2
Holmiyum (Ho)	1.3
Erbiyum (Er)	3.5
Tulyum (Tm)	0.52
İterbiyum (Yb)	3.2
Lütesyum (Lu)	0.8

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 [2].

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, Şekil 1'de gösterildiği gibi, 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. Orbitallerin 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 büzülmeler 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 [1].



Şekil 1. *Lantanit büzülmesi*

ÖNEM

Nadir toprak elementlerinin önemini belirleyen geniş kullanım alanlarına yönelik veriler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. *Nadir toprak elementlerinin uygulama alanları [1].*

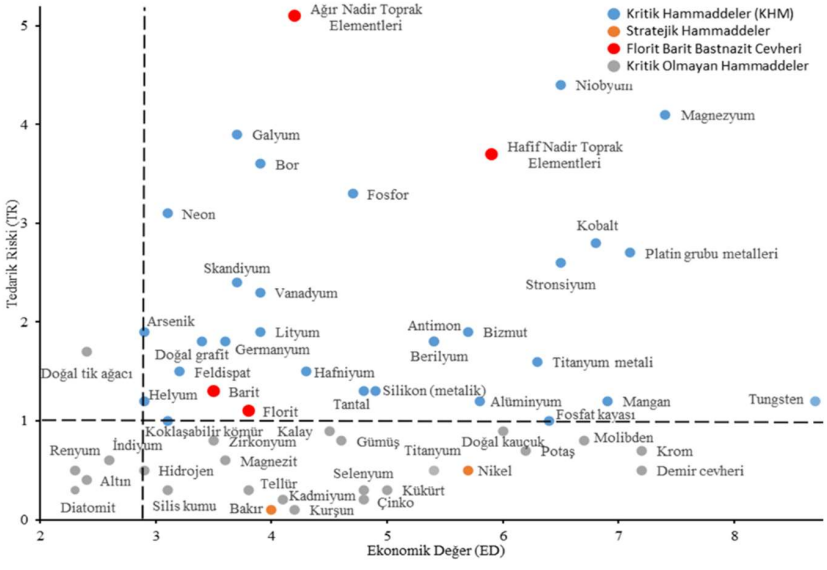
Nadir Toprak Elementi	Uygulama
Lantan	Lantan bakımından zengin nadir toprak bileşikleri, özellikle ağır ham petrolden düşük oktanlı yakıt üretiminde, Akışkan Katalitik Kırma katalizörlerinde bileşen olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrojen depolama pillerinde önemli bir role sahiptir. (La0.4Ce0.45Tb0.15)PO4 bazlı yeşil fosforlarda kullanılmaktadır. Lantanit zirkonatlar, katalitik ve iletkenlik özellikleri nedeniyle kullanılırken, lantan stabilize zirkonya yüksek elektronik ve mekanik özelliklere sahiptir. Lantan, itriyum-lantan-florür bileşimine dayalı lazer kristallerinde kullanılmaktadır.
Seryum	Seryumun ticari uygulamaları çok sayıdadır ve cam ve cam parlatma, fosforlar, seramikler, katalizörler ve metalurji gibi alanlarda kullanılmaktadır: Cam endüstrisinde, hassas optik parlatma için en verimli cam parlatma maddesi olarak kabul edilir. Ayrıca demiri demir(II) halinde tutarak camın rengini açmak için de kullanılır. Seryum katkılı camın ultraviyole ışığı engelleme özelliği, tıbbi cam eşyaların ve uzay pencerelerinin üretiminde kullanılır. Ayrıca polimerlerin güneş ışığında kararmasını önlemek ve televizyon camının renk değişimini bastırmak için de kullanılır. Performansı artırmak için optik bileşenlere uygulanır. Fosforlarda seryumun rolü, yayıcı atom olarak değil, "duyarlılaştırıcı" olarak görev yapmaktır. Seryum ayrıca diş kompozisyonları da dahil olmak üzere çeşitli seramiklerde ve zirkonya bazlı ürünlerde faz stabilizatörü olarak kullanılır. Seryum oksit çeşitli katalitik roller üstlenir. Katalitik konvertörlerde, yüksek yüzey alanlı alümina için stabilizatör, su-gaz kaydırma reaksiyonunun destekleyicisi, oksijen depolama bileşeni ve rodyumun NOX indirgeme kapasitesini artırıcı olarak görev yapar. Stiren oluşumunu iyileştirmek için metil-benzenden stiren üretimi için baskın katalizöre seryum eklenir. Hem reaktörde katalitik reaktivite hem de rejeneratörde termal kararlılık sağlamak için zeolit içeren Akışkan Katalitik Kırma katalizörlerinde kullanılır. Çelik üretiminde, kararlı oksisülfitler oluşturarak ve kurşun ve antimon gibi istenmeyen eser elementleri bağlayarak serbest oksijen ve kükürdü uzaklaştırmak için kullanılır.

Praseodim	Praseodim katkılı zirkonyum parlak sarı pigment olarak seramik uygulamalarında, 560 nm'de optimum yansıma özelliği nedeniyle oldukça değerlidir. Florür fiberlerde katkı maddesi olarak kullanımı da dahil olmak üzere, telekomünikasyon sistemlerinin güçlendirilmesinde optik özellikleri üzerine birçok araştırma yapılmaktadır. Ayrıca tıbbi bilgisayarlı tomografi (BT) taramaları için sintilatörde de kullanılmaktadır.
Neodim	Başlıca uygulamaları arasında lazerler, cam renklendirme ve tonlama, dielektrikler ve en önemlisi neodim-demir-bor (Nd2Fe14B) kalıcı mıknatıslar yer almaktadır. Otomotiv endüstrisinde marş motorları, fren sistemleri, koltuk ayarlayıcıları ve araç stereo hoparlörleri de dahil olmak üzere birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. En büyük uygulama alanı ise bilgisayar disk sürücülerinde kullanılan ses bobini motorlarıdır. Neodim, insan gözünün maksimum hassasiyet seviyesine çok yakın olan 580 nm'de merkezlenmiş güçlü bir soğurma bandına sahiptir ve bu da onu kaynak gözlükleri için koruyucu lenslerde kullanışlı hale getirir. Ayrıca CRT ekranlarda kırmızı ve yeşil arasındaki kontrastı artırmak için de kullanılır. Cam üretiminde, cama verdiği çekici mor renk nedeniyle oldukça değerlidir. Neodimyum, dielektrik kaplamalar ve elektronik ekipmanlar için gerekli olan çok katmanlı kapasitörlerde kullanılan baryum titanatın birçok formülasyonunda yer alır. İtriyum-alüminyum-garnet (YAG) katı hal lazerleri, optimum emilim ve yayıcı dalga boylarına sahip olduğu için neodim kullanır. Nd bazlı YAG lazerler çeşitli tıbbi uygulamalarda, delme, kaynak ve malzeme işleme işlemlerinde kullanılır.
Samaryum	Samaryum öncelikle samaryum-kobalt (Sm2Co17) kalıcı mıknatısların üretiminde kullanılır. Ayrıca lazer uygulamalarında ve dielektrik özellikleri nedeniyle de kullanılır. Samaryum-kobalt mıknatıslar, 1970'lerin başlarında daha pahalı olan platin-kobalt mıknatısların yerini almıştır. Günümüzde daha ucuz neodim-demir-bor mıknatıslar tarafından gölgede kalmış olsa da, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme yetenekleri nedeniyle hala değerlidirler. Boyut veya alanın sınırlayıcı bir faktör olduğu ve yüksek sıcaklıkta işlevselliğin önemli olduğu hafif elektronik ekipmanlarda kullanılırlar. Uygulama alanları arasında elektronik saatler, havacılık ekipmanları, mikrodalga teknolojisi ve servo motorlar bulunur. Zayıf spektral soğurma bandı nedeniyle samaryum, Nd:YAG katı hal lazerlerinde lazer çubuğunu çevreleyen filtre camında, istenmeyen emisyonları emerek verimliliği artırmak için kullanılır. Samaryum, kaplamalar ve mikrodalga frekanslarında kapasitörler için uygun, kullanışlı dielektrik özelliklere sahip kararlı titanat bileşikleri oluşturur.
Evropiyum	Evropiyum, öncelikle eşsiz ışıldama davranışı nedeniyle kullanılır. Ultraviyole radyasyonun emilimiyle evropiyum atomunun uyarılması, atom içinde belirli enerji seviyesi geçişlerine neden olarak görünür radyasyon yayılımı yaratır. Enerji tasarruflu floresan aydınlatmada evropiyum, gerekli kırmızıyı değil, aynı zamanda maviyi de sağlar. Renkli televizyon, bilgisayar ekranları ve floresan lambalar için birçok ticari kırmızı fosfor evropiyum bazlıdır. Işıldama özelliği ayrıca tıbbi, cerrahi ve biyokimyasal uygulamalarda da değerlidir.
Gadolinyum	Hem yüksek manyetik momenti hem de fosfor ve sintilasyon malzemelerinde kullanılır. EDTA katkı maddeleriyle karıştırıldığında, manyetik rezonans görüntüleme (MRG) uygulanan hastalar için enjekte edilebilir kontrast madde olarak kullanılır. Yüksek manyetik momenti sayesinde gadolinyum, gevşeme sürelerini kısaltarak sinyal yoğunluğunu artırabilir. Düşük enerji seviyelerine sahip olmayan, özellikle kararlı yarı dolu 4f elektron kabuğu, inert bir fosfor ana maddesi olarak uygulamalar yaratır. Bu nedenle gadolinyum, X-ışını ve bilgisayarlı tomografi için sintilasyon malzemelerinde ana madde olarak kullanılabilir.

Terbiyum	Terbiyum öncelikle fosforlarda, özellikle floresan lambalarda ve projeksiyon televizyonlarında kullanılan yüksek yoğunluklu yeşil yayıcı olarak, örneğin itriyum-alüminyum-garnet (Tb:YAG) çeşidinde kullanılır. Terbiyum, X-ışını uyarımına verimli bir şekilde yanıt verir ve bu nedenle X-ışını fosforu olarak kullanılır. Terbiyum alaşımları ayrıca TbFeCo gibi manyeto-optik kayıt filmlerinde de kullanılır.
Disprosyum	Disprosyum en yaygın olarak neodim-demir-bor yüksek mukavemetli kalıcı mıknatıslarda kullanılır. Nadir toprak elementleri arasında en yüksek manyetik momentlerden birine sahip olmasına rağmen, bu durum neodim bileşimlerine pratik bir alternatif olarak tek başına performans gösterme yeteneğini sağlamamıştır. Bununla birlikte, artık NdFeB üretiminde önemli bir katkı maddesidir. Ayrıca BaTiO formülasyonlarına dayalı özel seramik bileşimlerinde de kullanılır.
Holmiyum	Holmiyum, doğal olarak bulunan elementler arasında en yüksek manyetik momente (10,6 μB) sahiptir. Bu nedenle, yüksek güçlü mıknatısların içine kutup parçası veya manyetik akı yoğunlaştırıcı olarak yerleştirilerek bilinen en yüksek manyetik alanları oluşturmak için kullanılmıştır. Bu manyetik özellik, mikrodalga ekipmanları için itriyum-demir-garnet (YIG) lazerlerinde de değerlidir. Holmiyum lazerleri, insan gözü için güvenli olan 2,08 mikron dalga boyunda olup, itriyum-alüminyum-garnet (YAG) ve itriyum-lantan-florür (YLF) katı hal lazerlerinde çeşitli tıbbi ve diş uygulamalarında kullanılmasını sağlar. Dalga boyu, daha kısa dalga boyları için tasarlanmış silika fiberlerde kullanımına olanak tanırken, daha uzun dalga boylu ekipmanların kesme gücünü de sağlar.
Erbiyum	Erbiyum, cam renklendirmede, fiber optikte yükseltici olarak ve tıbbi ve dişçilik amaçlı lazerlerde uygulama alanı bulmaktadır. Erbiyum iyonu, erbiyum tuzlarını pembe renge boyayan çok dar bir soğurma bandına sahiptir. Bu nedenle gözlük ve dekoratif cam eşyalarda kullanılır. Demir iyonları gibi renk bozucu safsızlıkları nötralize edebilir ve nötr gri bir ton üretebilir. Bu amaçla çeşitli cam ürünlerinde kullanılır. Özellikle fiber optik veri aktarımı için yükseltici olarak kullanışlıdır. Er:YAG tabanlı lazerler, dokuda termal birikim olmadan enerji iletebilme özelliği nedeniyle cerrahi uygulamalar için idealdir.
Tulyum	Tulyum ürünleri esas olarak kristal ve lazer yapımında kullanılır. Tıp alanında tulyumun önemli bir uygulaması ve yüksek maliyetinden nispeten bağımsız olarak, taşınabilir röntgen kaynaklarının üretimidir. Bu kaynaklar, tıbbi ve diş teşhisinde, ayrıca erişilemeyen mekanik ve elektronik bileşenlerdeki kusurları tespit etmek için yaklaşık bir yıl süreyle kullanılabilir. Bu tür kaynaklar aşırı korumaya ihtiyaç duymaz. Genellikle küçük bir kurşun kapak yeterlidir. Tulyum ayrıca, mikrodalga teknolojilerinde kullanılan itriyum-demir alaşımlarına benzer şekilde, manyetik ve seramik malzemelerde (ferrit) de kullanılabilir.
İterbiyum	İterbiyum, çok sayıda fiber amplifikatör ve fiber optik teknolojisinde ve çeşitli lazer uygulamalarında kullanılmaktadır. Kızılötesinde 985 nm'de tek bir baskın soğurma bandına sahip olması, silikon foto-hücrelerde enerjiyi doğrudan elektriğe dönüştürmede onu kullanışlı hale getirir. İterbiyum metali, çok yüksek gerilmelere maruz kaldığında elektriksel direncini artırır. Bu özellik, depremlerden ve nükleer patlamalardan kaynaklanan yer deformasyonlarını izlemek için kullanılan gerilim ölçerlerde kullanımına olanak sağlamaktadır. Ayrıca nikel, demir ve diğer geçiş metal alaşımlı alt tabakalarda termal bariyer sistem bağlayıcı kaplamaları olarak da kullanılır.

Lütesyum	Nadir toprak elementleri serisinin son üyesidir. Çoğu nadir toprak elementinin aksine manyetik momenti yoktur. Ayrıca, nadir toprak elementleri arasında en küçük metalik yarıçapa sahiptir. Belki de lantanitler arasında doğal olarak en az bulunanıdır. En yoğun bilinen beyaz madde olan lütesyum tantalat (LuTaO4) X-ışını fosforları için ideal bir ana elementtir. Manyetik momentinin olmaması nedeniyle, indiyum-galyum-garnet (IGG) kristalleri gibi bazı alt tabaka garnet kristallerinin kafes parametrelerini eşleştirmede katkı maddesi olarak kullanılır.
İtriyum	İtriyum, herhangi bir elementin oksijene olan en yüksek termodinamik yakınlığına sahiptir; bu özellik, birçok uygulamasının temelini oluşturur. İtriyumun bazı uygulamaları arasında, erimiş reaktif metaller için pota olarak seramiklerde, floresan aydınlatma fosforlarında, bilgisayar ekranlarında ve otomotiv yakıt tüketim sensörlerinde kullanımı yer alır. İtriyumla stabilize edilmiş zirkonyum oksit, yüksek sıcaklık uygulamalarında, örneğin yüksek sıcaklıklarda havacılık bileşen yüzeylerini korumak için termal plazma püskürtmelerinde kullanılır. İtriyum-demir-garnet (YIG) çeşidi kristaller, mikrodalga iletişim ekipmanları için gereklidir. Eu:Y2O2S fosforu, televizyonlarda kırmızı rengi oluşturur. İtriyum-alüminyum-garnet (YAG) türü kristaller, bir dizi lazer uygulamasında neodim ile birlikte kullanılır. İtriyum ayrıca metal alaşımlarının mukavemetini de arttırır.
Skandiyum	Skandiyum ürünleri başlıca seramiklerde, lazerlerde, fosforlarda ve bazı yüksek performanslı alaşımlarda kullanılmaktadır.

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 hammaddeyi içeren bu listenin oluşturulmasında tedarik riski (TR) ve ekonomik değer (ED) kavramları üzerinden bir değerlendirme yapılmış ve Şekil 2'de verilen grafik oluşturulmuştur. Bir hammaddenin kritik olması için gerekli olan şartlar TR≥1 ve ED≥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. [3, 4].



Şekil 2. *AB tarafından 2023 yılında yayınlanan kritik hammaddeler için ekonomik değer – tedarik riski grafiği [3, 4].*

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, araştırma-geliştirme önceliklerinin belirlenmesinde ve politika kararlarının alınmasında önemli rol oynayacağı ifade edilmiştir. Özellikle, nadir toprak elementleri (NTE), elektrikli araç motorları ve rüzgar 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 [4, 5].

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 [5, 6].

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 [5, 7].

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 güvenlik 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 [8].

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 [8].

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 arttırılması, 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 özelde 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.

KAYNAKÇA

1. *Krishnamurthy, N., & Gupta, C.K. (2015). Extractive Metallurgy of Rare Earths (2nd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b19055*
2. *Gordon B. Haxel, James B. Hedrick, and Greta J. Orris, Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology, U.S. Geological Survey Fact Sheet 087-02, https://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/, 2002.*
3. *Milan. Grohol and Constanze. Veeh, Study on the critical raw materials for the EU 2023 : final report. Publications Office of the European Union, 2023.*
4. *Kaplan, Ş. S., Bastnazit Kompleks Cevherinden Nd, Ce, La Elementlerinin Solvometalurjik Yöntemle Ekstraksiyonu, Doktora Tezi, İTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2025.*
5. *U.S. Department of Energy, Critical Materials Assessment, https://www.energy.gov/cmm/critical-minerals-materials-program, 2023.*
6. *Natural Resources, C., The Canadian critical minerals strategy, from exploration to recycling : powering the green and digital economy for Canada and the world. Natural Resources Canada raporu, 2022.*
7. *Cernicky, J., Peter, T., Moncayo, R. G., Ishigami, Y., & Hosoi, H., EU-Japan Critical Raw Materials Alliance. Berlin: Nakasone Peace Institute Raporu, 2024.*
8. *https://www.ey.com/content/dam/ey-unified-site/ey-com/en-pl/campaigns/documents/ey-rare-earths-elements-study-2025.pdf*

ÜLKELERİN NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ STRATEJİLERİ VE BAZI PROJELER

Doç. Dr. Burak BİROL
Yıldız Teknik Üniversitesi

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. GİRİŞ

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 [1,2].

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 yönelik talebin önümüzdeki on yıllarda keskin biçimde artmasına yol açmaktadır. Uluslararası kuruluşlar, bu talebin 2040 yılına kadar mevcut seviyelerin birkaç katına ulaşabileceğini öngörmektedir [3].

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 kırılganlıklar yaratmaktadır [4,5]. 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. ÖNEMLİ ÜRETİCİ VE REZERV SAHİBİ 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 mıknatıs 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 işlenmek 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 fosfojips (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 [6].

3. ÜLKELERİN NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ POLİTİKASI

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 [7].

2024–2025 döneminde Çin, küresel NTE madenciliğinin %60–61'ini, rafinasyon ve ayrıştırma kapasitesinin ise %90'dan fazlasını kontrol etmektedir [8,9]. 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 [9,10]. 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 [9].

2025 yılında Çin bu stratejisini bir adım ileri taşıyarak, Nisan ve Ekim aylarında iki büyük ihracat kontrol dalgası başlatmıştır [9,11,12]. 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 [12]. 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 [9,13].

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 [14].

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 [15].

ABD politikası, ikili ve çok taraflı ortaklıklarla desteklenmektedir. Avustralya ve Japonya ile yapılan anlaşmalar [16], 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 [17] ve Tayland [18] 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 mıknatıs üretim tesisleri, bu müttefik temelli yaklaşımın türev ürün boyutunu güçlendirmektedir [19].

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 [20]. Ayrıca 30 Nisan 2025'te imzalanan ABD-Ukrayna Mineral Anlaşması ile Ukrayna'nın zengin rezervlerine erişim sağlanarak Çin bağımlılığına alternatif bir hat oluşturulmuştur [21]. 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 mıknatıslar, 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 konumlandırdığını göstermektedir [22].

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 [23].

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 [23].

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 dönüştürmüş; "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 [24–26].

3.5. Avustralya'nın NTE Stratejisi

Avustralya'nın "2023–2030 Kritik Mineraller Stratejisi", ülkeyi küresel enerji geçişinde sadece bir hammadde tedarikçisi olmaktan çıkarıp, işlenmiş minerallerde 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 yönetişim (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 [27].

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 standartlarınınyerleştirilmesi,şeffafveripaylaşımı, 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 [27].

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 mineralden 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 getirmektir. Bu kapsamda NTE'ler; özellikle elektrikli araç motorları, rüzgâr türbinleri ve savunma teknolojileri için kritik olan kalıcı mıknatısların 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 [28]. 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 Kredisi" (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 [28].

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 [29,30]. Hindistan'ın stratejisi, enerji geçişi ve savunma sanayii ihtiyaçlarını güvence altına almak için hem yerli üretimi ve geri dönüşümü artırmayı hem de KABIL gibi kamu iştirakleri aracılığıyla Arjantin ve Avustralya gibi ülkelerde denizaşırı varlıklar edinmeyi içermektedir [30]. 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 (Tamhae 3 araştırma gemisi gibi) yatırım yapmayı, stratejik stoklama tesisleri kurmayı ve batarya gibi yeşil teknolojilerde Ar-Ge liderliğini sürdürmeyi hedeflemektedir [31–33].

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 [34]. 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 [35,36].

3.8. Türkiye'nin NTE Stratejisi

Türkiye'nin NTE stratejisi, ham madde ihracatına dayalı geleneksel modelden vazgeçerek rafinasyon, metalurji ve mıknatıs 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 [37]. 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 [38].

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 [39]. Somut bir performans göstergesi olarak, 2028 yılına kadar NTE teknolojileri ile ilgili proseslerin gerçekleştirme oranının %80 seviyesine çıkarılması planlanmaktadır [40].

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 [39,40].

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. Bu çerçevede oluşturulan gelişim perspektifi Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. *NATEN strateji dokümanına dayalı olarak hazırlanan TENMAK'ın 20 yıllık gelişim perspektifi ve beş yıllık dönemlere göre stratejik öncelikleri [39].*

Dönem	Stratejik Öncelikler	Temel Faaliyet Alanları
1. Beş Yıl (2024–2028)	Yerelleştirme, Ar-Ge altyapısı geliştirme, ulusal kapasite artırma	• Teknoloji transferi ve Ar-Ge odaklı yerelleştirme çalışmaları • TAEK, NATEN ve BOREN kurumlarının altyapı ve insan kaynağını kullanarak ortak projeler geliştirme • Sürdürülebilir ve izlenebilir uzun vadeli planlar oluşturma • Ulusal Ar-Ge altyapısı ve insan kaynağını geliştirme • Büyük ölçekli öncü projelerin başlatılması • Uluslararası iş birlikleri ve ikili anlaşmalar ile Ar-Ge faaliyetlerine katılım • Ulusal inovasyon ekosistemi ve değer zinciri oluşturma • Nükleer enerji, ileri reaktörler ve yakıt çevrimi alanlarında fizibilite ve tasarım çalışmaları • İyonlaştırıcı radyasyon, hızlandırıcı teknolojileri ve tıbbi radyoizotop üretimi alanlarında bilim politikaları oluşturma • Nadir toprak elementleri üretim teknolojileri geliştirme • Temiz enerji teknolojileri geliştirme ve yerelleştirme • Karbondioksit yakalama, kullanma ve depolama (KYKD) ile hidrojen teknolojileri üzerine Ar-Ge • Yenilenebilir enerji ekipmanlarının yerelleştirilmesi • Nitelikli insan kaynağı yetiştirme programları • Ar-Ge sonuçlarının ticarileştirilmesi

2. Beş Yıl (2029–2033)	Bilgi transferi, prototip geliştirme, değer zinciri oluşturma	• Uluslararası iş birlikleri ile bilgi ve insan kaynağı transferi • Kamu ve özel sektör arasında iş birliği ve rekabeti teşvik eden inovasyon ortamı oluşturma • Nükleer enerji ve araştırma reaktörleri alanında prototip ve ürün geliştirme • Bor, nadir toprak elementleri ve kritik minerallerden yüksek katma değerli ürün üretimi • Bilgi-tecrübe-teknoloji-ürün-ticaret şeklinde ulusal değer zinciri oluşturma • Ar-Ge çıktılarının sanayi üretimine aktarılması
3. Beş Yıl (2034–2038)	Öncü Ar-Ge, entegre araştırma yapıları, uluslararası etkinlik	• Alanında yönlendirici öncü Ar-Ge çalışmaları yürütme • Rekabetçi iş modelleri geliştirme • Kamu-özel sektör-üniversite iş birliği ile entegre Ar-Ge yapıları oluşturma • Nükleer enerji ve araştırma reaktörlerinde prototip ve ürün geliştirme • Uluslararası platformlarda aktif rol alma • Disiplinler arası Ar-Ge ve paydaş yönetimini genişletme • Nadir toprak elementlerinde dışa bağımlılığı azaltma
4. Beş Yıl (2039–2043)	Küresel rekabet, teknoloji ihracatı, uluslararası liderlik	• Küresel rekabet gücüne dayalı oyun kurucu çalışmalar • Lider ülkelerle teknoloji yarışına girme • Türkiye merkezli uluslararası bilim ve teknoloji ağları kurma • Küresel pazarlara teknoloji, ürün ve danışmanlık ihracı • Uluslararası araştırmacıları çeken bir merkez haline gelme • Nadir toprak elementleri teknolojilerinde rekabetçi seviyeye ulaşma • Türkiye'nin bor rezervlerini stratejik avantaja dönüştürme

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 [41]. Bu kapsamda TENMAK (NATEN) ve TÜBİTAK MAM üzerinden yerli ayrıştırma prosesleri geliştirilmekte, özellikle toryumun güvenli bir şekilde ayrıştırılması için nükleer standartlarda tesisleşme yürütülmektedir [8].

4. BAZI GLOBAL NTE PROJELERİ

Küresel ölçekte artan nadir toprak elementleri talebi, birçok ülkede yeni madencilik, rafinasyon ve ileri malzeme üretim projelerinin geliştirilmesini hızlandırmıştır. Bu projeler yalnızca yeni rezervlerin ekonomiye kazandırılmasını değil, aynı zamanda madencilikten ayrıştırma ve mıknatıs üretimine kadar uzanan değer zincirinin farklı aşamalarında kapasite oluşturmayı hedeflemektedir.

4.1. Avustralya Projeleri

Mount Weld Madeni (Lynas Rare Earths): Batı Avustralya'da bulunan bu maden, dünyanın bilinen en zengin nadir toprak yataklarından biri olarak kabul edilmektedir. Madenden çıkarılan cevherler, önce tesis bünyesindeki konsantrasyon tesisinde işlenmekte, ardından nihai ayrıştırma için Malezya'daki tesise gönderilmektedir. Maden, özellikle Neodimyum ve Praseodimyum (NdPr) açısından yüksek tenörlü bir yapıya sahiptir [42].

Kalgoorlie İşleme Tesisi (Lynas Rare Earths): Lynas'ın "2025 büyüme stratejisi" kapsamında Batı Avustralya'da kurduğu bu tesis, Mount Weld'den gelen nadir toprak konsantrelerini işlemek üzere tasarlanmıştır. Tesiste kırma ve liç (cracking and leaching) işlemleri yapılarak, ihraç edilmek üzere nadir toprak karbonatı üretilmektedir. Bu yatırım, Malezya üzerindeki işleme yükünü ve atık yönetim baskısını azaltmayı hedeflemektedir [43].

Nolans Projesi (Arafura Rare Earths): Kuzey Bölgesi'nde Alice Springs'in 135 km kuzeyinde yer alan bu entegre proje; maden, zenginleştirme, ekstraksiyon ve ayrıştırma tesislerini tek bir sahada toplamaktadır. Projenin, küresel NdPr oksit talebinin yaklaşık %5 ila %10'unu karşılaması hedeflenmektedir. Avustralya hükümeti tarafından stratejik önemi nedeniyle "Major Project Status" (Büyük Proje Statüsü) ile desteklenmektedir [44] .

Browns Range ve Koppamurra: Northern Minerals tarafından geliştirilen Browns Range projesi, özellikle ağır nadir toprak elementleri (HREE) üzerine yoğunlaşmış bir projedir. Australian Rare Earths şirketine ait Koppamurra projesi ise iyon-adsorpsiyon kili tipi bir yatak olarak listelenmekte ve keşif/geliştirme aşamasında yer almaktadır [45].

4.2. Amerika Birleşik Devletleri Projeleri

Mountain Pass (MP Materials): Kaliforniya'daki bu maden, Kuzey Amerika'daki tek aktif ve büyük ölçekli nadir toprak madenciliği ve işleme sahasıdır. Maden, küresel tüketimin yaklaşık %15'ini karşılamakta ve şu anda hafif nadir toprak elementleri (NdPr) üzerine odaklanmaktadır [46]. Şirket, tesise ağır nadir toprak ayrıştırma kabiliyetleri eklemek için ABD Savunma Bakanlığı (DoD) ile ortaklık kurmuştur [47].

Independence ve 10X Magnet Tesisleri (MP Materials): Teksas, Fort Worth'ta bulunan "Independence" tesisi, nadir toprak oksitlerini metal, alaşım ve NdFeB mıknatıslara dönüştüren tam entegre bir üretim merkezidir. General Motors (GM) ile uzun vadeli bir tedarik anlaşması olan bu tesisin yanı sıra, DoD desteğiyle yıllık 10.000 metrik ton kapasiteye ulaşması planlanan "10X" adlı ikinci bir büyük mıknatıs fabrikasının inşası duyurulmuştur [48,49].

Indiana Rafineri Tesisleri (ReElement Technologies): ReElement, Indiana'nın Noblesville ve Marion şehirlerinde kromatografik ayrıştırma teknolojisi kullanan rafineriler işletmektedir. Marion tesisi, yıllık 10.000 tonun üzerinde rafine çıktı hedefleyen büyük bir endüstriyel kampüs olarak tasarlanmıştır. Bu teknoloji, hem maden cevherlerini hem de geri dönüştürülmüş mıknatıs atıklarını işleyebilme özelliğine sahiptir [50].

USA Rare Earth Projeleri (Stillwater ve Round Top): Şirket, Oklahoma Stillwater'daki "Innovation Lab" bünyesinde yenilenmiş ekipmanlarla bir NdFeB mıknatıs pilot tesisi kurmuştur. Kaynak tarafında ise Teksas'ta bulunan Round Top yatağı, yüksek miktarda ağır nadir toprak elementi içermesiyle stratejik bir ham madde kaynağı olarak geliştirilmektedir [51].

4.3. Çin ve Myanmar Projeleri

Bayan Obo Madeni (Çin): İç Moğolistan'da bulunan bu maden, dünyanın en büyük nadir toprak üretim tesisi olup küresel rezervlerin yaklaşık %40'ını kontrol etmektedir. Devlet kontrolündeki China Northern Rare Earth Group tarafından işletilen maden, Çin'in bu sektördeki küresel hakimiyetinin temel taşıdır. Ancak madencilik faaliyetleri bölgede ciddi çevresel kirlilik ve sağlık sorunlarına yol açmaktadır [52].

Güney Çin ve Kachin Clays (Myanmar): China Southern Rare Earth Group, Güney Çin'deki iyon-adsorpsiyon killerinden ağır nadir toprak elementleri üretmektedir. Myanmar'daki Kachin bölgesi ise kayıt dışı ve çevre standartlarının düşük olduğu "Kachin Clays" yatakları üzerinden, Çin'in ağır nadir toprak ihtiyacının büyük bir kısmını (yaklaşık %50) karşılamaktadır [3].

4.4. Güney Afrika ve Avrupa Projeleri

Steenkampskraal (Güney Afrika): Dünyanın en yüksek tenörlü yataklarından biri olarak kabul edilen bu monazit madeni, ortalama %14,5 nadir toprak oksit (TREO) oranına sahiptir. Proje, sadece maden çıkarmayı değil, ayrıştırma, metalizasyon ve mıknatıs üretimine kadar uzanan altı aşamalı bir dikey entegrasyon planını hayata geçirmeyi hedeflemektedir [53].

La Rochelle Tesisi (Fransa): Solvay tarafından işletilen bu tesis, Avrupa'daki iki büyük işleme merkezinden biri olup 17 nadir toprak elementinin tamamını ayrıştırabilen Çin dışındaki tek tesistir. Tesis, son dönemde elektrikli araçlar ve savunma sanayii için mıknatıs malzemeleri üretimine odaklanacak şekilde genişletilmiştir [54].

Estonya Mıknatıs Fabrikası: Neo Performance Materials, Estonya'da yıllık 2.000 ton kapasiteli bir NdFeB mıknatıs bloğu tesisi inşa etmektedir. Bu proje, Avrupa Birliği'nin nadir toprak tedarik zincirinde dışa bağımlılığını azaltma stratejisinin (CRMA) önemli bir parçasıdır [51].

4.5. Diğer Bölgelerdeki Projeler

Maaden JV (Suudi Arabistan): Suudi Arabistan'ın ulusal madencilik şirketi Maaden ve MP Materials, ABD Savunma Bakanlığı desteğiyle krallıkta bir nadir toprak rafinerisi kurmak için ortaklık imzalamıştır. Bu tesisin, Suudi Arabistan'ın ve çevre bölgelerin ham maddelerini işleyerek müttefik ülkelere oksit tedarik etmesi planlanmaktadır [55].

Kvanefjeld (Grönland): Energy Transition Minerals tarafından Grönland'ın güneyinde geliştirilen bu devasa proje, maden, konsantrasyon tesisi ve rafineriden oluşmaktadır. Ancak projenin radyoaktif yan ürünler (uranyum vb.) içermesi nedeniyle Grönland ve Danimarka hükümetleri ile hukuki süreçler devam etmektedir [56].

Hindistan Projeleri: Toyota Tsusho'nun Andhra Pradesh'teki rafineri tesisi (Toyotsu Rare Earths India), Hindistan'ın nadir toprak oksitlerini işleyerek Japonya'ya ihraç eden kritik bir düğüm noktasıdır [57]. Hindistan hükümeti ayrıca yerli mıknatıs üretimini desteklemek için 788 milyon dolarlık bir teşvik programı duyurmuştur [58].

4.6. Yenilikçi Projeler ve Teknolojik Atılımlar

Geleneksel NTE işleme yöntemleri (solvent ekstraksiyonu) yüksek enerji tüketimi ve radyoaktif atık gibi çevresel maliyetlere sahiptir. Bu darboğazı aşmaya yönelik yenilikçi projeler geliştirilmektedir:

Membranlı Solvent Ekstraksiyonu (MSX): Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirilen bu yöntem, gözenekli lifler kullanarak %99,5 saflıkta oksit elde etmeyi ve enerji kullanımını minimize etmeyi hedeflemektedir[59].

Sürekli İyon Değişimi (CIX): K Technologies ve Rainbow Rare Earths ortaklığında yürütülen bu proje, toksik organik solventleri tamamen ortadan kaldırarak mıknatıs metallerini daha temiz ayrıştırmayı başarmıştır [60].

Mıknatıstan Mıknatısa Geri Dönüşüm: HyProMag (İngiltere) ve Noveon Magnetics (ABD) projeleri, atık mıknatısları doğrudan yeni ürünlere dönüştürerek madenciliğe kıyasla %90-95 enerji tasarrufu sağlamaktadır [61,62].

Biyo-madencilik: Lawrence Livermore National Laboratuvarı (LLNL)'nın çalışmalarıyla, bakteriler aracılığıyla düşük tenörlü atıklardan metal kazanımı üzerine çalışmalar hız kazanmıştır[63].

5. 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 mıknatıs 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.

Referanslar

[1] V. Balaram, Sources and applications of rare earth elements, in: Arindam Sinharoy, Piet N.L. Lens (Eds.), Environmental Technologies to Treat Rare Earth Element Pollution: Principles and Engineering, IWA Publishing, 2022: pp. 75–114. https://doi.org/10.2166/9781789062236_0075.

[2] S.-L. Liu, H.-R. Fan, X. Liu, J. Meng, A.R. Butcher, L. Yann, K.-F. Yang, X.-C. Li, Global rare earth elements projects: New developments and supply chains, Ore Geol. Rev. 157 (2023) 105428. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105428.

[3] International Energy Agency, Global Critical Minerals Outlook 2024, 2024. https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024 (accessed January 3, 2026).

[4] H. Diao, H. Yang, T. Tan, G. Ren, M. You, L. Wu, M. Yang, Y. Bai, S. Xia, S. Song, M. Quintana, L. Liu, Q. Xue, Navigating the rare earth elements landscape: Challenges, innovations, and sustainability, Miner. Eng. 216 (2024) 108889. https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2024.108889.

[5] I.M.S.K. Ilankoon, N.P. Dushyantha, N. Mancheri, P.M. Edirisinghe, S.J. Neethling, N.P. Ratnayake, L.P.S. Rohitha, D.M.D.O.K. Dissanayake, H.M.R. Premasiri, A.M.K.B. Abeysinghe, P.G.R. Dharmaratne, N.M. Batapola, Constraints to rare earth elements supply diversification: Evidence from an industry survey, J. Clean. Prod. 331 (2022) 129932. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129932.

[6] US Geological Survey, Mineral commodity summaries 2025, 2025. https://doi.org/10.3133/mcs2025.

[7] G. Hearty, M. Alam, Rare Earths: Next Element in the Trade War?, Center for Strategic and International Studies (CSIS) (2019). https://www.csis.org/analysis/rare-earths-next-element-trade-war (accessed January 4, 2026).

[8] Milli İstihbarat Akademisi, Nadir Toprak Elementleri ve Türkiye: Jeopolitik Satrançta Yeni Dinamikler ve Aktörler, Ankara, Türkiye, 2025. https://mia.edu.tr/uploads/f/30052025_1.pdf (accessed January 4, 2026).

[9] M. Szczepański, China's rare-earth export restrictions, 2025. https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_ATA(2025)779220 (accessed January 4, 2026).

[10] Sanayi ve Bilgi Teknolojileri Bakanlığı, Nadir Toprak Elementleri Yönetimi Yönetmelikleri (Çince), Sanayi Politikası ve Düzenlemeleri Dairesi, Çin Halk Cumhuriyeti, 2024. https://www.miit.gov.cn/jgsj/zfs/xzfg/art/2024/art_6f9ea672b96948488df5f9c46e5cffdd.html (accessed January 4, 2026).

[11] Ticaret Bakanlığı ve Gümrük Genel Müdürlüğü, Bazı Orta ve Ağır Nadir Toprak Elementleri ile İlgili Ürünlere İhracat Kontrolü Uygulaması (Çince), Güvenlik ve Kontrol Bürosu, Çin Halk Cumhuriyeti, 2025. https://www.mofcom.gov.cn/zwgk/zcfb/art/2025/art_6ae1a6de386e4336837575c9bd87417a. html (accessed January 4, 2026).

[12] Ticaret Bakanlığı, Yurtdışından İthal Edilen Nadir Toprak Elementlerine İhracat Kontrolü Uygulaması (Çince), Güvenlik ve Kontrol Bürosu, Çin Halk Cumhuriyeti, 2025. https://www.mofcom.gov.cn/zwgk/zcfb/art/2025/art_7fc9bff0fb4546ecb02f66ee77d0e5f6.ht ml (accessed January 4, 2026).

[13] Ticaret Bakanlığı ve Gümrük Genel Müdürlüğü, ...2025 Tarihli ve 61 ve 62 Numaralı Duyuruların Uygulanmasının Askıya Alınması (Çince), Güvenlik ve Kontrol Bürosu, Çin Halk Cumhuriyeti, 2025. https://www.mofcom.gov.cn/zwgk/zcfb/art/2025/art_b1ec77dd3f0d4762952904df7cdaadec. html (accessed January 4, 2026).

[14] The White House, Ensuring National Security and Economic Resilience Through Section 232 Actions on Processed Critical Minerals and Derivative Products – The White House, Executive Orders, ABD, 2025. https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/04/ensuring-national-security-and-economic-resilience-through-section-232-actions-on-processed-critical-minerals-and-derivative-products/ (accessed January 4, 2026).

[15] The White House, Unleashing America's Offshore Critical Minerals and Resources – The White House, Executive Orders, ABD, 2025. https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/04/unleashing-americas-offshore-critical-minerals-and-resources/ (accessed January 4, 2026).

[16] The White House, United States - Japan Framework for Securing the Supply of Critical Minerals and Rare Earths through Mining and Processing – The White House, Briefings & Statements, Japonya, 2025. https://www.whitehouse.gov/briefings-statements/2025/10/united-states-japan-framework-for-securing-the-supply-of-critical-minerals-and-rare-earths-through-mining-and-processing/ (accessed January 4, 2026).

[17] The White House, Memorandum of Understanding Between the Government of the United States of America and the Government of Malaysia Concerning Cooperation to Diversify Global Critical Minerals Supply Chains and Promote Investments – The White House, Briefings & Statements, Malezya, 2025. https://www.whitehouse.gov/briefings-statements/2025/10/memorandum-of-understanding-between-the-government-of-the-united-states-of-america-and-the-government-of-malaysia-concerning-cooperation-to-diversify-global-critical-minerals-supply-chains-and-promote/ (accessed January 4, 2026).

[18] The White House, Memorandum of Understanding Between the Government of the United States of America and the Government of the Kingdom of Thailand Concerning Cooperation to Diversify Global Critical Minerals Supply Chains and Promote Investments – The White House, Briefings & Statements, Malezya, 2025. https://www.whitehouse.

gov/briefings-statements/2025/10/memorandum-of-understanding-between-the-government-of-the-united-states-of-america-and-the-government-of-the-kingdom-of-thailand-concerning-cooperation-to-diversify-global-critical-minerals-supply-cha/ (accessed January 4, 2026).

[19] The White House, Fact Sheet: President Donald J. Trump Brings Home More Billion Dollar Deals During State Visit to the Republic of Korea – The White House, Fact Sheets, ABD, 2025. https://www.whitehouse.gov/fact-sheets/2025/10/fact-sheet-president-donald-j-trump-brings-home-more-billion-dollar-deals-during-state-visit-to-the-republic-of-korea/ (accessed January 4, 2026).

[20] The White House, Week 14 Wins: President Trump Drives Economic Growth and Strengthens National Security –, Articles (2025). https://www.whitehouse.gov/articles/2025/04/week-14-wins-president-trump-drives-economic-growth-and-strengthens-national-security/ (accessed January 4, 2026).

[21] G. Baskaran, M. Schwartz, What to Know About the Signed U.S.-Ukraine Minerals Deal, Center for Strategic and International Studies (CSIS), EU (2025). https://www.csis.org/analysis/what-know-about-signed-us-ukraine-minerals-deal (accessed January 4, 2026).

[22] European Parliament and Council of the European Union, Regulation (EU) 2024/1252 of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials, Official Journal of the European Union, Belçika, 2024. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252 (accessed January 4, 2026).

[23] I. Directorate-General for Internal Market, RESourceEU Action Plan accelerating our CRM strategy to adapt to a new reality - Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, 2025. https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/resourceeu-action-plan-accelerating-our-crm-strategy-adapt-new-reality_en#files (accessed January 4, 2026).

[24] M.H. Lee, Japan rolls the dice but China holds the cards in rare earth strategy, (2025). https://doi.org/10.59425/eabc.1754172000.

[25] Muflih Hidayat, Japan Heavy Rare Earth Supply Chain Independence 2025, Discovery Alert (2025). https://discoveryalert.com.au/japan-heavy-rare-earth-supply-chain-2025/ (accessed January 4, 2026).

[26] L. Depraiter, S. Goutte, T. Porcher, Geopolitical risk and the global supply of rare earth permanent magnets: Insights from China's export trends, Energy Econ. 146 (2025) 108496. https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2025.108496.

[27] Critical Minerals Office, Critical Minerals Strategy 2023–2030, Australian Department of Industry, Science and Resources, Avusturalya, 2023.

[28] The Canadian critical minerals strategy, from exploration to recycling : powering the green and digital economy for Canada and the world, [Natural Resources Canada], 2022.

[29] Indian Ministry of Mines, National Critical Mineral Mission, 2025.

[30] S. Kumar, S. Meena, A. Patiyal, National Critical Mineral Mission Powering India's Clean Energy Future, 2025. https://pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2118380 (accessed January 5, 2026).

[31] Güney Kore Ticaret Sanayi ve Enerji Bakanlığı, The strategy for securing reliable critical minerals supply – Policies - IEA, (2025). https://www.iea.org/policies/17942-the-strategy-for-securing-reliable-critical-minerals-supply (accessed January 5, 2026).

[32] R. Deberdt, H. Park, Securing critical minerals supplies in the context of a mineral-poor country: reviewing South Korea's domestic and international engagement, Mineral Economics 2025 (2025) 1–17. https://doi.org/10.1007/S13563-025-00563-1.

[33] P.M. de Macedo, N. Berghmans, C.

Kauffmann, P. Lévy, New industrial policies: lessons for the EU and the Clean Industrial Deal -Case Study : New Industrial Policy in the Republic of Korea, DDRI (2025).

[34] Brazilian Mining Institute, For A Critical and Strategic Minerals Policy for Brazil and The Future: Fundamentals and Guidelines, 2024. https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/11/IBRAM_Politica-MCE_Fundamentos-e-diretrizes_ING.pdf (accessed January 5, 2026).

[35] African Development Bank Group, African Natural Resources Management and Investment Centre, Key Highlights of the Africa Green Minerals Strategy, 2025.

[36] African Minerals Development Centre, African Union's Mineral Resources Strategy for The Just Transition and Decarbonising Future, 2024.

[37] T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı-Sanayi Genel Müdürlüğü-Sektörel Raporlar, Nadir Toprak Elementleri Raporu, Ankara, 2020. https://www.sanayi.gov.tr/assets/pdf/plan-program/NadirToprakElementleriSektorRaporu.pdf (accessed December 12, 2025).

[38] U. Shokri, Can Turkey Become a Rare Earth Element Power? - Middle East Forum, Middle East Forum Observer (2025). https://www.meforum.org/mef-observer/can-turkey-become-a-rare-earth-element-power (accessed January 5, 2026).

[39] Türkiye Enerji Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu, 2024–2028 Stratejik Planı, Ankara, Türkiye, 2024. https://tenmak.gov.tr (accessed December 15, 2025).

[40] Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2024–2028 Stratejik Planı, Ankara, Türkiye, 2024. https://www.etimaden.gov.tr (accessed December 15, 2025).

[41] A Rare Earth Mirage-or a Strategic Pivot? Türkiye's 2026 Energy Push Under the Investor Microscope, (2025). https://rareearthexchanges.com/news/a-rare-earth-mirage-or-a-strategic-pivot-turkiyes-2026-energy-push-under-the-investor-microscope/#re-ex-takeaway (accessed January 2, 2026).

[42] Lynas Rare Earths, Mt Weld, Western Australia, (2025). https://lynasrareearths.com/mt-weld-western-australia-2/ (accessed January 2, 2026).

[43] Lynas Rare Earths, Kalgoorlie, Western AustraliaRare Earths Processing Facility, (2025). https://lynasrareearths.com/kalgoorlie-western-australia/ (accessed January 3, 2026).

[44] Nolans - Arafura, (2023). https://www.arultd.com/projects/nolans/ (accessed January 9, 2026).

[45] Association of Mining and Exploration Companies, Design Paper for Australia's Critical Minerals Strategic Reserve, 2025.

[46] MP Materials | Rare Earth Materials & Magnetics Producer, (2025). https://mpmaterials.com/ (accessed January 9, 2026).

[47] America's Rare Earth Treasure Trove: Can MP Materials Make Heavy Rare Earths by Next Year? Promising Signals, (2025). https://rareearthexchanges.com/news/americas-rare-earth-treasure-trove-can-mp-materials-make-heavy-rare-earths-by-next-year-promising-signals/ (accessed January 9, 2026).

[48] Independence | MP Materials, (2025). https://mpmaterials.com/independence (accessed January 9, 2026).

[49] MP Materials Announces Transformational Public-Private Partnership with the Department of Defense to Accelerate U.S. Rare Earth Magnet Independence | MP Materials, (2025). https://mpmaterials.com/news/mp-materials-announces-transformational-public-private-partnership-with-the-department-of-defense-to-accelerate-u-s-rare-earth-magnet-independence/ (accessed January 9, 2026).

[50] ReElement Technologies, (2025). https://www.reelementtech.com/ (accessed January 9, 2026).

[51] From Mine to Magnet: Where Investors

Face the Real Rare Earth Bottleneck, (2025). https://rareearthexchanges.com/news/from-mine-to-magnet-where-investors-face-the-real-rare-earth-bottleneck/ (accessed January 9, 2026).

[52] Bayan Obo Mine: The Unseen Power Behind Global Technology-and Its Heavy Cost, (2025). https://rareearthexchanges.com/news/bayan-obo-mine-the-unseen-power-behind-global-technology-and-its-heavy-cost/ (accessed January 9, 2026).

[53] About The Mine | Steenkampskraal Rare Earths Mine, (2025). https://www.steenkampskraal.com/the-mine-overview/ (accessed March 10, 2026).

[54] Solvay advances European rare earths production | Solvay La Rochelle, (2025). https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-advances-european-rare-earths-production-through-capacity-expansion (accessed January 9, 2026).

[55] Saudi Arabian Mining Company (Maaden) - Leading Mining & Metals Company, (2025). https://www.maaden.com/news-insights/latest-news/maaden-furthers-commitment-with-mp-materials-to-establish-rare-earth-refinery-joint-venture-in-the-kingdom (accessed January 9, 2026).

[56] Kvanefjeld Project • Energy Transition Minerals, (2025). https://etransmin.com/kvanefjeld-project/ (accessed January 9, 2026).

[57] Securing the Transition: Unlocking India–Japan Collaboration on Critical Minerals - ORF Middle East, (2025). https://orfme.org/research/securing-the-transition-unlocking-india-japan- collaboration-on-critical-minerals/ (accessed January 9, 2026).

[58] India rare earth magnet incentive programme set to triple to $788m, (2025). https://www.mining-technology.com/news/india-rare-earth-incentive-programme/ (accessed January 9, 2026).

[59] Revolutionizing resource renewal: Scaling up sustainable recycling for critical materials, (2025). https://www.ornl.gov/news/revolutionizing-resource-renewal-scaling-sustainable-recycling-critical-materials (accessed January 9, 2026).

[60] Rainbow Rare Earths starts rare earth oxide separation in US, (2025). https://www.mining-technology.com/news/rare-earth-oxide-separation-in-us/ (accessed January 9, 2026).

[61] RaRE Project - HyProMag, (2025). https://hypromag.com/rare-project/ (accessed January 9, 2026).

[62] Our Process — Noveon Magnetics, (2025). https://noveon.co/our-process (accessed January 9, 2026).

[63] D.M. Park, A. Brewer, D.W. Reed, L.N. Lammers, Y. Jiao, Recovery of Rare Earth Elements from Low-Grade Feedstock Leachates Using Engineered Bacteria, Environ. Sci. Technol. 51 (2017) 13471–13480. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02414.

CEVHERDEN UÇ ÜRÜNE: NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ ÜRETİMİNDE METALURJİK SÜREÇLER

Dr. Ş. Samet Kaplan
Hitit Üniversitesi

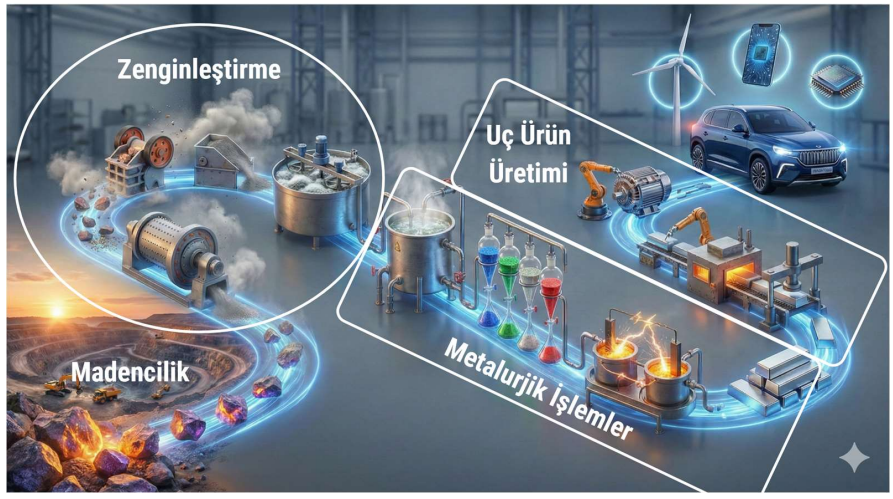
Günlük hayatımızın merkezinde yer alan akıllı cihazlardan, rüzgar türbini gibi yenilenebilir enerji teknolojilerine ve savunma sanayisine kadar birçok alanda 17 elementten oluşan "Nadir Toprak Elementleri" (NTE) kullanılmakta ve bu elementler teknik olarak vazgeçilmez bileşenlerdir. İtriyum (Y), neodimyum (Nd), disporozyum (Dy) gibi metalleri barındıran bu grup, doğada bastnazit ve monazit gibi birincil mineral kaynaklarından elde edilebildiği gibi; günümüzde giderek artan elektronik atıklar, floresan lambalar ve mıknatıslar gibi ikincil kaynaklardan da elde edilebilmektedir. Yeni nesil teknolojilerde bu elementler sadece özellikleri iyileştiren düşük miktarda kullanılan vitaminler olarak değil NdFeB, SmCo mıknatısları gibi ana bileşen olarak yer almaktadırlar. Bu sebepten ötürü de birçok ülke bu elementleri kritik olarak isimlendirmekte ve güvenli tedariği için birtakım politikalar üretmektedir. Ülkemizde de Eskişehir bölgesinde uzun zamandır bilinen ve rezerv miktarının bilinenden çok daha fazla olduğu açıklanan bir hammadde kaynağı bulunmaktadır. Bu denli stratejik bir kaynağa (cevher veya atık) sahip olmak büyük bir avantaj sağlasa da tek başına yeterli katkıyı sağlamamaktadır. Bu yazıda NTE içeren bir hammaddeden nihai ürüne giden işlem basamakları genel hatları ile özetlenmiş ve bu süreçler hakkında okuyucuya genel bir fikir vermesi amaçlanmıştır.

Kaynak içerisinde karmaşık yapılar halinde bulunan ve kimyasal özellikleri birbirine çok benzeyen bu elementleri ayırmak, saflaştırmak ve uç ürün haline getirmek ileri metalurjik proseslerin hassas bir şekilde yönetilmesine bağlıdır. Hedef metale giden süreçler bütünü olarak isimlendirilen ekstraktif metalurji fiziksel zenginleştirme adımlarından başlayarak, kalsinasyon, hidrometalurji (liç, solvent ekstraksiyon), elektrometalurji (ergimiş tuz elektrolizi) ile metal üretimine kadar uzanan entegre bir sistemi ifade etmektedir.

NTE'nin madenden çıkarıldıktan sonra elektrikli araç, rüzgar türbini, cep telefonu gibi katma değerli ürünlere dönüşmesi için gereken adımlar yapay zeka araçları kullanılarak görselleştirilmiş ve Şekil 1'de sunulmuştur. Bu adımları şu ana başlıklar altında toplayabiliriz:

- Madencilik faaliyetleri,
- Zenginleştirme (kırma, öğütme, eleme, flotasyon gibi),
- Metalurjik işlemler (liç, solvent ekstraksiyon, ergimiş tuz elektrolizi),
- Nihai ürün üretimi (Kalıcı mıknatıs NdFeB gibi)
- NTE içeren ürünlerin cihaza (elektrikli motorlar, sensörler gibi) dönüştürülerek son kullanıcı ürünlerinde (elektrikli araçlar, rüzgar türbinleri, bilgisayar gibi) kullanılması.

Bütün metalurjik süreçlerde olduğu gibi NTE üretiminde de birincil (maden ve dolayısıyla NTE mineralleri) ve ikincil (hedef metali içeren atıklar) kaynaklar kullanılabilir. Dünyada NTE üretiminde en çok kullanılan mineral bastnazit ve monazittir. İkincil kaynaklarda ise en çok NTE bulunduranlar elektronik hurdalar özellikle manyet ve florasan lamba atıklarıdır. NTE kaynaklarını özetleyen bir görsel Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. *NTE'nin topraktan katma değerli ürüne dönüşümündeki süreçlerin özeti (Yapay zeka kullanılarak oluşturulmuştur).*

Şekil 2. *NTE'nin birincil ve ikincil kaynakları.*

Zenginleştirme: Bu adımda maden sahasından elde edilen tüvenan cevher metalurjik süreçler için hazırlanır. Temel olarak uygulanan adımlar şu şekildedir; Kırma, Öğütme, Eleme, Flotasyon. Bu adımda cevher genellikle 100 mikron altına öğütüldükten sonra flotasyon ile NTE konsantrasyonu %2-10'dan %30-60'a kadar çıkarılmaktadır. Burada geniş yüzde aralıklarının verilmesinin sebebi her cevherin karakterinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu adımda fiziksel olarak zenginleştirilen cevher konsantre olarak adlandırılır ve bir sonraki adıma geçilir.

Kalsinasyon: Zenginleştirme adımlarında konsantre edilen cevher içerisinde metalurjik süreçlere başlamak için yeteri kadar NTE içermektedir. Bu işlemdeki en temel amaç çözünürlüğü çok düşük olan florakarbonatlı yapıyı sıcaklık ile çözünebilir oksit formuna getirmektir. Sıcaklık, tane boyutu,, süre gibi temel parametrelerin kontrolü ile cevherin özellikle bastnazit mineralinin Nadir Toprak Oksitlerine (NTO) maksimum verimde dönüşmesi sağlanır. Burada en dikkat edilmesi gereken faktör sıcaklıktır. Sıcaklık Ce'nin değerliğini dolayısıyla çözünürlüğünü doğrudan etkilemektedir. Yüksek sıcaklıklarda (500°C'nin üstü) Ce ve Th değerliği 3'ten 4'e yükseldiğinden ötürü bu elementlerin çözünme verimleri %75'ten %3'e kadar gerilediği yapılan çalışmalarda görülmüştür. Bu işlemden elde edilen ürün kalsine olarak adlandırılmaktadır.

Liç: Fiziksel olarak zenginleştirilebilecek maksimum seviyeye gelen NTE'nin daha ileri saflaştırılabilmesi ve birbirinden ayrılması için sulu ortama alınmaları gerekmektedir. Bu işlem asit ortamında kalsineyi

çözümlendirilerek yapılmaktadır. Bu işlemden sonra NTE'ce zengin bir çözelti ve çoğunlukla gang minerallerini içeren bir liç keki elde edilir. NTE'leri içeren sulu çözeltiden çöktürme yöntemiyle NTO konsantresi elde edilebilir. Aslında bu ürün NTE üretiminin ilk kıymetli ürünüdür. Ancak bu konsantre katma değeri oldukça düşük başlangıç hammaddesidir. Buradan daha yüksek katma değerli ürünler elde etmek için sulu çözeltinin bir sonraki adım olan solvent ekstraksiyon işleminde saflaştırılması gerekmektedir.

Solvent Ekstraksiyon: Çözelti ortamına alınan NTE'nin birbirinden ayrılıp saflaştırıldığı ve NTE üretiminin en stratejik adımıdır. Bu adımda basit olarak her bir NTE'ye mesela Nd'ye seçici özelliği olan organik bileşikler kullanılır. Bu organikler karmaşık NTE iyonlarının içerisinden Nd iyonlarına bağlanırken diğerlerine daha düşük oranda bağlanırlar. Her bir NTE'nin kimyasal özellikleri birbirine çok benzer olduğu için bu ayrılma oranı oldukça düşüktür. Bakırın hidrometalurjik üretiminde olduğu gibi birkaç adımda bu elementleri yüksek verimde birbirinden ayırmak teknik olarak mümkün değildir. Bundan dolayı endüstride bu işlemin yüzlerce defa tekrarlandığı karıştırma-çöktürme (mixer-settler) üniteleri kullanılarak yüksek saflıkta Nd ya da spesifik bir NTE elementi içeren çözelti elde edilebilmesi mümkündür. Bu yüksek saflıkta elde edilen çözeltiden yüksek saflıkta NTO elde edilir ve bir sonraki adımda kullanılır. Solvent ekstraksiyon sırasında çözelti pH'sı, organik fazın sulu faza oranı, karıştırma/dinlendirme süresi gibi süreci kontrol eden parametreler vardır. Bununla birlikte arka planda birçok kimyasal mekanizma olmasıyla birlikte yazımızın amacı genel bir fikir vermek olduğundan bu temel çalışma mantığı ile bu adımı tamamlıyoruz.

Ergimiş Tuz Elektrolizi: Yüksek saflıkta elde edilen NTO'ların metale redüklendiği adımdır. Burada sulu ortam değil de ergimiş tuz ortamı kullanılması gerekmektedir. Bunun sebebi ise NTE'nin redüklenme potansiyelinin sudan daha negatif olmasıdır. Bu adım da NTE üretim süreçlerinin ne kadar standart dışı olduğunun göstergelerinden biridir. Burada florlu ve klorlu olmak üzere iki farklı tuz ortamı kullanılabilir. Endüstride florlu sistem yüksek sıcaklık, anot tüketimi gibi birtakım dezavantajlarına karşın başlangıç hammaddesinin NTO olması ve klor gazı yerine daha kontrol edilebilir CO_2 gazının çıkması gibi avantajlarından ötürü tercih edilmektedir. Buradan elde edilen ürün NTE metalidir.

Ekstraktif metalurjinin en temel amacı hedef metali yani NTE'yi metalik olarak elde etmektir. Burada kısaca açıklanan işlemler sonucunda elde edilen metal formundaki NTE elektrikli araç, rüzgar türbini gibi yenilenebilir teknoloji ürünlerinin hammaddesidir. Günümüzde en çok kullanılan ve en yüksek miktarda NTE içeren ürün NdFeB kalıcı mıknatıslarıdır. Bu mıknatıslar yukarıda kısaca ifade edilen süreçlerden elde edilen Nd metalinden sonra vakum ergitme, şerit döküm, jet milling, presleme, sinterleme ve manyetize etme gibi işlemlerden sonra üretilmektedirler. Bu işlemlerin büyük bir çoğunluğunun vakum altında gerçekleştirilmesi gerekliliği de üretim aşamalarını daha da karmaşık hale getirmektedir. Görüldüğü üzere NTE'nin madenden günlük hayatta kullandığımız bir ürüne dönüşebilmesi için oldukça karmaşık ve çok katmanlı bir süreç yönetilmesi gerekmektedir. Ülke olarak bu denli kritik bir hammaddenin rezervine sahip olmamız oldukça önemli olmasıyla birlikte bu kaynağı nihai ürüne dönüştürme kabiliyeti kazanmamız çok daha büyük önem arz etmektedir.

Kaynakça

European Commision, Grohol, M., & Veeh, C. (2023). Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report. Publications Office of the European Union. https://doi.org/doi/10.2873/725585

Krishnamurthy, N., & Gupta, C. K. (2015). Extractive metallurgy of rare earths. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b19055

Kaplan, Ş.S, (2025). Bastnazit Kompleks Cevherinden Nd, Ce, La Elementlerinin Solvometalurjik Yöntemle Ekstraksiyonu. İTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Kaplan, S. S., Kurtulan, C. C., Gurmen, S., Orhan, G., & Sonmez, M. S. (2025). Influence of calcination conditions on deep eutectic solvents (DES) leaching efficiency of light rare earth elements in bastnasite ore. Minerals Engineering, 220. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109087

Kaplan, S. S., Celik-Kurtulan, C., Emil-Kaya, E., Tranell, G., & Sonmez, M. S. (2026). The pivotal role of particle size on REE enrichment and extraction efficiency: A multi-modal characterization and leaching study of bastnasite ore. Results in Engineering, 29, Article 108961. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.108961

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
Yeditepe Üniversitesi

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 m^3 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 CO_2 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.

Anahtar Kelimeler: *Nadir toprak elementleri, NdFeB mıknatıslar, piro-metalurji, geri dönüşüm, çevresel sürdürülebilirlik, ekstraktif metalurji*

1. GİRİŞ

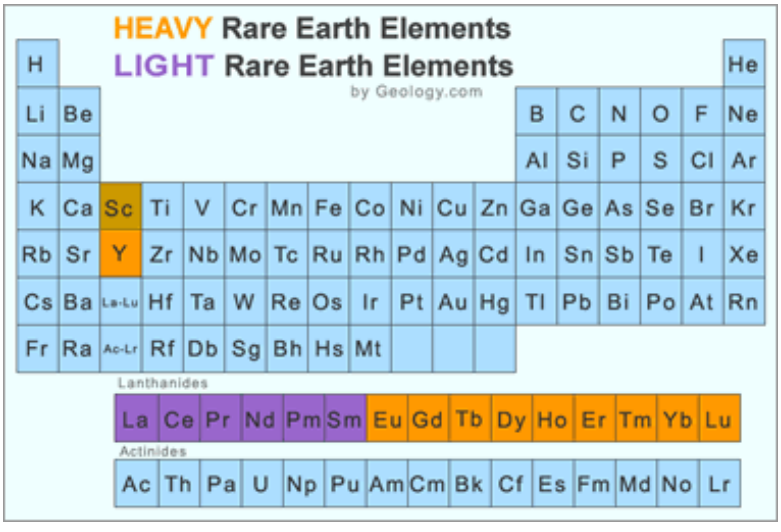
Nadir toprak elementleri, periyodik tablonun lantanit serisini oluşturan 15 element ile kimyasal ve fiziksel özellikleri bakımından bu gruba yakın konumda yer alan skandiyum (Sc) ve itriyum (Y)'u kapsayan 17 metalin ortak adıdır. Yerkabuğundaki bolluklarına göre gerçek anlamda "nadir" olmamalarına karşın; düşük konsantrasyonlarda bulunmaları, karmaşık cevher yapıları ve rafine edilmelerinin güçlüğü nedeniyle bu şekilde adlandırılmaktadırlar [1]. NTE'ler, yüksek manyetik moment, özgün optik ve elektrik özellikleri gibi üstün fizikokimyasal nitelikleri sayesinde modern teknolojilerin temel bileşenlerine dönüşmüştür.

Avrupa Birliği, 2023 yılında yayımladığı beşinci Kritik Hammaddeler listesinde 10 ağır ve 5 hafif NTE dahil toplam 34 kritik hammadde belirlemiştir (Şekil 1). Bu belirleme, söz konusu elementlerin artan stratejik önemini ve arz güvenliğine ilişkin kaygıları yansıtmaktadır [2].

Bauxite	**Coking Coal**	**Lithium**	**Phosphorus**
Antimony	**Feldspar**	Light rare earth elements	Scandium
Arsenic	Fluorspar	Magnesium	Silicon metal
Baryte	Gallium	**Manganese**	Strontium
Beryllium	Germanium	Natural Graphite	Tantalum
Bismuth	Hafnium	Niobium	Titanium metal
Boron/Borate	**Helium**	Platinum group metals	Tungsten
Cobalt	Heavy rare earth elements	Phosphate Rock	Vanadium
		Copper	**Nickel**

Şekil 1. *AB Kritik Hammaddeler (2023) listesi [3].*

NdFeB kalıcı mıknatıslar, NTE'lerin en yaygın kullanım alanlarından birini oluşturmaktadır. Rüzgâr türbinleri, elektrikli araç motorları ve MRI cihazları gibi kritik uygulamalarda kullanılan bu mıknatıslar tipik olarak %31-32 ağırlıkça NTE içermekte olup Nd2Fe14B bileşiğine dayanmaktadır [4, 5]. Küresel NdFeB mıknatıs talebinin hızla artmasıyla birlikte, ömrünü tamamlamış bu ürünlerin geri dönüştürülmesi hem kaynak verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından öncelikli bir mesele haline gelmektedir.



Şekil 2. *NTE'lerin periyodik tablodaki konumu: hafif (LREE) ve ağır (HREE) nadir toprak elementleri [6].*

Bu makale; NTE metalurjisinin çevresel etkilerini, geri dönüşümün bu etkileri azaltmadaki rolünü ve ömrünü tamamlamış NdFeB mıknatıslardan piro-metalurjik yöntemlerle NTE oksitlerinin geri kazanımına ilişkin çalışmaları özetlemektedir.

2. NTE METALURJİSİNİN ÇEVRESEL ETKİLERİ VE GERİ DÖNÜŞÜMÜN ÖNEMİ

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 m^3 asidik atık su ve 9.600

- 12.000 m^3 asit buharı ile partikül içeren atık gaz bulunmaktadır [7]. 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.

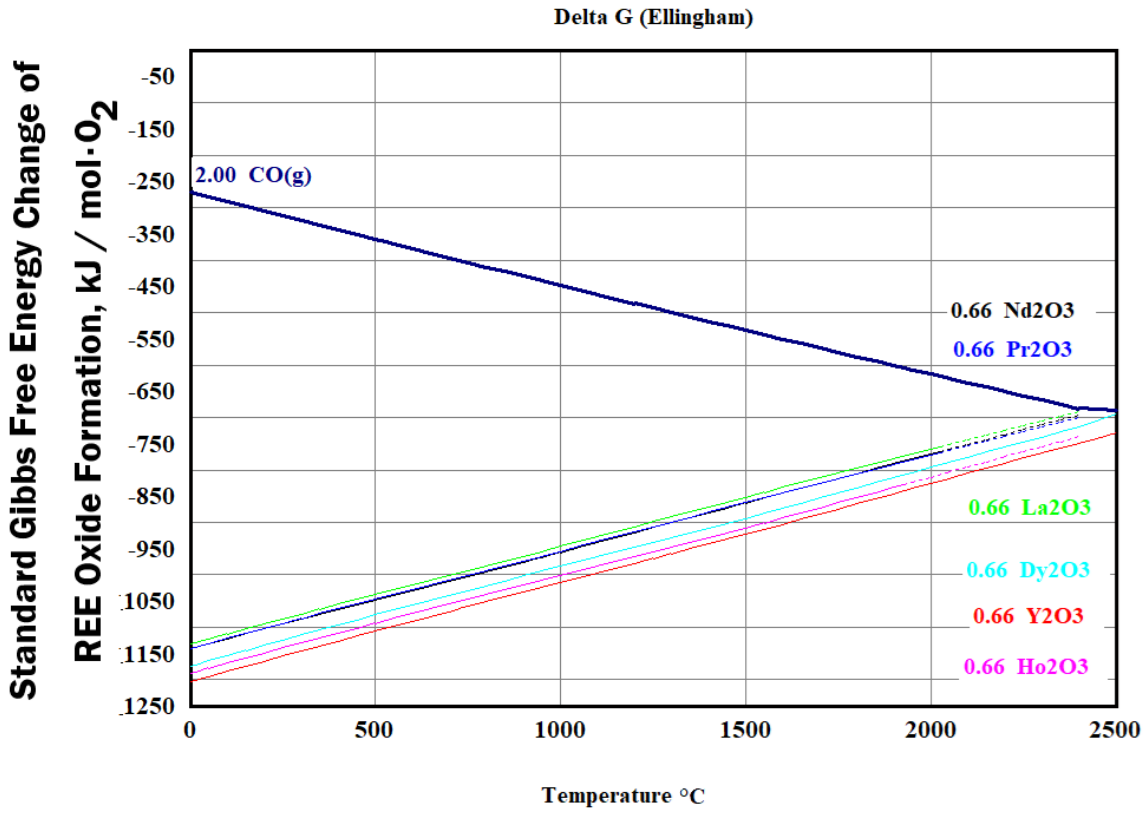
Geri dönüşüm, bu olumsuz etkilerin azaltılmasında kritik bir rol üstlenmektedir. Yapılan çalışmalar, NdFeB mıknatısların geri dönüştürülmesinin birincil madenciliğe kıyasla enerji tüketimini ton başına 2.000 - 4.000 kWh düzeyine indirdiğini, CO_2 (karbon dioksit) emisyonlarını ise ton başına yalnızca 50 - 100 kg'a düşürdüğünü göstermektedir (birincil üretimde bu değer 200 - 500 kg CO_2/ton düzeyindedir). Genel çevresel etki üzerinde %64-96 oranında azaltım sağlaması, geri dönüşümü hem ekolojik hem de stratejik bir zorunluluk kılmaktadır [8, 9].

3. ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ NDFEB MIKNATISLARDAN NTE GERİ KAZANIMI: PİROMETALURJİK VE HİDROMETALURJİK YAKLAŞIMLAR

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 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 $Nd_2Fe_{14}B$ 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.

Şekil 3'te sunulan Ellingham diyagramı, seçilmiş NTE oksitlerin standart Gibbs serbest enerji (ΔG) oluşum değerlerinin sıcaklıkla değişimini, yaygın bir indirgeyici ajan olan CO (karbon monoksit) gazıyla karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Termodinamik açıdan bir oksidin başka bir indirgeyici ile redüksiyonu, ancak indirgeyicinin oksit oluşum eğrisinin grafikte daha aşağıda, yani daha negatif ΔG değerlerinde yer alması durumunda kendiliğinden gerçekleşebilmektedir. Diyagram incelendiğinde, NTE oksitlerin tüm sıcaklık aralığında –700 ile –1200 kJ/mol·O_2 arasında son derece negatif Gibbs serbest enerji değerleri sergilediği görülmektedir. Bu durum, söz konusu oksitlerin son derece kararlı bileşikler olduğuna ve metalik forma indirgenmelerinin termodinamik açıdan büyük bir enerji gerektirdiğine işaret etmektedir. Buna karşılık, endüstriyel proseslerde yaygın biçimde kullanılan CO gazının eğrisi, 2500°C'ye kadar olan tüm sıcaklık aralığında NTE oksit eğrilerinin belirgin biçimde üzerinde seyretmektedir; diğer bir ifadeyle CO, bu sıcaklıklarda NTE oksitlerini indirgeyecek termodinamik kapasiteden yoksundur. Nitekim ticari NTE üretiminde metalik neodimyum (Nd) ve diğer NTE metalleri, doğrudan karbotermik redüksiyonla değil; önce klorür ya da florür tuzlarına dönüştürüldükten sonra ergimiş tuz elektrolizi yöntemiyle üretilmektedir. Bu termodinamik gerçeklik, NdFeB mıknatıslarından NTE geri kazanımında doğrudan pirometalurjik redüksiyon yerine oksidatif kavurma ve ardından hidrometalurjik liç gibi dolaylı yolların tercih edilmesinin temel bilimsel gerekçesini oluşturmaktadır.



Şekil 3. *Seçilmiş NTE'lerin Ellingham Diyagramı.*

Kavurma ürünleri olan oksit karışımları, seçici liç ya da ergitme yoluyla NTE bakımından zengin fraksiyonlara ayrılabilmektedir. Curuf metalurjisi de pirometalurjik yaklaşımlar arasında değerlendirilmekte olup bu yöntemde NTE'lerin sıvı curuf fazına seçici olarak geçirilmesi, ardından cürufun katılaştırılıp liç ile işlenmesi esasına dayanmaktadır. B_2O_3 – Nd_2O_3 ve B_2O_3 – Nd_2O_3 – FeO gibi ikili ve üçlü faz diyagramları, bu süreçte cüruf bileşiminin optimizasyonu ve uygun işlem pencerelerinin belirlenmesi için kritik bir tasarım aracı işlevi görmektedir [10].

Hidrometalurjik yöntemler ise NdFeB tozu veya kavurma ürünlerinin asit ya da baz çözeltilerinde çözündürülmesine dayanmaktadır [11]. Liç işleminde hidroklorik asit (HCl), sülfürik asit (H_2SO_4) ve nitrik asit (HNO_3) 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 çözeltisine beslenerek Fe, Nd, Pr ve diğer elementlerin birlikte çözünmesi sağlanmakta; ardından seçici çökeltme, solvent ekstraksiyonu veya iyon değişimi yoluyla elementler ayrıştırılmaktadır [11, 12]. 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 (D2EHPA, 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.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

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 CO_2 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.

KAYNAKLAR

[1] Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. Geoscience Frontiers, 10(4), 1285-1303.

[2] European Commission (2023). Critical Raw Materials Act. Communication COM (2023) 160 final. Brussels.

[3] European Commission (2017). Report on critical raw materials and the circular economy. EU publications. https://doi.org/10.2873/167813.

[4] European Commission (2020) Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. https://doi.org/10.2873/865242.

[5] Blenau, W. (2023). Composition and Properties of NdFeB Permanent Magnets. Journal of Magnetic Materials Review, 15(2), 45-62.

[6] King, H. M. (2025). Rare Earth Elements and their Uses. https://geology.com/articles/rare-earth-elements/.

[7] Ali, S. H. (2014). Social and environmental impact of the rare earth industries. Resources, 3(1), 123-134.

[8] Borra, C. R. (2024). Recycling of rare earth elements from permanent magnets: A review on extraction processes. Separation and Purification Technology, 318, 123945.

[9] IEA (2023). Global CO2 Emissions from Energy Combustion and Industrial Processes. International Energy Agency, Paris. https://www.iea.org.

[10] Goryunova, N. A., et al. (2021). Phase equilibria in the NdO1.5-BO1.5 system: DTA and thermodynamic assessment. Journal of Alloys and Compounds, 862, 158524.

[11] Binnemans K, Jones PT (2017) Solvometallurgy: an emerging branch of extractive metallurgy. Journal of Sustainable Metallurgy 3(3):570-600. https://doi.org/10.1007/s40831-017-0128-2.

[12] Binnemans K, Jones PT (2023) The twelve principles of circular hydrometallurgy. Journal of Sustainable Metallurgy. 9(1):1-25. https://doi.org/10.1007/s40831-022-00636-3.

TÜRKİYE'DE KRİTİK STRATEJİK MİNERALLERDE KRİTİKLİK HESAPLAMASI

Doç. Dr. Mertol GÖKELMA
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanan kritik stratejik mineraller listesinde [1], bir mineralin "kritiklik" düzeyi çok boyutlu bir risk analiziyle belirlenmektedir. Bu kapsamda toplam kritiklik puanının %70'i risk bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu riskler; tedarik riski, fiyat riski, talep riski, geri dönüşüm riski ve potansiyel risk gibi unsurları içermektedir. Buna ek olarak, mineralin dış ticaretteki konumu da değerlendirmeye alınmakta; ihracat performansı %10, ithalat bağımlılığı ise %20 ağırlıkla kritiklik hesabına dahil edilmektedir. Böylece hem arz güvenliği hem de ekonomik kırılganlıklar birlikte ele alınmaktadır.

AVRUPA BİRLİĞİ'NDE KRİTİKLİK YAKLAŞIMI

Avrupa Birliği'nde kritik hammaddelerin belirlenmesinde temel olarak iki ana gösterge kullanılmaktadır: ekonomik önem (economic importance) ve arz riski (supply risk). Ekonomik önem, ilgili hammaddenin AB sanayileri ve stratejik sektörler (enerji dönüşümü, savunma, dijital teknolojiler vb.) için ne derece vazgeçilmez olduğunu ölçerken; arz riski, üretimin coğrafi yoğunlaşması, tedarikçi ülkelerdeki yönetişim kalitesi, ithalat bağımlılığı ve ikame edilebilirlik gibi faktörlere dayanmaktadır [2]. Ayrıca son yıllarda AB metodolojisine geri dönüşüm oranları ve ikame potansiyeli daha güçlü biçimde entegre edilerek, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık boyutu öne çıkarılmıştır.

İNSAN KAYNAĞI YETİŞTİRİLMESİ

Türkiye'de TÜBİTAK destekli araştırma projelerinde, geçmişte ticarileşmeyen çok sayıda çıktının bulunması nedeniyle değerlendirme süreçlerinde teknoloji hazırlık seviyesi (THS/TRL) 5 ve üzeri projelere öncelik verilmektedir. Bu yaklaşım, kısa ve orta vadede ticarileşme potansiyeli taşıyan sonuçlar üretmeyi hedeflemektedir. Ancak bu çerçevede, altyapı kurmaya, pilot ölçekli laboratuvarlar oluşturmaya veya erken aşama süreç geliştirmeye yönelik projeler çoğu zaman reddedilmektedir. Bu durum özellikle nadir toprak elementleri (NTE) teknolojileri gibi yüksek uzmanlık, uzun öğrenme eğrisi ve ileri analitik altyapı gerektiren alanlarda ciddi bir boşluk yaratmaktadır. Üniversitelerde gerekli deneysel altyapı kurulamadığı için, öğrencilerin ve genç araştırmacıların süreç geliştirme, ayırma–saflaştırma ve ölçek büyütme gibi kritik yetkinlikleri kazanması mümkün olmamaktadır. Sonuç olarak, erken aşama Ar-Ge desteklerinin sınırlı kalması, bu alanda kalifiye insan kaynağı yetişmesini zorlaştırmakta ve uzun vadede Türkiye'nin stratejik mineral teknolojilerinde dışa bağımlılığını azaltma hedefleriyle çelişmektedir.

MADENCİLİK VE TÜKETİM ALIŞKANLIKLARI İLİŞKİSİ

Artan nüfus ve değişen tüketim alışkanlıkları hammadde ihtiyacını arttırmaktadır. Madencilik ve metalurjinin kurallara uygun ve duyarlı yapılması durumunda dahi doğada yarattığı olası zararlar artan tüketimin bir sonucudur. Maden, metalurji kısıtlamaları, düzenlemelerini konuştuğumuz kadar tüketim dinamiklerini de konuşmalıyız. Bilinçsiz tüketim bu şekilde devam ettiği sürece doğal kaynakların ekonomiye dahil edilmesi kaçınılmaz bir sonuçtur [3].

[1] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025). Türkiye Kritik ve Stratejik Madenler Raporu.

[2] Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials

[3] Fischer-Kowalski, M. (2019) "UN Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want"

NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ (NTE)

DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE MEVCUT DURUM VE GELECEK SENARYOLARI SEMPOZYUMU

ÖZEL SAYI

Aşağıdaki karekodu okutarak Oda Sosyal Medya Hesaplarımıza ulaşabilirsiniz.

TMMOB Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası