

## Nadir Toprak Elementlerinin Coğrafi Boyutu

### The Geographical Dimension of Rare Earth Elements

Muhammed Oral <sup>1</sup> 

#### Özet

Nadir toprak elementleri (NTE), sahip oldukları fiziksel ve kimyasal özellikler sayesinde yüksek teknoloji, yeşil enerji uygulamaları, enerji depolama sistemleri, savunma sanayisi, elektronik endüstrisi, otomotiv ve uzay-havacılık gibi stratejik sektörlerin temel hammaddeyi arasında yer almaktadır. Bununla birlikte ekonomik olarak işletilebilir rezervlerin, üretim faaliyetlerinin ve özellikle ayrıştırma kapasitesinin sınırlı sayıdaki ülkede yoğunlaşması, NTE'leri yalnızca ekonomik açıdan değil, aynı zamanda jeopolitik ve stratejik açıdan da kritik doğal kaynaklar hâline getirmiştir. Bu çalışma, NTE'leri coğrafi bir bakış açısıyla ele alarak rezervlerin mekânsal dağılışı, üretim coğrafyası, kullanım alanları, küresel talep eğilimleri, jeopolitik etkileri, çevresel sonuçları bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmektedir. Araştırmadan elde edilen bulgular, enerji dönüşümü ve dijitalleşme süreçlerinin etkisiyle NTE'lere yönelik talebin önümüzdeki yıllarda artmaya devam edeceğini; buna karşılık rezervlerin, üretimin ve işleme teknolojilerinin belirli ülkelerde yoğunlaşmasının küresel tedarik zincirinde kırılganlıklar oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca madencilik faaliyetlerinin çevresel etkileri ile düşük geri dönüşüm oranlarının sürdürülebilir kaynak yönetimi açısından önemli sorunlar yarattığı da görülmüştür. Bu kapsamda, tedarik zincirinin çeşitlendirilmesi, geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi, çevresel sürdürülebilirliğin güçlendirilmesi ve yüksek katma değerli üretim kapasitesinin artırılması, NTE'lere yönelik küresel stratejilerin temel bileşenleri olarak öne çıkmaktadır. Çalışma, NTE'lerin 21. yüzyılda maden arz güvenliği, teknolojik rekabet, ekonomik kalkınma ve jeopolitik dengeler üzerinde belirleyici rol oynayan stratejik doğal kaynaklar olduğunu / olacağını ortaya koymaktadır. Araştırmada nitel araştırma yöntemi benimsenmiş olup doküman analizi veri toplama metoduyla bilimsel çalışmalardan elde edilen ikincil veriler incelenerek NTE'lerin rezerv ve tedarik zinciri coğrafi bağlamda değerlendirilmiştir. Araştırmada kullanılan veriler, veri türüne ve kaynağına bağlı olarak farklı dönemleri kapsamaktadır.

**Anahtar sözcükler:** Nadir Toprak Elementleri (NTE), Tedarik Zinciri, Maden Coğrafyası, Ekonomik Coğrafya, Jeopolitik.

#### Abstract

Rare earth elements (REEs) have become indispensable raw materials for strategic sectors such as high technology, green energy applications, energy storage systems, the defense industry, electronics industry, automotive manufacturing, and aerospace owing to their unique physical and chemical properties. However, the concentration of economically exploitable reserves, production activities, and particularly separation and processing capacities in a limited number of countries has transformed REEs into not only economically valuable resources but also strategically and geopolitically critical minerals. This study examines REEs from a geographical perspective by comprehensively evaluating the spatial distribution of reserves, production geography, areas of utilization, global demand trends, geopolitical implications, and environmental consequences. The findings indicate that the ongoing energy transition and digital transformation will continue to drive the demand for REEs in the coming years. At the same time, the concentration of reserves, production, and processing technologies in a few countries creates vulnerabilities within the global supply chain. Furthermore, the environmental impacts associated with mining activities, together with the low recycling rates of REEs have emerged as significant challenges to sustainable resource management. In this context, supply chain diversification, the advancement of recycling technologies, the strengthening of environmental sustainability, and the expansion of value-added production capacity stand out as key components of global strategies for REEs. The study concludes that REEs are strategic natural resources that play, and will continue to play, a decisive role in mineral supply security, technological competitiveness, economic development, and geopolitical dynamics throughout the 21st century. The study adopted a qualitative research method and secondary data obtained from scientific studies were examined through document analysis as the data collection method to evaluate the reserves and supply chain of REEs from a geographical perspective. The data used in the study cover different periods depending on the type and source of the data.

**Keywords:** Rare Earth Elements (REEs), Supply Chain, Mining Geography, Economic Geography, Geopolitics.

<sup>1</sup> Doç. Dr., Karabük Üniversitesi İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Karabük, Türkiye, [muhammedoral@karabuk.edu.tr](mailto:muhammedoral@karabuk.edu.tr)

## Extended Abstract

Rare earth elements (REEs) have become one of the most strategic mineral resources of the twenty-first century because of their critical roles in advanced manufacturing, clean energy technologies, digital transformation, and national security. Although described as “rare,” these elements are not necessarily scarce in the Earth’s crust. Their strategic importance stems from the geographical concentration of economically exploitable deposits and the complex, capital-intensive processes required for extraction, separation, and refining. Consequently, REEs are important not only economically but also for geopolitical competition, technological sovereignty, and global supply chain security.

Global demand for REEs has increased with renewable energy, electric vehicles, semiconductor production, aerospace, and defense technologies. Permanent magnets containing neodymium (Nd), praseodymium (Pr), dysprosium (Dy), and terbium (Tb) are important for high-efficiency electric motors and wind turbines. Other REEs are used in catalysts, ceramics, optical materials, phosphors, batteries, and nuclear technologies.

This study examines REEs geographically by evaluating the spatial distribution of reserves, production geography, areas of use, global demand trends, geopolitical implications, environmental impacts, and recycling potential. It also investigates how the concentration of reserves, production capacity, and processing technologies influences global economic relations and international political dynamics. The study therefore emphasizes the interaction between natural resource distribution, technological capability, and geopolitical power.

The study adopted a qualitative research method with document analysis as the main data collection method. Reports from international organizations, peer-reviewed studies, statistical databases, and sectoral analyses were reviewed. Data on reserves, mine production, demand projections, technological developments, processing capacity, and recycling practices were examined.

The findings indicate that economically viable REE reserves and production activities are unevenly distributed worldwide. Although many countries possess geological potential, China remains dominant, particularly in separation and refining technologies. This technological advantage has strengthened China’s leading position in the REE supply chain. Consequently, the concentration of production and processing capacity in few countries creates structural supply risks for industries dependent on these minerals.

Demand for REEs is expected to rise considerably in coming decades because of the global energy transition and digitalization. The growing use of electric vehicles, wind power, advanced electronics, and defense systems will especially increase demand for neodymium, praseodymium, dysprosium, and terbium. Meanwhile, long lead times for new mining projects and limited separation capacity outside China for heavy rare earth elements suggest that future supply constraints may intensify.

Environmental challenges also complicate REE development. Extraction and processing often require intensive chemical use, generate large amounts of mining waste, and may involve radioactive elements such as thorium and uranium. Therefore, increasing production alone cannot provide a sustainable solution. Environmental safeguards, responsible mining practices, and effective waste management must accompany efforts to expand supply.

Recycling is a strategic component of future REE security. Although current recycling rates remain low because of technological and economic barriers, end-of-life permanent magnets, electronic waste, batteries, and other secondary resources represent potential sources. Recycling should therefore be considered both an environmental practice and a strategic instrument for strengthening supply security.

Countries with REE resources should also move beyond a mining-centered strategy. Developing separation and refining facilities, advanced processing technologies, research and development, university–industry collaboration, and high value-added manufacturing is essential for maximizing economic benefits. National competitiveness increasingly depends not only on mineral reserves but also on the industrial and technological capacity to transform raw materials into advanced products.

In conclusion, REEs are fundamental inputs in the technology-driven global economy. Their distribution, production systems, processing capacity, and supply chains influence economic competitiveness, energy security, technological innovation, and geopolitical relations. As demand rises, supply chain diversification, technological capacity building, recycling, responsible mining, and sustainable resource management will remain key priorities in critical mineral policies.

## Giriş

İnsanlık tarihi boyunca doğal kaynaklar, toplumların yaşamlarını sürdürebilmelerinin temel unsurlarından biri olmanın yanı sıra ekonomik refahın, askerî kapasitenin ve siyasi gücün şekillenmesinde belirleyici bir rol üstlenmiştir. Sanayi Devrimi sonrasında hız kazanan sanayileşme süreci ve teknolojik ilerlemeler ise doğal kaynakların stratejik değerini artırarak ülkelerin kalkınma düzeyleri ve küresel rekabet güçleri üzerinde daha belirgin etkiler oluşturmıştır.

Özellikle 21. yüzyılda dijitalleşme, yüksek teknoloji üretimi ve küresel enerji dönüşümünün hız kazanmasıyla birlikte bazı mineral kaynaklar stratejik bir önem kazanmıştır. Bu kaynaklar arasında yer alan nadir toprak elementleri (NTE), sahip oldukları benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikler nedeniyle birçok ileri teknoloji ürününün vazgeçilmez girdileri arasında bulunmaktadır.

Toplam 17 NTE metali bulunur. Bu elementler; skandiyum (Sc), itriyum (Y), lantan (La), seryum (Ce), praseodimyum (Pr), neodimyum (Nd), prometyum (Pm), samaryum (Sm), evropiyum (Eu), gadolinyum (Gd), terbiyum (Tb), disprosyum (Dy), holmiyum (Ho), erbiyum (Er), tulyum (Tm), iterbiyum (Yb) ve lütesyum (Lu) şeklindedir. Skandiyum ve itriyum doğada lantanitlerle benzer kimyasal özellikler gösterdikleri için NTE sınıfına dâhil edilirler.

NTE'ler, hafif nadir toprak ve ağır nadir toprak olarak ikiye ayrılır. Hafif Nadir Toprak Elementleri (HNTE) atom numaraları 57-64 aralığındaki elementlerdir. Bunlar; lantan (La), seryum (Ce), praseodimyum (Pr), neodimyum (Nd), prometyum (Pm), samaryum (Sm), evropiyum (Eu) ve gadolinyum (Gd) şeklindedir. Atom numarası 21 olan skandiyum (Sc) da bu grupta yer alır. Bununla birlikte gadolinyum (Gd), hafif ve ağır nadir toprak elementleri arasında bir geçiş elementi olarak da değerlendirilebilmektedir. Ağır Nadir Toprak Elementlerinin (ANTE) atom numaraları ise 65-71 arasındadır. Bu elementler; terbiyum (Tb), disprosyum (Dy), holmiyum (Ho), erbiyum (Er), tulyum (Tm), iterbiyum (Yb) ve lütesyum (Lu) olarak gruplandırılır. Atom numarası 39 olan itriyum (Y) da bu gruba dâhil edilmektedir (Şahiner vd., 2017). Hafif NTE rezervleri ABD, Avustralya ve Türkiye (Beylikova) gibi farklı coğrafyalara dağılmışken, en kritik ve pahalı olan ağır NTE rezervleri büyük ölçüde Çin'in güney ve güneydoğu eyaletlerindeki (Jiangxi, Guangdong, Fujian, Hunan, Yunnan, Guangxi Özerk Bölgesi) yataklar ile Grönland gibi keşfedilmeyi bekleyen kutup sahalarında yer almaktadır (Pitron, 2024; Cebe vd., 2020; MİA, 2025).

Jeolojik açıdan bakıldığında nadir toprak elementleri esasen “nadir” değildir. Bu metallerin yatakları dünyanın birçok yerinde bulunur ve bazı elementler, yer kabuğunda bakır veya kalay kadar bol miktarda bulunur. Ancak nadir toprak elementleri hiçbir zaman çok yüksek konsantrasyonlarda bulunmaz ve genellikle birbirleriyle veya uranyum ve toryum gibi radyoaktif elementlerle karışık halde bulunurlar. Nadir toprak elementleri terimi, 1788'de İsveç'in Ytterby kentinde bir madenci tarafından alışılmadık siyah bir kaya parçasının bulunmasıyla ortaya çıktı. Cevhere “nadir” denmesinin nedeni ise daha önce hiç görülmemiş olması ve “toprak” kelimesinin de 18. yüzyılda asitte çözünebilen kayalar için kullanılan jeolojik bir terim olmasıydı. 1794'te kimyager Johan Gadolin, daha önce bilinmeyen bu “toprağa”, keşfedildiği kasabanın adından esinlenerek “yttria” adını verdi. Zamanla Ytterby çevresindeki madenlerden, kasabanın adını taşıyan dört element (itriyum, iterbiyum, terbiyum ve erbiyum) içeren kaya parçaları çıkarıldı (Science History Institute, 2026).

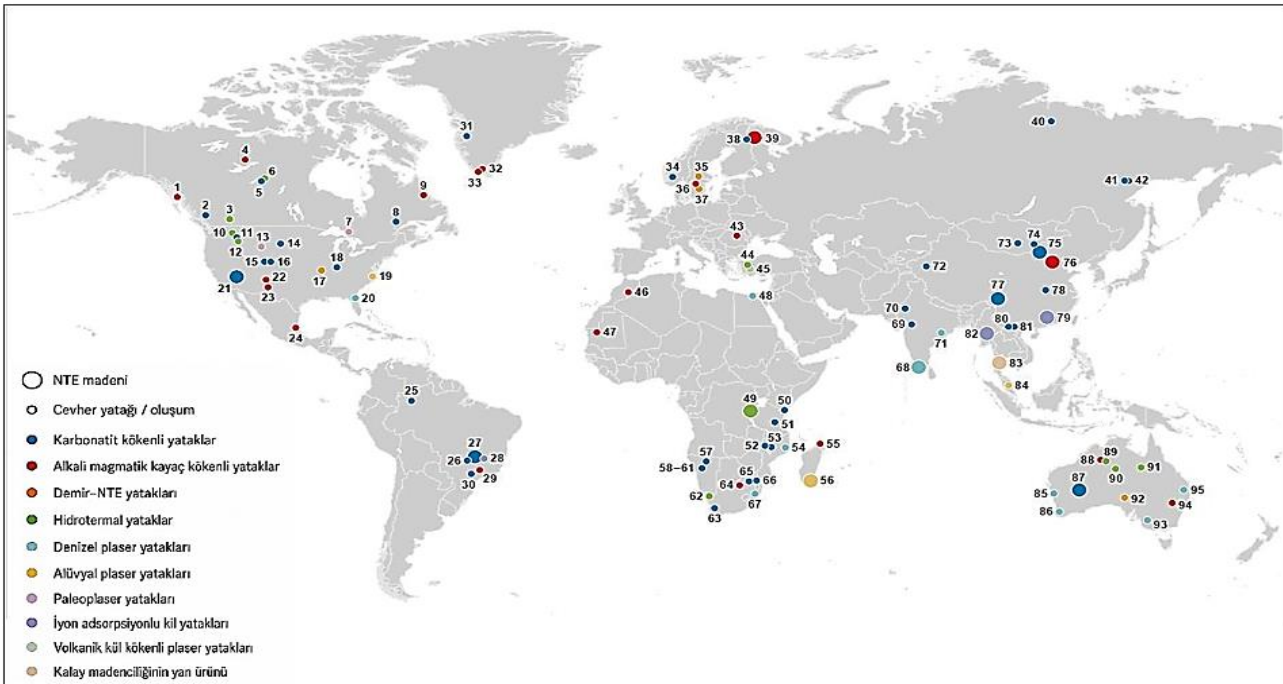
Bu elementler akıllı telefonlardan bilgisayarlara, elektrikli araçlardan rüzgâr türbinlerine, savunma sanayi sistemlerinden uzay teknolojilerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Elektrikli araçlar, mıknaatıslar ve yenilenebilir enerji teknolojilerine olan talebin artması, NTE'lerin küresel ölçekte stratejik değerini daha da yükseltmiştir. Bu durum, piyasa aktörlerinin ve mühendislerin NTE'leri “yüksek teknolojinin DNA'sı” olarak tanımlamasına yol açmıştır (KuveytTürk Yatırım, 2025).

NTE'lerin önemi yalnızca teknolojik kullanım alanlarından kaynaklanmamaktadır. Bu elementlerin rezerv, üretim ve işleme faaliyetlerinin belirli ülkelerde yoğunlaşması jeopolitik sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Günümüzde dünya NTE üretimi ve işleme kapasitesinin büyük bir kısmının Çin'de bulunması, bu kaynakların jeopolitik bir unsur olarak değerlendirilmesine yol açmıştır. Bu durum, enerji güvenliği

kavramına benzer şekilde “maden güvenliği”ni gündeme getirmiştir. Dolayısıyla ulusal güvenliğin temel öğelerinden olan enerji güvenliği konusu artık maden güvenliği ile bir arada değerlendirilmesi gereken bir konu hâline gelmiştir.

Bu bağlamda doğal kaynakların coğrafi dağılışı, küresel ticaret ağları, enerji dönüşümü, çevresel etkiler ve jeopolitik rekabet gibi birçok konuyla doğrudan ilişkilidir. Son yıllarda Türkiye’de gerçekleştirilen rezerv keşifleri ve kritik maden politikaları, bu kaynakların ulusal kalkınma ve sanayileşme hedefleri açısından da stratejik ölçekteki niteliğini artırmıştır.

NTE’ler; karbonatitler, alkalen magmatik sistemler ve demir oksit-bakır-altın (DOBA) yatakları gibi birincil jeolojik kaynakların yanı sıra iyon-adsorpsiyon killeri, plaserler ve lateritik oluşumlar gibi ikincil kaynaklarda da yoğunlaşmaktadır. Birincil kaynaklar çoğunlukla hafif NTE’ler bakımından zengin olurken, ikincil kaynaklar özellikle ağır NTE’ler açısından önem taşımaktadır. Birincil kaynaklar genellikle hafif NTE’lerce zengin ve yüksek maliyetli üretim süreçlerine sahip olabilmektedir (Çimen & Dönmez, 2026). Bununla birlikte, NTE’lerin kaynaktan üretime kazandırılması; cevherin mineralojik özellikleri, tenörü ve işlenebilirliğine bağlı olarak farklı maliyet ve teknolojik gereksinimler ortaya çıkarmaktadır. Dünya genelinde NTE rezervleri temel olarak belirli ülkelerde yoğunlaşmıştır. Çin 44 milyon ton ile en yüksek rezerve sahip ülke olurken, onu Brezilya 21 milyon ton, Hindistan 6,9 milyon ton, Avustralya 5,7 milyon ton, Rusya 3,8 milyon ton, Vietnam 3,5 milyon ton, ABD 1,9 milyon ton, Grönland 1,5 milyon ton, Tanzanya 890 bin ton, Güney Afrika 860 bin ton ve Kanada 830 bin ton ile takip etmektedir. Tayland ise 4.500 tonluk bir rezerve sahiptir. Myanmar, Madagaskar, Malezya ve Nijerya’nın net verisi olmayan rezervleri de dahil edildiğinde toplam küresel NTE rezervleri 90 milyon tonun üzerindedir (USGS, 2025). Küresel bazda NTE maden rezervleri, yatakları (yatak tipleri) ve oluşum bölgeleri Harita 1’de gösterilmektedir.



Harita 1. Küresel ölçekte NTE rezervleri, yatak tipleri ve oluşum sahaları

{Deady, E. (2021) Global rare earth element (REE) mines, deposits and occurrences (May 2021). British Geological Survey (BGS)}

\* numaralandırmalar ilgili maden sahalarının ülke yerleri ve isimleri ile ilgilidir. Bu saha adları için kaynakçada belirtilen web uzantısına bakılabilir.

Çin, yalnızca doğal kaynak zenginliğiyle değil; küresel cevher üretiminin %61’ini, rafinaj ve ayırma kapasitesinin ise %85 ila %95’ini tek başına kontrol ederek pazarda tartışılmaz bir tekel kurmuştur. Özellikle

Çin'in İç Moğolistan bölgesinde yer alan Bayan Obo sahası, küresel rezervlerin neredeyse %40'ını tek başına barındırarak dünya NTE tedarik zincirinin odağında yer almaktadır (Tural & Tural, 2025; MİA, 2025).

Türkiye ise NTE potansiyeli alanında küresel dengeleri değiştirebilecek düzeyde, Çin'den sonra dünyanın en büyük ikinci potansiyel kaynağına ev sahipliği yapmaktadır. Eskişehir'in Sivrihisar-Kızılcaören (Beylikova) bölgesinde keşfedilen saha; florit, barit ve bastnazit mineralleri içeren 694 milyon tonluk devasa bir cevher potansiyeline sahiptir (Dilek & Binzat, 2025; MİA, 2025). Bu rakam, uluslararası standartlarda doğrudan doğrulanmış saf "rezerv" miktarını değil, potansiyel "işlenebilir cevher" miktarını ifade etse de jeostratejik açıdan Türkiye'yi oldukça kritik bir konuma yerleştirmektedir (Dilek & Binzat, 2025; KuveytTürk Yatırım, 2025). Beylikova-Kızılcaören'deki bu sahanın yanı sıra Sivas-Karaçayır, Davulalan ve Kayseri-Özvatan gibi karbonatitlerle ilişkili birincil kaynakların yanı sıra Malatya-Kuluncak ve Sivas-Divriği'ndeki alkale kompleksler, Karaman'daki boksit ilişkili ikincil kaynaklar, Burdur-Çanaklı'daki plaserler ve Bingöl-Avnik'teki demir oksit-apatit oluşumları ile çeşitlilik göstermektedir. Bilinen tenör ve kaynak miktarları açısından Eskişehir-Kızılcaören sahası %1,5-1,8 NTE tenörü ve 694 Mt kaynak büyüklüğü ile öne çıkarken, Burdur-Çanaklı %0,07 tenör ve 464 Mt kaynak, Sivas-Karaçayır ise %0,15 tenör ve 6 Mt kaynak değerine sahiptir. Bununla birlikte, bazı sahalarla ilişkin tenör ve kaynak büyüklüklerinin henüz belirlenmemiş olması, Türkiye'nin NTE potansiyelinin ortaya konulması açısından daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç bulunduğunu göstermektedir (Çimen & Dönmez, 2026).

### Nadir Toprak Elementleri Tedarik Zincirinin Coğrafyası

NTE'ler yalnızca bir maden grubu olmanın ötesinde; küresel üretim ağlarını, uluslararası ticareti, sanayi kümelenmelerini, bölgesel kalkınma dinamiklerini ve tedarik zincirlerini şekillendiren stratejik ekonomik girdiler hâline gelmiştir. Rezervlerin eşit dağılmaması, ülkeler arasında farklı ekonomik avantajlar oluşturmakta ve küresel üretim sistemlerinde uzmanlaşmayı teşvik etmektedir. Ancak ekonomik değer yalnızca rezerv büyüklüğüyle belirlenmemektedir. Cevherin tenörü, çıkarma maliyetleri, teknolojik altyapı, sermaye birikimi, ulaşım olanakları ve işleme kapasitesi de kaynakların ekonomik olarak değerlendirilmesinde belirleyici unsurlardır. Dolayısıyla ekonomik coğrafya açısından önemli olan kaynakların salt nerede bulunduğu değil, bu kaynakların hangi ekonomik sistem içerisinde nasıl değerlendirildiğidir. Nitekim NTE madenciliğinde, madenden çıkarılan cevherin nihai ürüne dönüşmesi en maliyetli aşamadır; toplam NTE maliyetinin yaklaşık %75'i çıkarma, arıtma ve karmaşık kimyasal saflaştırma işlemlerinden kaynaklanır (Jha, 2014).

NTE tedarik zincirinin şu beş aşamadan oluştuğu belirtilebilir:

Arama ve rezerv tespiti

Madencilik (çıkarma) faaliyetleri

Zenginleştirme ve ayrıştırma işlemleri

Rafinasyon ve ileri işleme süreçleri

Yüksek teknoloji ürünlerinde kullanım

Bu komplike süreçlerin tamamı elbette her ülkede bulunmamaktadır. Bir ülke önemli rezervlere sahip olsa bile gerekli işleme teknolojilerinin bulunmaması nedeniyle katma değer büyük kısmı başka ülkelerde oluşabilmektedir. Bu nedenle NTE tedarik zinciri yalnızca kaynakların bulunduğu alanları değil, işleme teknolojileri ve üretim merkezlerini de kapsayan karmaşık bir yapıdır. Diğer madenlerde olduğu gibi NTE rezervleri de dünya genelinde eşit şekilde dağılmamıştır. Bazı ülkelerde bazı madenler oldukça yoğun bulunurken bazı ülkelerde sınırlı ölçekte mevcut olabilir yahut hiç bulunmayabilir. Çin, Brezilya, Hindistan, Avustralya, Rusya, Vietnam ve ABD önemli NTE rezervlerine sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Üretimde ise yaklaşık değerler itibarıyla Çin (%70), ABD (%11), Myanmar (%8), Avustralya (%3), Tayland (%3), Nijerya (%3) ve %2 diğer ülkeler grubu şeklinde bir sıralama söz konusudur (USGS, 2025).

Çin, stratejik yatırımları sayesinde küresel rafınaj ve ayırma kapasitesinin %85 ila %95'ini tek başına kontrol etmektedir. Bu durum öyle bir boyuttadır ki ABD, kendi toprağında (Mountain Pass) çıkardığı ham cevheri topraklarında işleyecek entegre kapasitesi tam oturmadığı için, ayrıştırılması ve rafine edilmesi amacıyla genellikle Çin'e ihraç etmek zorunda kalmaktadır (KuveytTürk Yatırım, 2025; MİA, 2025). Çin dışında bu alanda öne çıkan en önemli merkez, Avustralyalı Lynas firmasının cevheri işlemek için kurduğu Malezya'daki LAMP tesisidir (TMMOB MMO, 2016; Cebe vd., 2020). Fransa ve Japonya ise topraklarında ekonomik NTE rezervi olmamasına rağmen, ileri kimya endüstrileri sayesinde işlenmiş NTE ürünlerinde (ayrıştırma/saflaştırma) dünyanın önde gelen aktörlerindendir (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2020). Nihai ürün üretiminde ise Çin ile birlikte ABD, Avrupa Birliği ülkeleri, Japonya ve Güney Kore gibi teknoloji üretiminde önemli markalara sahip gelişmiş ekonomilerin öne çıktığı görülmektedir.

Rezervlerin coğrafi dağılımı ile üretim ve işleme faaliyetlerinin dağılımı arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. NTE tedarik zincirinin coğrafyası incelendiğinde Çin'in merkezi bir konuma sahip olduğu görülmektedir. Çin yalnızca önemli rezervlere sahip olmakla kalmaz aynı zamanda ayrıştırma, rafinasyon ve mıknaatıs üretimi gibi yüksek katma değerli süreçlerde de küresel lider konumundadır. Ayrıştırma ve saflaştırma işlemlerinin sınırlı sayıda ülkede yoğunlaşmasının temel nedenleri; çevresel regülasyonların zayıflığı, ucuz işgücü ve ucuz sarf malzemeleridir. Bu nedenle Çin dışında üretilen cevherler bile çoğunlukla rafine edilmek ve metal/alaşıma dönüştürülmek üzere tekrar Çin'e gönderilmektedir (Cebe vd., 2020; TMMOB MMO, 2016).

ANTE'lerin düşük tenörlerde bulunması, üretim sürecini ekonomik açıdan oldukça zorlaştırmaktadır. Yatağın özelliklerine bağlı olarak 1 kg disprosyum (Dy) elde edebilmek için yaklaşık 333–2.000 kg ham cevherin işlenmesi gerekmektedir. Örneğin, toplam nadir toprak oksit (Total Rare Earth Oxides-TREO) tenörü yaklaşık %1,8 olan ve disprosyum ile terbiyumun (Tb) konsantre içerisindeki payının yalnızca %4 düzeyinde bulunduğu ABD'deki Mountain Pass (MP Materials) madeninde, 1 ton disprosyum üretilmesi için yaklaşık 13.600 ton ham cevher işlenmektedir. Bu durum, ANTE'lerin üretiminde karşılaşılan temel ekonomik ve teknik kısıtları açıkça ortaya koymaktadır (Chavan, 2026).

NTE'lerin yeşil enerji ve savunma sanayisi için en hayati formu olan kalıcı mıknaatıslara (NdFeB, SmCo vb.) dönüştürülmesi aşamasında Çin, küresel üretimin yaklaşık %92'sini elinde tutmaktadır (Pitron, 2024). Örneğin 2024 verilerine göre, ABD'nin yıllık mıknaatıs üretim hacmi yalnızca bin ton civarındayken, Çin tek başına 300 bin ton üretim kapasitesine ulaşmıştır (MİA, 2025). Üretilen bu yüksek teknoloji ürünlerin ana tüketim merkezleri ise sırasıyla Çin, Japonya, ABD, Almanya ve Fransa'dır (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2020; TMMOB MMO, 2016). Çin'in "üret, kısıtla, lisansla" politikasıyla bu zinciri jeopolitik bir silah olarak kullanması, dünyanın geri kalanını tedarik coğrafyasını çeşitlendirmeye itmektedir (MİA, 2025; Pitron, 2024).

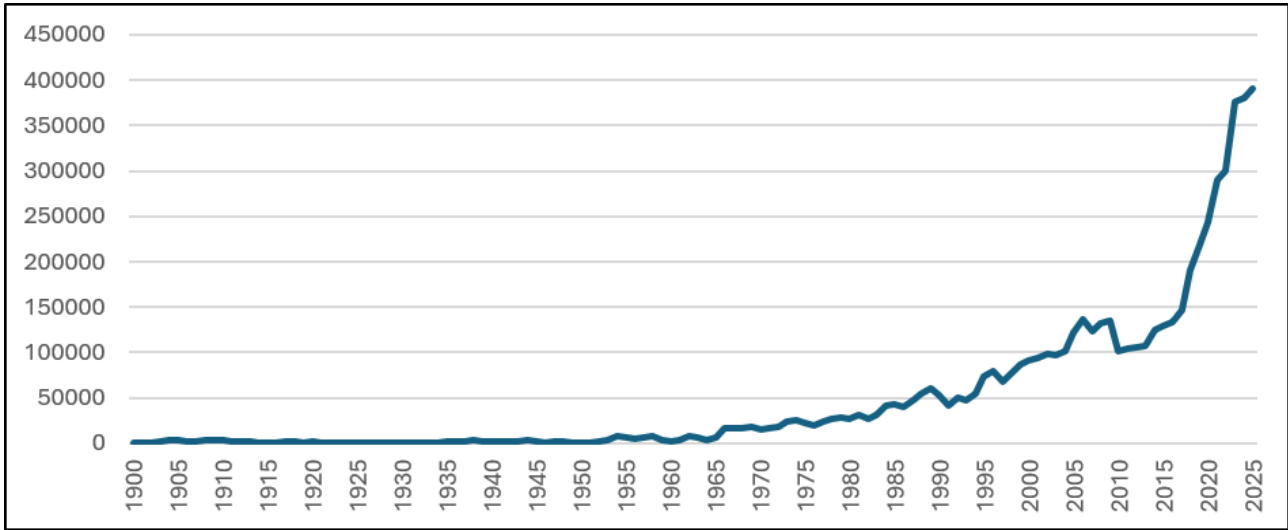
Küresel NTE pazarı, 2024-2025 döneminde yaklaşık 4 milyar ABD doları büyüklüğe ulaşmıştır. Piyasa araştırmalarına göre bu pazarın, elektrikli araçlar, rüzgâr enerjisi, savunma sanayisi ve ileri teknoloji uygulamalarındaki talep artışına bağlı olarak 2030 sonrasında 6-10 milyar ABD doları düzeyine ulaşması beklenmektedir (Fortune Business Insights, 2026). Bununla birlikte söz konusu veriler yalnızca NTE maden pazarını ifade etmekte olup bu hammaddelerden üretilen kalıcı mıknaatıslar ve diğer yüksek katma değerli ürünler dikkate alındığında ekonomik büyüklük çok daha yüksek seviyelere ulaşmaktadır.

### **Nadir Toprak Elementleri ve Jeopolitik Rekabet**

NTE'lerin üretim / talep dengesi incelendiğinde 20. yüzyılın başlarında sınırlı ekonomik öneme sahip bir maden grubundan, 21. yüzyılda enerji dönüşümü, dijitalleşme ve yüksek teknoloji üretiminin temel girdilerinden biri hâline geldiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle son yıllardaki keskin üretim artışı, NTE'lerin küresel ekonomi ve jeopolitik açısından stratejik öneminin giderek arttığını göstermektedir.

1950'li yıllara kadar düşük seviyelerde seyreden NTE üretimi, elektronik sanayisinin gelişmesi ve yüksek teknoloji ürünlerine olan talebin artmasıyla birlikte düzenli bir yükseliş göstermiştir. Özellikle 2000'li

yıllardan sonra üretim hızlanmış, 2020 sonrasında ise elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji teknolojileri ve kritik mineral politikalarının etkisiyle tarihsel olarak en yüksek seviyelerine ulaşmıştır (Şekil 1).



**Şekil 1.** Küresel ölçekte NTE üretimi (ton) (1900-2025)

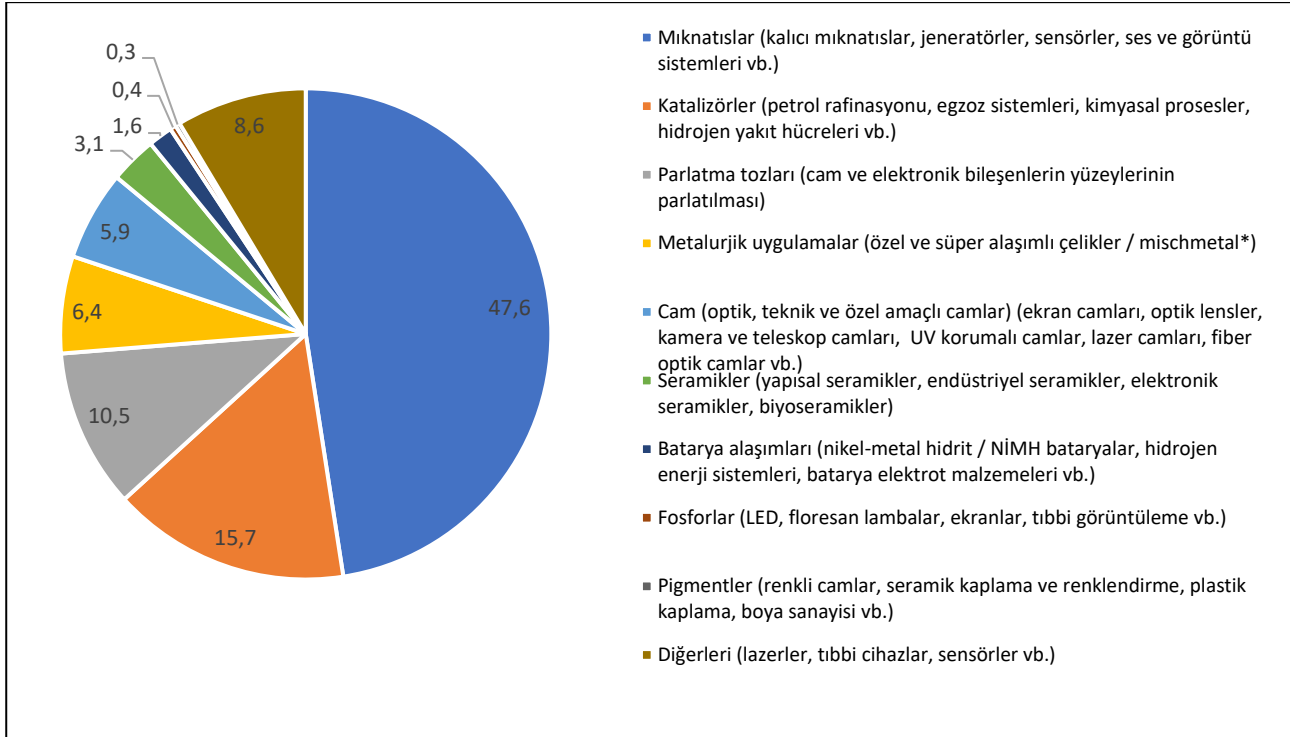
(USGS, 2024 (Rare Earths-Historical Statistics); USGS, 2023 (Mineral Commodity Summaries); USGS, 2024 (Mineral Commodity Summaries); USGS, 2025 (Mineral Commodity Summaries); USGS, 2026 (Mineral Commodity Summaries))

1950'li yıllardan itibaren NTE üretiminde bir artış eğilimi ortaya çıkmıştır. Bu artışta elektronik sanayisinin gelişmesi, Soğuk Savaş'ın da etkisiyle nükleer teknolojilerdeki ilerlemeler ve savunma sanayisinde NTE'lerin kullanımının yaygınlaşmasının etkili olduğu söylenebilir. Özellikle 1960-1980 döneminde üretim kademeli olarak artmış ve NTE'ler yüksek teknoloji sektörlerinin önemli girdileri hâline gelmeye başlamıştır.

1980'li yıllarda üretim artışı hız kazanmıştır. Ancak küresel ekonomideki istikrarsızlıklar, maden üretimiyle ilgili sorunlar ve piyasalardaki arz-talep dengesindeki değişimle zaman zaman düşüşlere de sebep olmuştur. 1990'lı yılların başında görülen kısa süreli gerilemenin ardından üretim yeniden yükselişe geçmiştir.

2000'li yıllarla birlikte ise üretim artışı daha belirgin hâle gelmiştir. Bu dönemde başta Çin olmak üzere Asya ülkelerinde NTE üretiminin hızla artması, küresel üretim miktarını önemli ölçüde yükseltmiştir. Elektronik cihazların yaygınlaşması, mükemmel teknolojilerindeki gelişmeler ve yeşil enerji yatırımları bu artışın başlıca nedenleri arasında yer almaktadır. 2020 sonrasındaki artış ise dikkat çekici boyutta gerçekleşmiştir. Bu dönemde üretim miktarı çok kısa sürede yaklaşık 150 bin ton seviyelerinden 390 bin ton düzeyine yükselmiştir. Beş yıllık süreçte gerçekleşen bu hızlı artış, küresel enerji dönüşümü, elektrikli araç üretimindeki büyüme, rüzgâr enerjisi yatırımlarının artması, savunma sanayisinde hızla artan talep, veri merkezleri ve yapay zekâ araçlarının ortaya çıkardığı taleple ilgili olduğu belirtilebilir.

NTE'ler, günümüzde yalnızca ekonomik değeri yüksek madenler olarak değil, aynı zamanda uluslararası güç mücadelesinin ve jeopolitik rekabetin belirleyici enstrümanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Akıllı telefonlar, yarı iletkenler, elektrikli araçlar, rüzgâr türbinleri, savunma sistemleri, radar teknolojileri ve uzay sanayi gibi stratejik sektörlerin temel girdileri arasında yer alan bu elementler, ülkelerin teknolojik kapasitesi ve ulusal güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle NTE'ler, enerji kaynaklarının 20. yüzyılda sahip olduğu stratejik konuma benzer şekilde, 21. yüzyılın kritik madenleri arasında gösterilmektedir. Bu bağlamda ulusal güvenliğin ayrılmaz parçası hâline gelen enerji güvenliği konusuna aynı zamanda maden güvenliği konusu da eklenmiştir. Şekil 2'de NTE'lerin nihai kullanım alanlarına (end-use applications) göre yüzdelik bazda oransal dağılımı görülmektedir.



Şekil 2. NTE'lerin nihai kullanım alanlarına göre dağılımı (%) (Natural Resources Canada, 2026)

\* NTE'lerden elde edilen alaşıma "mischmetal" denilmektedir.

NTE'leri kullanımının büyük ölçüde yüksek teknoloji, yeşil enerji teknolojileri, dijital teknolojiler ve ileri imalat endüstrisi etrafında yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle mıknatıs endüstrisinin toplam kullanımının yaklaşık yarısını oluşturması; elektrikli araçlar, rüzgâr enerjisi ve otomasyon teknolojilerindeki gelişmelerin gelecekte NTE talebini belirleyen en önemli faktörler olmaya devam edeceğine dair önemli veriler sunmaktadır. Bunun yanında katalizörler, parlatma tozları ve endüstriyel camlar gibi alanlar da NTE'lerin yalnızca enerji dönüşümünde değil elektronik, petrokimya ve hassas üretim teknolojilerinde de ikame edilemez girdiler olduğunu ortaya koymaktadır.

Jeopolitik ölçekte küresel rezervlerin ve özellikle işleme kapasitesinin belirli ülkelerde yoğunlaşmış olması NTE'lerin stratejik niteliğini artırmaktadır. Dünya genelinde birçok ülkede NTE rezervleri bulunmasına rağmen, üretim ve rafinasyon süreçlerinde uzun yıllardır Çin belirleyici bir konuma sahiptir. Çin'in küresel NTE üretimi ve işleme zincirindeki hâkimiyeti, bu ülkeye önemli bir ekonomik ve siyasi avantaj sağlamaktadır. Örneğin, 2010 yılında Çin ile Japonya arasında yaşanan diplomatik gerilim sonrasında Çin'in NTE ihracatına yönelik kısıtlamalar uygulaması, bu kaynakların dış politika aracı olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Çin, küresel NTE cevher üretiminin %60-71'ini, rafinaj ve ayırma kapasitesinin ise %85 ila %95'ini elinde bulundurarak değer zincirinin her aşamasında tartışılmaz bir tekel kurmuştur (MİA, 2025; American Resources Corporation, 2026; Pitron, 2024; Dilek & Binzat, 2025; Demir et. al, 2026).

Çin'in ileri görüşlü vizyonu, 1992 yılında dönemin lideri Deng Xiaoping'in "Orta Doğu'nun petrolü, Çin'in de NTE'leri var" sözüyle açıkça ortaya konmuştur. Pekin yönetimi, bu tekelini sıklıkla bir diplomatik baskı aracı ve "metal silahı" olarak kullanmaktadır (Pitron, 2024). Bunun en çarpıcı örneği, 2010 yılında Senkaku/Diaoyu Adaları krizinde Japonya'ya yönelik NTE ihracatını durdurarak küresel teknoloji sektöründe büyük bir şok yaratmasıdır (Pitron, 2024; MİA, 2025; Cebe vd., 2020). Çin, 4 Nisan 2025'te "üret, kısıtla, lisansla" politikası kapsamında samaryum, gadolinyum, terbiyum, disprosyum, lütesyum, skandiyum ve itriyum gibi kritik ağır ANTE'lerin ABD'ye ihracatını özel şartlara bağlayarak Batı'nın stok yönetimini zorlaştırmıştır (MİA, 2025; Erbay, 2026). ABD'nin en gelişmiş askeri platformları bu metallere doğrudan

bağımlıdır: Tek bir F-35 savaş uçağında yaklaşık 410 kg, bir Arleigh Burke sınıfı destroyerinde 2,36 ton ve bir Virginia sınıfı nükleer denizaltıda ise 4,17 ton NTE kullanılmaktadır. Tomahawk seyir füzeleri, radar ağları, akıllı bombalar / güdüm sistemleri ve gece görüş sistemleri de bu listeye dâhildir (MİA, 2025; Pitron, 2024).

Küresel enerji politikaları da NTE'lerin jeopolitik önemini artıran bir diğer faktördür. Fosil yakıt temelli enerji sistemlerinden yenilenebilir enerji teknolojilerine geçiş sürecinde elektrikli araçlar, enerji depolama sistemleri ve rüzgâr türbinlerine yönelik talep hızla artmaktadır. Bu teknolojilerin üretiminde kullanılan neodimyum, disprozyum, terbiyum ve praseodimyum gibi elementlere olan ihtiyaç ülkeler arasında kritik mineral tedariki konusunda yeni rekabet alanları ortaya çıkarmaktadır. Böylece enerji güvenliği kavramı yalnızca petrol ve doğal gaz arzını değil aynı zamanda kritik mineral ve NTE tedarikini de kapsayan daha geniş bir çerçeveye dönüşmektedir.

Bu gelişmeler karşısında ABD, Avrupa Birliği, Japonya, Avustralya ve Hindistan gibi ülkeler, Çin'e olan bağımlılığı azaltmak amacıyla yeni maden sahaları geliştirmekte, stratejik stoklar oluşturmaya ve alternatif tedarik zincirleri kurmaya çalışmaktadır. Özellikle ABD ve Avrupa Birliği tarafından yayımlanan kritik hammadde stratejileri, NTE'lerin ekonomik olduğu kadar ulusal güvenlik açısından da değerlendirildiğini göstermektedir. Bu sebeple NTEler küresel güç dengelerinin ve uluslararası ilişkilerin de önemli araştırma konularından biri hâline gelmiştir.

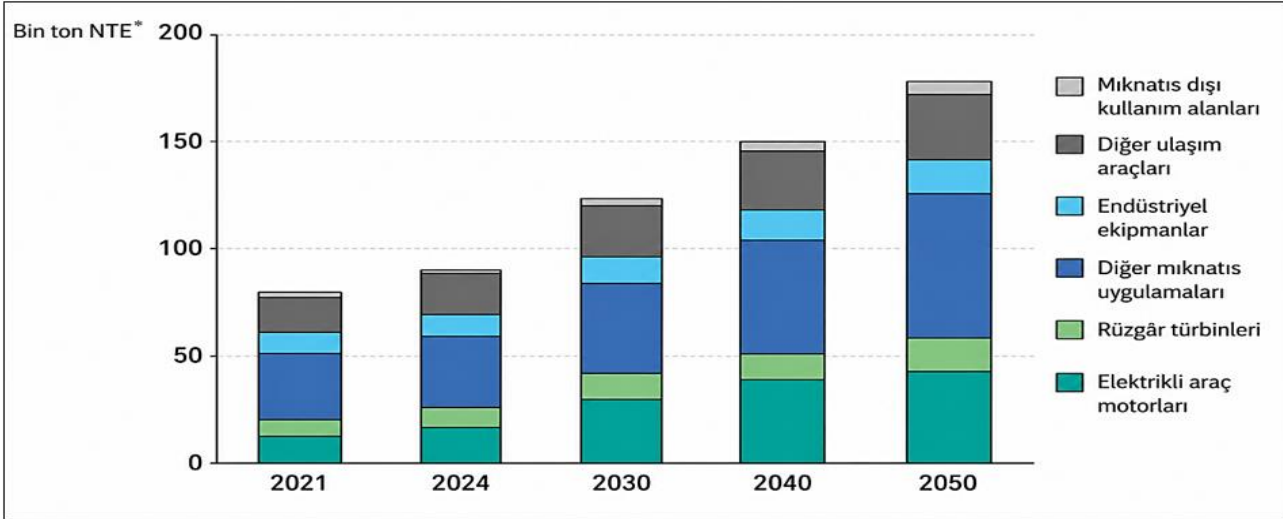
Küresel jeopolitik rekabetin en önemli boyutlarından biri ABD ile Çin arasında yaşanan teknoloji ve kritik mineral mücadelesidir. ABD, yarı iletkenler, savunma teknolojileri ve enerji dönüşümü açısından hayati öneme sahip NTE'lerde Çin'e olan bağımlılığını azaltmayı hedeflemektedir. Bu amaçla yeni maden projeleri geliştirilmekte, Avustralya ve Kanada gibi müttefik ülkelerle iş birlikleri kurulmakta ve alternatif tedarik ağları oluşturulmaktadır. Böylece NTE'ler, iki büyük güç arasındaki teknolojik ve ekonomik rekabetin temel unsurlarından biri hâline gelmiştir.

Avrupa Birliği (AB) ise yeşil dönüşüm hedeflerini gerçekleştirebilmek için güvenli ve sürdürülebilir kritik mineral tedarikine ihtiyaç duymaktadır. Bu kapsamda geliştirilen Kritik Hammaddeler Stratejisi ve Kritik Hammaddeler Yasası, AB'nin dışa bağımlılığını azaltmayı amaçlamaktadır. AB, yeni tedarik ortaklıkları kurmakta, geri dönüşüm faaliyetlerini teşvik etmekte ve stratejik rezervler oluşturmaya yönelmektedir. Bu politikalar, NTE'lerin yalnızca ekonomik değil aynı zamanda stratejik güvenlik konusu olarak değerlendirildiğini ortaya koymaktadır.

Yeşil Dönüşümün kalbi olarak nitelendirebilecek elektrikli araç motorları ve rüzgâr türbini jeneratörleri, son derece yüksek performanslı kalıcı mıknatıslara<sup>2</sup> (NdFeB) ihtiyaç duyar. Ayrıca akıllı cihazlar, tıbbi cihazlar, gelişmiş savunma sistemleri ve uzay endüstrisi sistemleri de kalıcı mıknatıslara ihtiyaç duymaktadır (Dilek & Binzat, 2025; MİA, 2025; Erbay, 2026). Bu mıknatısların üretiminde neodimyum (Nd), praseodimyum (Pr), disprozyum (Dy) ve terbiyum (Tb) gibi NTE'ler kullanılmaktadır (Dilek & Binzat, 2025; Mohammad et al., 2026; Demir et al., 2026) (Şekil 3). Söz konusu mıknatıslar, elektrik motorlarının boyut/güç oranını optimize ederek daha hafif araçların daha az enerjiyle daha fazla mekanik güç üretmesini (enerji verimliliğini) sağlarlar (Pitron, 2024; Kuveyttürk Yatırım, 2025).

---

<sup>2</sup> Dış bir enerji kaynağına ihtiyaç duymaksızın mıknatıslıklarını uzun süre koruyabilen ve sürekli bir manyetik alan oluşturan malzemelerdir. Kalıcı mıknatıslar; elektrik motorları, rüzgâr türbinleri, jeneratörler ve birçok yüksek teknoloji uygulamasının temel bileşenleri arasında yer alır.



Şekil 3. Belirlenmiş politikalar senaryosu (STEPS) kapsamında mıknatıs üretiminde kullanılan NTE'lere yönelik sektörel talep projeksiyonu (IEA, 2026)

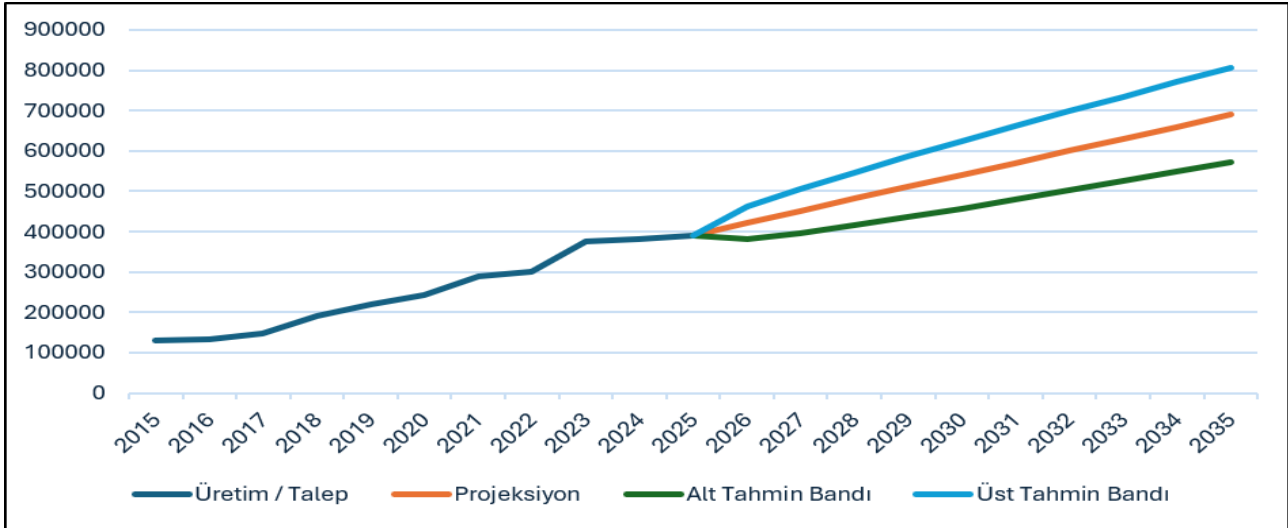
\* yalnızca mıknatıs üretiminde kullanılan NTE'leri (neodimyum, praseodimyum, disprosyum ve terbiyum) kapsamaktadır.

\* STEPS'e göre yalnızca temiz enerji uygulamalarının toplam NTE (neodimyum, praseodimyum, disprosyum ve terbiyum) talebi içindeki payının 2030'da %31, 2040'ta %32 ve 2050'de %32 olarak gerçekleşmesi beklenmektedir (IEA, 2024).

Bataryalar ve yeni nesil enerji depolama sistemlerinde lantan, seryum, praseodimyum ve neodimyum öne çıkmaktadır. Bu elementler, elektrikli ve hibrit araçların nikel-metal hidrür (NiMH) bataryalarında, katı oksit yakıt hücrelerinde (SOFC) ve hidrojen üretim/depolama sistemlerinde kritik bir rol oynamaktadır (Demir et al., 2026; Dilek & Binzat, 2025; Mohammad et al., 2026). Fotovoltaik panellerde ise yeni nesil Perovskit güneş hücrelerinde (Perovskite Solar Cells-PSC) ışık emilimini / verimliliği artırmak ve elektron taşıma katmanlarını güçlendirmek amacıyla seryum, neodimyum, praseodimyum, lantan ve itriyum gibi NTE'lerden faydalanılmaktadır (Demir et al., 2026; Dilek & Binzat, 2025).

Enerji verimliliği sağlayan aydınlatma ürünlerinin elektrik tüketimini kayda değer oranda düşüren kompakt floresan lambalar (CFL) ve LED aydınlatma teknolojilerinde renklerin (kırmızı, yeşil, mavi) parlak ve doğru bir şekilde elde edilebilmesi için fosfor tabakalarında evropiyum, terbiyum ve itriyum yoğun olarak kullanılmaktadır (Demir, et al., 2026; Dilek & Binzat, 2025; Şahiner vd., 2017).

Bu bağlamda NTE'lerin sahip olduğu geniş kullanım alanları, küresel ölçekte bu elementlere yönelik talebin önümüzdeki yıllarda güçlü bir artış eğilimi göstereceğine işaret etmektedir. Şekil 4'te NTE'lerin tümünü kapsayacak şekilde USGS üretim verileri esas alınarak ortaya çıkan talep projeksiyonu görülebilmektedir.



Şekil 4. USGS üretim verilerine göre NTE (tümü) talep projeksiyonu (ton)

{(USGS, 2024 (Rare Earths-Historical Statistics); USGS, 2023 (Mineral Commodity Summaries); USGS, 2024 (Mineral Commodity Summaries); USGS, 2025 (Mineral Commodity Summaries); USGS, 2026 (Mineral Commodity Summaries) ve Excel programından (forecast sheet) yararlanarak oluşturulmuştur}

Bu manada NTE'ler, rezervlerin mekânsal dağılışı, üretim merkezleri, ticaret ağları ve teknoloji üretim bölgeleri arasındaki ilişkiler nedeniyle küresel ölçekte yeni bağımlılık ilişkileri ortaya çıkarmaktadır. Bu elementlere erişim ve tedarik güvenliği, ülkelerin teknolojik rekabet gücü, sanayi politikaları ve ulusal güvenlik stratejileri açısından belirleyici faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir.

#### Nadir Toprak Elementleri Talebinin Çevresel Sonuçları

NTE'ler genellikle düşük tenörlü cevherler içerisinde bulunduğundan ekonomik olarak üretilebilmeleri için büyük miktarlarda kayaç ve toprağın işlenmesi gerekmektedir. Bu durum madencilik faaliyetlerinin çevre üzerindeki etkilerini artırmaktadır. Yeşil Enerjinin "Ekolojik Çelişkisi" NTE'lerin enerji dönüşümündeki bu tartışılmaz üstünlüğünün çok ciddi bir çevresel paradoksu bulunmaktadır. Temiz enerjiyi (güneş, rüzgar vb.) yakalamamızı sağlayan bu donanımların üretiminde kullanılan NTE'lerin yeraltından çıkarılması ve işlenmesi süreci; devasa boyutlarda su tüketen, kimyasal asitlerin kullanıldığı ve bazen uranyum/toryum gibi radyoaktif atıkların açığa çıktığı oldukça "kirli" bir sanayidir. Küresel karbon emisyonunu düşürmek için ihtiyaç duyduğumuz teknolojiler, ironik bir şekilde toprağı ve su kaynaklarını ağır şekilde kirleten bir madencilik modeline bağımlıdır (Pitron, 2024). NTE cevherlerinin önemli bir bölümü toryum ve uranyum gibi radyoaktif elementlerle birlikte bulunmakta; üretim ve zenginleştirme süreçlerinde bu elementlerin atık havuzlarında birikmesi, etkin biçimde yönetilmediği durumlarda çevre ve insan sağlığı açısından ciddi riskler oluşturabilmektedir (Zhu, Pranolo&Cheng, 2015).

Bununla birlikte NTE'lerin ayrıştırılması ve zenginleştirilmesi süreçlerinde çeşitli kimyasallar kullanılmaktadır. Bu kimyasalların uygun şekilde yönetilememesi durumunda yüzey ve yer altı su kaynaklarında kirlenme meydana gelebilmektedir. Asidik drenaj, ağır metal sızıntıları ve kimyasal atıklar su ekosistemleri üzerinde ciddi tehditler oluşturmaktadır. NTE'lerin doğada kimyasal olarak birbirine çok benzer yapıda bulunması, bu elementleri ayrıştırma sürecini maliyetli, teknolojik olarak zorlu ve çevresel açıdan oldukça riskli ("kirli") bir kimyasal endüstriye dönüştürmektedir (Pitron, 2024; KuveytTürk Yatırım, 2025). NTE'leri ham cevherden ve birbirlerinden ayırmak, hidrometalürjik süreçler adı verilen karmaşık kimyasal işlemleri gerektirir. Bu işlemler sırasında sülfürik asit, nitrik asit ve hidroklorik asit gibi son derece agresif ve zehirli kimyasallar kullanılır. Sadece 1 ton NTE'yi arıtmak için 30.000 metreküpten fazla su tüketilmektedir ve kullanıldıktan sonra bu sular asitler ve ağır metallerle yüklenerek toksik hâle gelmektedir (Mohammad et al., 2026; Pitron, 2024). Çin'de uygulanan "in-situ" (yerinde) madencilik gibi yöntemlerde, toprağın altına pompalanan amonyum sülfat çözeltileri yeraltı sularını ve toprağı ciddi şekilde kirletmekte, bölgedeki florayı

tamamen yok edebilmektedir (Pitron, 2024; Kalvig, 2022). Ayrıca bastnazit ve monazit gibi minerallerin yüksek sıcaklıklarda işlenmesi sırasında atmosfere karbondioksit (CO<sub>2</sub>), hidrojen florür (HF) ve kükürt tetraflorür (SF<sub>4</sub>) gibi zararlı gazlar salınmaktadır (DPT, 1995).

## Geri Dönüşüm

NTE'lere yönelik küresel talebin hızla artmasına karşın, doğrudan maden çıkarımı ve işlenmesine dayanan birincil üretimin sınırlı sayıdaki ülke ve maden sahasında yoğunlaşması, geri dönüşümün stratejik niteliğini her geçen gün artırmaktadır.

Günümüzde NTE geri dönüşümü, kullanım ömrünü tamamlamış elektrikli ve elektronik ekipmanlar, kalıcı mıknatıslar, elektrikli araç motorları, rüzgâr türbinleri, nikel-metal hidrit (NiMH) bataryalar, floresan lamba fosfor tozları ve kırmızı çamur (alüminyum üretimi sürecinde ortaya çıkan bir atık) ile kömür külleri gibi çeşitli endüstriyel atıklardan gerçekleştirilmektedir (Binnemans et al., 2013; Mohammad et al., 2026).

NTE'lerin ürünler içerisinde düşük konsantrasyonlarda bulunması, karmaşık alaşım ve bileşik yapılarından geri dönüşüm sağlamanın teknik güçlükleri ile ekonomik maliyetleri küresel NTE geri dönüşüm oranının düşük düzeyde kalmasını beraberinde getirmektedir. Nitekim IEA 2022 verisine göre NTE'lerdeki geri dönüşüm oranı %1'in altındadır. Buna rağmen yalnızca NTE'ler bazında değil madenlerde geri dönüşüm sektörü, birincil madencilığe olan bağımlılığı azaltması / azaltma potansiyeli barındırması, kritik hammaddelerin arz güvenliğini güçlendirmesi, olumsuz çevresel etkileri minimize etmesi bakımından sürdürülebilirliğin temel unsurlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Ancak her ne kadar madenlerin geri kazanımının hammadde şeklindeki madenlere olan talebi azaltma misyonu olsa da bu konudaki maliyetler ve teknolojik güçlükler geri dönüşümün ancak sınırlı bir düzeye sahip olabileceğini, %100 oranında bir geri dönüşümün mümkün olmadığını ortaya koymaktadır (Oral, 2025). Avrupa Birliği, Japonya, ABD ve Çin başta olmak üzere birçok ülke, kritik mineral politikaları kapsamında geri dönüşüm altyapısına yatırım yapmakta ve kullanım ömrünü tamamlamış ürünlerden NTE geri kazanımını teşvik eden düzenlemeler geliştirmektedir.

## Yöntem

Bu çalışmanın temel amacı, NTE'leri coğrafi bir perspektiften ele alarak rezervlerin mekânsal dağılışını, üretim coğrafyasını, kullanım alanlarını, küresel talep eğilimlerini, jeopolitik etkilerini ve ortaya çıkardığı çevresel sonuçları bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmektir. Bunun yanı sıra, enerji dönüşümü ve dijital teknolojilerin yaygınlaşmasının NTE'lere yönelik talep üzerindeki etkilerini incelemek, küresel üretim ve işleme faaliyetlerinin mekânsal örüntülerinin neden olduğu stratejik riskleri analiz etmek ve sürdürülebilir kaynak yönetimine dair değerlendirmede bulunmak çalışmanın temel amaçları arasında yer almaktadır.

Araştırmada nitel araştırma yöntemi kullanılmış olup veri toplama tekniği olarak doküman analizinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda alan yazındaki çeşitli eserlerin yanında ilgili uluslararası kuruluşların raporları ve istatistiksel veri setleri incelenmiştir. Araştırmada kullanılan dokümanların seçiminde kaynakların güvenilirliği, bilimsel niteliği, konu ile ilişkisi, güncelliği temel ölçütler olarak benimsenmiştir. Elde edilen veriler değerlendirilmiş; rezerv, üretim, talep ve kullanım alanlarına ilişkin güncel istatistikler coğrafi bakış açısıyla analiz edilmiştir. Bulgular, coğrafi perspektifte değerlendirilerek maden arz güvenliği, sürdürülebilirlik ve jeopolitik bağlamda değerlendirilmiştir. Bu yönüyle araştırmanın doğal kaynak dağılımı, teknolojik kapasite ve jeopolitik güç ilişkileri arasındaki etkileşimi vurgulayarak maden coğrafyası ve siyasi coğrafya disiplinlerine katkı sunması öngörülmektedir.

Araştırmanın başlıca sınırlılığı, NTE sektörüne ilişkin küresel verilerin farklı kurumlar tarafından farklı ölçü birimi ve üretim aşamalarına göre sunulmasıdır. Rezerv, maden üretimi, nadir toprak oksitleri, işlenmiş ürünler ve nihai ürünlere ilişkin verilerin aynı kapsamı ifade etmemesi verilerin analizinde dikkatli olunmasını gerektirmektedir. Ayrıca bazı ülkelere dair rezerv, tenör veya üretim verilerinin güncel ve düzenli olarak yayımlanmaması veri boşluklarına neden olmaktadır.

### Bulgular

\*Araştırma bulguları, NTE'lerin yerkabuğunda yaygın olarak bulunmasına rağmen ekonomik olarak işletilebilir rezervlerin ve üretim faaliyetlerinin belirli ülkelerde yoğunlaştığını ortaya koymaktadır. Küresel rezerv dağılışı incelendiğinde Çin, Brezilya, Hindistan, Avustralya, Rusya, Vietnam ve ABD'nin önemli rezervlere sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte rezerv büyüklüğü ile üretim kapasitesi arasında doğrudan bir ilişki bulunmamaktadır.

Özellikle Çin, rezerv miktarı bakımından tek başına mutlak üstünlüğe sahip olmamasına rağmen üretim, ayrıştırma, rafinasyon ve ileri işleme teknolojilerindeki gelişmiş altyapısı sayesinde küresel tedarik zincirinin merkezinde yer almaktadır.

Türkiye'nin sahip olduğu NTE rezervlerinin stratejik bir fırsat sunabileceği görülmektedir. Beylikova sahasında belirlenen rezervler, Türkiye'nin kritik mineraller alanındaki konumunu güçlendirebilecek önemli bir kaynak niteliğindedir. Ancak küresel rekabet koşulları dikkate alındığında yalnızca rezerv varlığına / cevher üretimine dayalı bir yaklaşımın yeterli olmayacağı, NTE kaynaklarının yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülmesini sağlayacak atılımların hayati önemde olduğu anlaşılmaktadır.

\*Araştırmada incelenen kullanım alanları, NTE'lerin günümüzde yüksek teknoloji üretiminin temel girdileri arasında yer aldığını göstermektedir. Kalıcı mıknatıslar, elektrikli araç motorları, rüzgâr türbinleri, yarı iletkenler, savunma sanayisi, uzay-havacılık sistemleri, optik ve teknik camlar, gelişmiş seramikler, metalurji, katalizörler, batarya alaşımları, fosforlar ve pigmentler NTE'lerin başlıca kullanım alanlarını oluşturmaktadır. Özellikle kalıcı mıknatıs üretiminin toplam NTE talebinin en büyük bölümünü oluşturduğu görülmektedir. Neodimyum, praseodimyum, disprosyum ve terbiyumun yüksek performanslı mıknatıslarda yoğun olarak kullanılması, enerji dönüşümü sürecinde bu elementlere olan talebin diğer NTE'lere göre daha hızlı artacağını göstermektedir. Talep projeksiyonları değerlendirildiğinde ise yenilenebilir enerji yatırımları, elektrikli araç üretimi, tüm stratejik sektörlerde yapay zekâyı kapsayan dijital teknolojilerin yaygınlaşmasına bağlı olarak NTE talebinin uzun vadede istikrarlı biçimde artacağı görülmektedir.

\*Araştırmanın en önemli bulgularından biri, NTE'lerin klasik bir maden hammaddesi olmanın ötesinde jeostratejik bir güç unsuru hâline geldiğidir. Özellikle Çin'in madencilikten ayrıştırmaya, rafinasyondan kalıcı mıknatıs üretimine kadar uzanan bütünleşik üretim yapısı, küresel tedarik zincirinde belirleyici bir üstünlük sağlamaktadır. Bulgular, ABD, Avrupa Birliği, Japonya ve Güney Kore gibi teknoloji üretiminde önde gelen ülkelerin kritik minerallerde dışa bağımlılığı azaltmaya yönelik politikalarını hızlandırdığını göstermektedir. Son yıllarda geliştirilen kritik mineral stratejileri, yalnızca yeni maden sahalarının işletmeye açılmasını değil, aynı zamanda tedarik zincirinin çeşitlendirilmesini, ayrıştırma tesislerinin kurulmasını ve yüksek katma değerli üretimin desteklenmesini hedeflemektedir. Öte yandan ANTE'lerin ayrıştırılmasının Çin dışında hâlen sınırlı olması, küresel arz güvenliğini etkileyen en önemli yapısal sorunlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, NTE'lerin yalnızca ekonomik değil aynı zamanda jeopolitik rekabetin merkezinde yer alan stratejik mineraller olduğunu göstermektedir.

\*Araştırmada elde edilen bulgular, NTE madenciliğinin çevresel etkilerinin sürdürülebilir madencilik açısından önemli sorunlar oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Cevherlerin düşük tenörlü olması nedeniyle büyük miktarda kazı yapılması, yoğun kimyasal kullanımının gerekli olması ve bazı yataklarda toryum ile uranyum gibi radyoaktif elementlerin bulunması çevresel riskleri artırmaktadır. Atık yönetimi, su kirliliği, toprak bozulması ve radyoaktif atıkların kontrolü üretim sürecinin en kritik çevresel sorunları arasında yer almaktadır. Bunun yanında küresel ölçekte NTE geri dönüşüm oranları hâlen oldukça düşük seviyelerdedir.

### Tartışma ve Sonuç

NTE'ler, günümüzde yalnızca belirli sanayi kollarında kullanılan mineral hammaddeler olmaktan çıkmış; enerji dönüşümü, dijitalleşme, yüksek teknoloji üretimi ve savunma sanayisinin temel bileşenleri hâline gelerek küresel ekonomik ve jeopolitik sistemin stratejik unsurlarından biri olmuştur. Akıllı telefonlardan elektrikli araçlara, rüzgâr türbinlerinden uzay teknolojilerine, yarı iletkenlerden nükleer enerji sistemlerine

kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan bu elementler, teknolojik gelişmenin sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmez bir konuma ulaşmıştır. Bu durum, NTE'lerin ekonomik değerini artırırken küresel sosyoekonomik sistemin işleyişinde ihtiyaç duyulan diğer madenlerde olduğu gibi NTE'lerin coğrafi dağılışı ile küresel güç ilişkileri arasındaki ilişkiyi daha görünür hâle getirmiştir.

NTE'lerin en dikkat çekici özelliklerinden biri, jeolojik olarak dünyanın birçok bölgesinde bulunmalarına rağmen ekonomik olarak işletilebilir rezervlerin ve özellikle ayrıştırma kapasitesinin sınırlı sayıdaki ülkede yoğunlaşmasıdır. Bu durum, mekân-ekonomi arasındaki etkileşimin önemli bir örneğini oluşturmaktadır. Özellikle ANTE'lerin (terbiyum, disprosyum, holmiyum, erbiyum, tulyum, itterbiyum, lütesyum ve itriyum) sınırlı sahalarda bulunması ve bunların ayrıştırılmasının ileri teknoloji gerektirmesi, rezerv varlığından çok işleme teknolojisi ve sanayi altyapısının stratejik önem taşıdığını göstermektedir. Dolayısıyla NTE'lerin küresel değer zinciri yalnızca rezerv miktarı ve bu rezervlerin dağılışı ile değil, teknolojik bilgi birikimi, sermaye, lojistik ağlar ve devletlerin politikalarıyla birlikte şekillenmektedir.

Küresel üretim ve işleme faaliyetlerinin uzun yıllardır büyük ölçüde Çin'de yoğunlaşmış olması, NTE'leri jeopolitik rekabetin merkezindeki kritik hammaddelerden biri hâline getirmiştir. Son yıllarda ABD, Avrupa Birliği, Japonya, Avustralya ve diğer birçok ülke tarafından geliştirilen kritik mineral stratejileri, yalnızca yeni maden sahalarının işletmeye açılmasını değil tedarik zincirlerinin çeşitlendirilmesini, yerli ayrıştırma kapasitesinin geliştirilmesini ve geri dönüşüm teknolojilerine de yatırım yapılmasını hedeflemektedir. Bu gelişmeler, gelecekte rekabetin yalnızca rezerv sahipliği üzerinden değil, işleme teknolojileri, ileri malzeme üretimi, stratejik stoklama ve döngüsel ekonomi uygulamaları üzerinden de şekilleneceğini göstermektedir.

Enerji dönüşümünün hız kazanmasıyla birlikte elektrikli araçlar, rüzgâr enerjisi santralleri, enerji depolama sistemleri ve yüksek verimli elektrik motorlarına yönelik yatırımların artması, özellikle neodimyum, praseodimyum, disprosyum ve terbiyum gibi kalıcı mıknatıs üretiminde kullanılan NTE'lere olan talebin uzun vadede artmaya devam edeceğine işaret etmektedir. Talep projeksiyonları, küresel ölçekte temiz enerji teknolojilerinin yaygınlaşmasına paralel olarak NTE'lere olan ihtiyacın önümüzdeki yıllarda da güçlü bir yükseliş eğilimi göstereceğini ortaya koymaktadır. Buna karşın yeni madenlerin devreye alınmasının zaman alması, ayrıştırma kapasitesindeki yetersizlikler ve ANTE'lerin arzındaki kırılganlık; yakın, orta ve uzun vadede arz güvenliği açısından önemli riskler oluşturmaya devam edecektir.

Bununla birlikte, NTE'lerin ekonomik ve teknolojik öneminin artması, çevresel sürdürülebilirlik açısından da yeni sorumlulukları beraberinde getirmektedir. Madencilik faaliyetleri sırasında oluşan atıklar, yüksek su tüketimi, kimyasal kullanımına bağlı çevresel riskler ve bazı cevherlerin toryum ile uranyum gibi radyoaktif elementlerle birlikte bulunması, üretim süreçlerinin etkin çevre yönetimi ilkeleri doğrultusunda yürütülmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çerçevede geri dönüşüm, NTE'lerin sürdürülebilir yönetiminde stratejik bir araç olarak öne çıkmaktadır. Kullanım ömrünü tamamlamış elektrikli ve elektronik ekipmanlar, kalıcı mıknatıslar, bataryalar ve diğer teknolojik ürünler (electronic waste / e-atık) önemli bir ikincil kaynak potansiyeli sunmaktadır. Geri dönüşüm teknolojilerindeki ilerlemelerin hem birincil madencilğe olan bağımlılığı azaltması hem de kritik hammaddelerin arz güvenliğini güçlendirmesi beklenmektedir. Bu durum çevresel etkilerin sürdürülebilirlik çerçevesinde yönetilmesi açısından kayda değer kazanımlar getirebilecektir. Ancak hâlihazırda NTE geri dönüşüm oranlarının son derece düşük olduğu (IEA 2022 verisine göre NTE'lerdeki geri dönüşüm oranı %1'in altındadır), geri dönüşüm teknolojilerinin ve maliyetlerinin güçlükler barındırdığı da unutulmamalıdır.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde ise Beylikova başta olmak üzere sahip olunan NTE potansiyeli önemli bir fırsat sunmaktadır. Ancak küresel rekabet koşulları dikkate alındığında, yalnızca rezerv varlığı tek başına stratejik üstünlük getirmemektedir. Asıl katma değer; cevherin ayrıştırılması, yüksek saflıkta oksit ve metal üretimi, kalıcı mıknatıs teknolojileri, ileri malzeme geliştirme kapasitesi ve bu alanları destekleyecek nitelikli insan kaynağının oluşturulmasıyla elde edilecektir. Bu nedenle Türkiye'nin madencilik politikalarının sanayi-teknoloji-Ar-Ge ve enerji politikalarını birlikte ele alacak şekilde bütüncül bir yaklaşımla ele alınması hayati niteliktedir. Bu doğrultuda, yalnızca maden üretimine odaklanan bir yaklaşım yerine cevherin yüksek katma

değerli ürünlere dönüştürülmesini sağlayacak ayrıştırma ve rafinasyon altyapısının geliştirilmesi, kalıcı mıknatıs ve ileri teknoloji malzemelerinin yerli üretiminin teşvik edilmesi ve bu konuda Ar-Ge yatırımlarının artırılması, ilgili kurumların işlevselliğinin artırılması ve güçlendirilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda kritik maden<sup>3</sup> tedarik zinciri ve arz güvenliğine dair ulusal bir stratejinin oluşturulması büyük önem taşımaktadır.

Bu konuda gelecekte başarı sağlayacak ülkeler, yalnızca bu kaynaklara sahip olanlar değil, onları çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda işleyebilen, yüksek katma değerli ürünlere dönüştürebilen ve küresel tedarik zincirlerinde etkin rol üstlenebilen ülkeler olacaktır. Nihai bağlamda değerlendirildiğinde NTE'ler, 21. yüzyılın stratejik belirleyicilerden biri olmayı sürdürecektir.

---

<sup>3</sup> T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, NTE'leri kritik madenler grubunda değerlendirmektedir.

### Kaynakça

- American Resources Corporation (AREC) (2026). *Leading the critical mineral and rare earth supply chain*. AREC Publication.
- Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 51, 1-22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>
- British Geological Survey (BGS) (2025). *Global rare earth element mines, deposits and occurrences map*. <https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/global-rare-earth-element-mines-deposits-and-occurrences-map/>
- Cebe, I. Z., Karvan, Z., Yolveren, O., Çimen, O. (2020). *Nadir toprak elementleri, Orta Asya'daki cevherleşme alanları: Türkiye için olası iş birlikleri. B.' enerji notları BEN*. 39. Bilkent Üniversitesi. İktisadi, İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi.
- Chavan, S. (2026). *Metals & minerals / rare earth elements (REE) market*. <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/rare-earth-elements-market.asp>
- Çimen, O. & Dönmez, C. (2026). Nadir toprak elementlerinin jeolojik oluşum ortamları: Dünya ve Türkiye'den örnekler. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 69(2), 225-256. [doi:10.25288/tjb.1845293](https://doi.org/10.25288/tjb.1845293)
- Demir, I., Ayten, A.M., Top, S., Altiner, M., Kursunoğlu, S. (2026). Rare earth elements in the global economy: usage, recovery and the quest for supply security-a review. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 43, 2061-2092. <https://doi.org/10.1007/s42461-026-01559-3>
- Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) (1995). *Madencilik özel ihtisas komisyonu endüstriyel hammaddeler alt komisyonu nadir toprak elementleri çalışma grubu raporu*. DPT Yayını.
- Dilek, C.A. & Binzet, G. (2025). *Nadir toprak elementleri ve geleceği: küresel rekabet, stratejik kaynaklar ve jeopolitik etkileri*. Akademisyen Yayınevi.
- Erbay, C. (2026). *Çip savaşları ve nadir toprak elementleri*. Milli İstihbarat Akademisi.
- Fortune Business Insights (2026). *Metals & minerals / rare earth elements market*. <https://www.fortunebusinessinsights.com/rare-earth-elements-market-102943>
- International Energy Agency (IEA) (2022). *The role of critical world energy outlook special report minerals in clean energy transitions*. IEA Publication.
- International Energy Agency (IEA) (2024). *Global critical minerals outlook*. IEA Publication.
- International Energy Agency (IEA) (2026). *Rare earth elements pathways to secure and diversified supply chains*. IEA Publication.
- Jha, A.R. (2014). *Rare earth materials: properties and applications*. CRC Press.
- Kalvig, P. (2022). *Rare earth elements (ree) geology, technologies, and forecasts*. Center For Minerals And Materials Geological Survey of Denmark And Greenland (GEUS) Publication.
- KuveytTürk Yatırım (2025). *Nadir elementler ve Türkiye'nin Beylikova keşfi*. KuveytTürk Yatırım Yayını.
- Millî İstihbarat Akademisi (MİA) (2025). *Nadir toprak elementleri ve Türkiye: jeopolitik satrançta yeni dinamikler ve aktörler*. MİA Yayını.
- Mohammad, R., Appiah, E. S., Abekah, O. B., Moomen, A.W., Ayamba, O., Akinwamide, S. O., Commeh, M. K., Ampomg, D. N., Mensah-Darkwa, K., Andrews, A., Makgopa, K., & Gupta, R. K. (2026). Advances in rare earth mineral extraction from waste for energy storage applications: A comprehensive

- review. *Process Safety and Environmental Protection*, 208, 108501. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2026.108501>
- Natural Resources Canada (2026). *Rare earth elements facts*. <https://natural-resources.canada.ca/minerals-mining/mining-data-statistics-analysis/minerals-metals-facts/rare-earth-elements-facts>
- Oral, M. (2025). %100 Yeşil enerji ne kadar rasyonel?. *The Journal of Academic Social Science Studies (JASSS)*, 18(106), 355-376. <http://dx.doi.org/10.29228/JASSS.88052>
- Pitron, G. (2024). *Nadir metaller savaşı: enerji geçişinin ve dijitalleşmenin karanlık yüzü*. (çev. Alp Tümertekin). Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları.
- Science History Institute (2026). *History and future of rare earth elements: what are the rare earth elements, and where do they come from?*. <https://www.sciencehistory.org/education/classroom-activities/role-playing-games/case-of-rare-earth-elements/history-future/>
- Şahiner, M., Akgök, Y.Z., Arslan, M., Ergin, M.H. (2017). *Dünyada ve Türkiye’de nadir toprak elementleri (NTE)*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Yayını.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2020). *Nadir toprak elementleri raporu*. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Yayını.
- TMMOB MMO (2016). *Nadir toprak elementleri*. N. Yıldız (Ed.). TMMOB MMO Yayını.
- Tural, S. & Tural, B. (2025). Nadir toprak elementleri: modern dünyanın sessiz kahramanları. S. Tural, Y.K. Haspolat, B. Tural (Ed.). *Nadir toprak elementleri: gizli güçler-1* içinde (s.1-32). Orient Yayınları.
- U.S. Geological Survey (USGS) (2014). *The rare-earth elements-vital to modern technologies and lifestyles*. USGS Publication.
- U.S. Geological Survey (USGS) (2023). *Mineral commodity summaries*. USGS Publication.
- U.S. Geological Survey (USGS) (2024). *Mineral commodity summaries*. USGS Publication.
- U.S. Geological Survey (USGS) (2024). *Rare earths-historical statistics*. <https://www.usgs.gov/media/files/rare-earths-historical-statistics-data-series-140>
- U.S. Geological Survey (USGS) (2025). *Mineral commodity summaries*. USGS Publication.
- U.S. Geological Survey (USGS) (2026). *Mineral commodity summaries*. USGS Publication.
- Zhu, Z., Pranolo, Y. & Cheng, C.Y. (2015). Separation of uranium and thorium from rare earths for rare earth production-A review. *Minerals Engineering*, 77, 185-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.012>