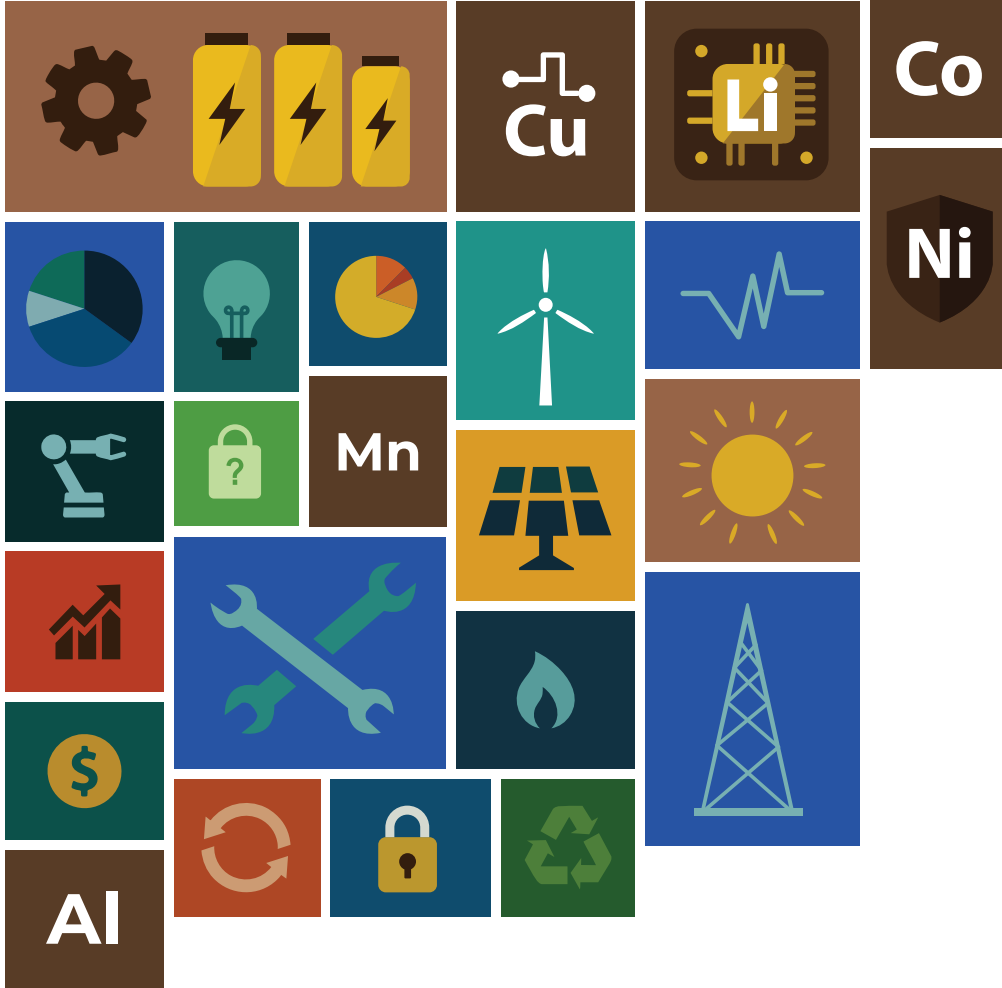


KRİTİK MİNERALLER

YENİ TEKNOLOJİ ÇAĞININ GİZLİ GÜCÜ



KRİTİK MİNERALLER

YENİ TEKNOLOJİ ÇAĞININ GİZLİ GÜCÜ

Hazırlayan

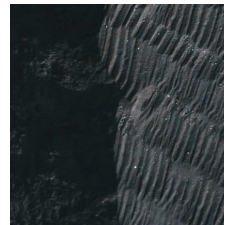
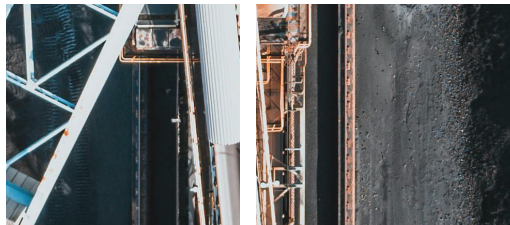
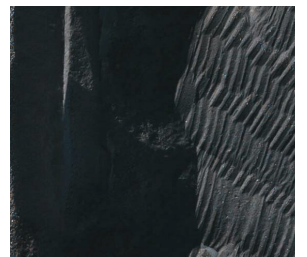
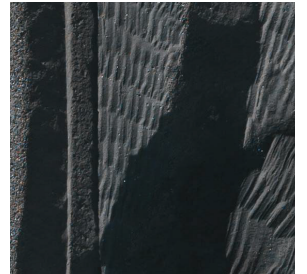
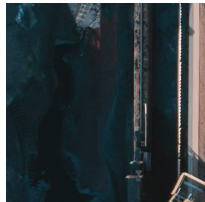
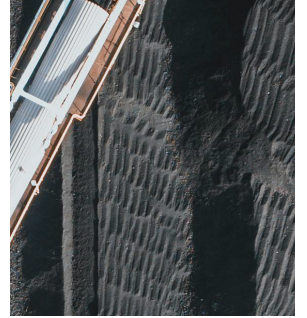
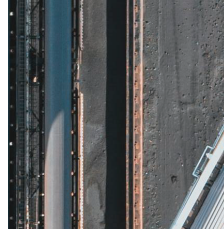
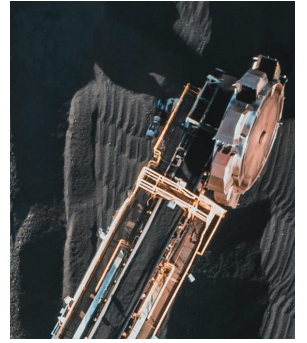
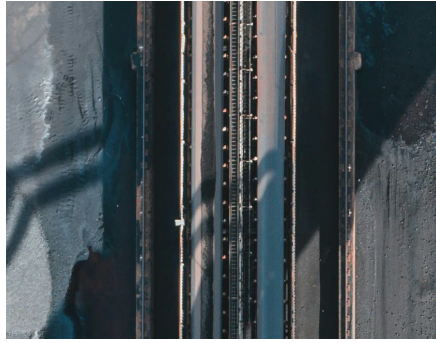
Bingöl Satıoğlu

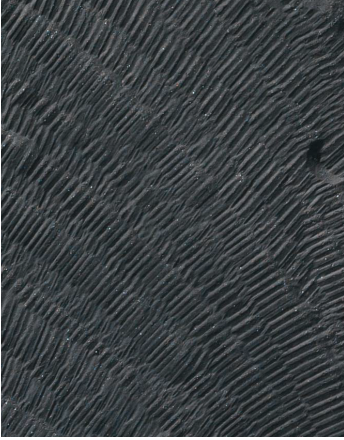
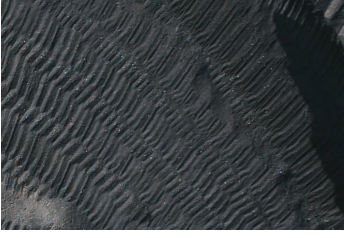
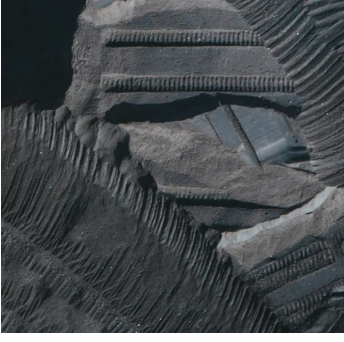
Grafik Tasarım

Melike Özkara



İSTANBUL, 2025





İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ

2. FIRSATLAR ÇERÇEVESİNDE KRİTİK MİNERALLER:
TANIM, KAPSAM VE KULLANIM ALANLARI

3. KRİTİK MİNERALLER
KAPSAMINDAKİ RİSKLER

4. SONUÇ

YÖNETİCİ ÖZETİ

EXECUTIVE SUMMARY

İnsanlık tarihini değiştiren dönüm noktalarında madenler ve enerji kaynakları belirleyici rol oynamıştır. Sanayi Devrimi'nin lokomotif kömür iken 20. yüzyılın siyasal ve ekonomik dönüşümünde petrol küresel güç unsuru haline gelmiştir. Kömür ve petrol hâlâ son sözlerini söylememiş olsalar da çağın teknolojik gelişmelerine artık lityum, kobalt, grafit ve nadir toprak elementleri gibi kritik mineraller yön vermektedir.

Kritik mineraller; X-ray cihazlarından denizaltılara, batarya depolama sistemlerinden güçlü mıknatıslara kadar pek çok teknolojinin ikame edilemez girdisi olarak kullanılmaktadır. Bu mineraller ayrıca yeşil ve dijital dönüşüm olarak adlandırılan “*ikiz dönüşüm*” sürecinde de stratejik bir role sahiptir. Bir elektrikli aracın içten yanmalı motora kıyasla altı kat daha fazla mineral gerektirmesi ya da temiz enerji teknolojilerine (rüzgâr türbinleri, güneş panelleri, batarya sistemleri vb.) yönelik talebin 2040 yılına kadar en az dört kat artacağına öngörülmesi bu stratejik önemin en somut göstergelerindedir.

Kritik mineralleri “kritik” yapan en belirleyici unsur ise küresel tedarik zincirinde yaşanan yüksek derecedeki kırılganlıktır. Bu kaynakların çıkarılması, işlenmesi ve rafinasyonun belirli coğrafi bölgelerde yoğunlaşması, ciddi arz güvenliği riski oluşturmaktadır. Örneğin küresel lityum üretiminin yaklaşık %77'si Avusturalya, Çin ve Şili tarafından gerçekleştirilmektedir. Benzer şekilde kobalt üretiminin %67'si Demokratik Kongo Cumhuriyeti'nde ve nikel üretiminin ise %63'ü Endonezya'da yoğunlaşmıştır.

Kritik minerallerin işlenmesi ve rafinasyonunda ise Çin, küresel lider konumundadır. Ülke yıllar boyu uygulamış olduğu düşük maliyet, gevşek çevre standartları, devlet destekleri ve

Throughout history, minerals and energy sources and minerals have played a decisive role in the turning points of civilizations. While coal was the driving force of the Industrial Revolution, oil became a global power element in the political and economic transformation of the 20th century. Although coal and oil have not yet spoken their final word, today's technological advancements are increasingly being shaped by critical minerals such as lithium, cobalt, graphite, and rare earth elements.

Critical minerals are indispensable inputs in various technologies, from X-ray devices to submarines, battery storage systems, and powerful magnets. They play a particularly strategic role in the so-called “*twin transition*” process of green and digital transition. The fact that an electric vehicle requires six times more minerals compared to an internal combustion engine, or that demand for clean energy technologies (such as wind turbines, solar panels, and battery systems) is projected to increase at least fourfold by 2040, is the clearest indicator of this dependency.

The most decisive factor that makes critical minerals “critical” is the high degree of vulnerability within global supply chains. The extraction, processing, and refining of these resources are heavily concentrated in specific geographic regions, creating significant risks for supply chain security. For instance, approximately 77% of global lithium production is carried out by Australia, China and Chile. Similarly, 67% of cobalt production is concentrated in the Democratic Republic of Congo, while 63% of nickel production takes place in Indonesia.

In processing and refining, China has

birleşme ve satın alma politikaları ile bu pazarı domine eder hale gelmiştir. Gelineen noktada ise batarya kalitesinde grafitin %95'i, güneş panellerinde kullanılan terbiyumun %99'u, disprosyum ve gadolinyumun %98'i, jet motorlarında kullanılan samaryumun %97'si Çin tarafından rafine edilmektedir.

Bu durum ülkeye yalnızca üretim ve ihracat temelli avantajı sağlamakla da kalmıyor. Pekin yönetimi bu kaynaklara erişimi dış politika ve ticaret müzakerelerinde etkin bir stratejik enstrüman olarak kullanıyor. Özellikle nadir toprak elementlerine yönelik getirilen ihracat kısıtlamaları ve çeşitli ticaret kontrolleri ile Çin, başta ABD ile olan ticaret savaşında üstünlük sağlamaya çalışıyor.

Söz konusu kontroller ise reel sektörü hem fiyatlar hem de üretim konusunda sıkıntıya düşürüyor. Örneğin Çin'in AB ülkelerine yönelik antimon sevkiyatını durdurması, söz konusu mineralin fiyatını %300'den fazla yükseltmiş, bazı otomotiv üreticileri ise elektrikli araç hatlarını geçici olarak kapatmak zorunda kalmıştır.

Bunların yanında kritik minerallerin madencilik faaliyeti olması çevresel ve toplumsal riskleri de beraberinde getiriyor. Su kaynaklarının kirlenmesi, ekosistemlerin tahribi ve biyolojik çeşitliliğin azalması gibi olumsuzluklar ikiz dönüşüm ile ekolojik tahribatın iç içe geçtiğini de gösteriyor. Ayrıca kaynakların çoğunlukla insan hakları açısından zayıf performansa sahip bölgelerde yoğunlaşması, zorunlu göçler ve sosyal adaletsizlikler de çeşitli sosyal riskler arasında yer alıyor.

Bu anlamda bu minerallerin sundukları fırsatların ve faydaların sürdürülebilirliği ve risklerin hafifletilmesi yalnızca teknolojik çözümlerle değil, jeopolitik bağımlılığın azaltılması, ekolojik maliyetlerin düşürülmesi ve toplumsal sorumlulukların eşit şekilde üstlenilmesi ile sağlanabilecektir. Aksi halde çağın teknolojisinin arkasındaki gizli güç olan bu kritik mineraller, çağın en büyük kırılganlığına dönüşebilirler.

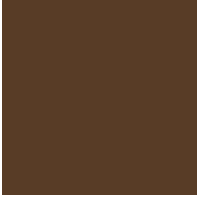
emerged as the global leader. Through years of pursuing low-cost, loose environmental regulations, subsidies, and merger-and-acquisition policies, the county has come to dominate this market. Today, China refines 95% of battery-grade graphite, 99% of terbium used in solar panels, 98% of dysprosium and gadolinium, and 97% of samarium used in jet engines are refined by China.

This situation provides the country with advantages in production and exports. It enables Beijing to use access to these resources as an effective strategic instrument in foreign policy and trade negotiations. Primarily through export restrictions and various trade controls on rare earth elements, China has sought to gain an upper hand in its trade war with the United States.

However, such controls place the real sector under strain regarding prices and production. For instance, China's suspension of antimony shipments to EU countries raised the cost of this mineral by more than 300%, forcing some automotive manufacturers to shut down their electric vehicle production lines temporarily.

On the other hand, the fact that critical minerals ultimately derive from mining activities brings environmental and social risks. Water pollution, ecosystem destruction, and biodiversity loss reveal how the enthusiasm for green and technological transformation is intertwined with ecological degradation. Furthermore, the concentration of these resources in regions with weak human rights standards creates additional social risks, such as forced migration and social injustices.

Therefore, the sustainability of the twin transition cannot be ensured solely through technological solutions; it also requires reducing geopolitical dependency, lowering ecological costs, and assuming social responsibilities. Otherwise, these critical minerals-the hidden power of our era's technologies-may turn into its greatest vulnerability.



1.

BÖLÜM

GİRİŞ

İnsanlık tarihi yalnızca fikirlerin, savaşların ya da kültürel devrimlerin değil, aynı zamanda yer kabuğunun derinliklerinden çıkarılan minerallerin de tarihidir. Bakır ve kalaydan oluşan tunç alaşımının kullanımı üretim ilişkilerinden savaş teknolojilerine hatta toplumsal yapının düzenlenişine kadar birçok alanı köklü biçimde dönüştürdü. Roma İmparatorluğu'nun ekonomik istikrarı sadece güçlü ordusuna ya da hukuk sistemine dayanmıyordu aynı zamanda İspanya'daki zengin gümüş madenlerinin işletilmesine de bağlıydı. Orta Çağ'da altın ve tuz ticareti, Afrika'dan Avrupa'ya uzanan ekonomik bir damar gibi işleyerek serveti ve kültürel etkileşimi de beraberinde taşıdı. Altının ekonomik gücü öylesine belirgindi ki Mali İmparatoru Mansa Musa'nın hac yolculuğu boyunca dağıttığı altınlar Kahire'de uzun süreli bir enflasyona neden olmuştu.

18. ve 19. yüzyıllarda ise kömür madeni tarih sahnesine çıktı. Bu maden yalnızca buharla çalışan makineleri değil; fabrikaları, işçi sınıfını, hızlı kentleşmeyi ve üretim ilişkilerini de şekillendirdi. 20. yüzyıla gelindiğinde ise enerji artık petrol ile özdeşleşmiş “siyah altın” dünya tarihini şekillendiren temel unsur haline gelmişti. Orta Doğu'daki petrol sahaları, ülke sınırlarını cetvelle çizen siyasal kararların arkasındaki ana motivasyon olurken petrol zamanla ulaşım sistemlerinin, savaş sanayisinin ve diplomatik dengelerin kısacası tarihin ana belirleyicisi olmuştur.

Bakır, tunç, tuz, altın, kömür ve petrol eksenindeki bu tarihsel anlatılar bize yer kabuğunun sunduklarıyla şekillenen bir jeopolitik düzen resmi sunuyor. Günümüzde ise yer altıyla kurulan bu kadim bağ, hacim olarak küçük fakat etkileri ölçsüz derecede büyük olan lityum, kobalt, nikel, grafit ve özellikle nadir toprak elementleri gibi “kritik mineraller” üzerinden yeniden tanımlanıyor.

Kritik minerallerin varlığı mineraloglar tarafından 18. yüzyıldan itibaren bilinmesine rağmen sanayi sektörüne yönelik kullanım potansiyelleri uzun süre fark edilememiş ve kullanım alanları çakmak ya da kamp lambası gibi basit ürünlerle sınırlı kalmıştır. Ancak renkli televizyon ekranlarında fosfor tabanlı renk üretiminde kullanılmaya başlanmalarıyla bu minerallerin gerçek değeri görünür hale gelmiştir. Özellikle nadir toprak elementlerinin yüksek manyetik ve iletkenlik özelliklerinin keşfi, kritik mineralleri modern sanayinin vazgeçilmez girdileri arasına taşımıştır. Böylece bu minerallerin kullanım alanları fiber optik kablolardan gece görüş sistemlerine, rüzgâr türbinlerinden uçak motorlarına, kamera lenslerinden X-ray cihazlarına kadar uzanan son derece geniş bir yelpazeye yayılmıştır.

Küresel ölçekte kritik minerallere yönelik artan ilginin temelinde ise bu minerallerin yeşil ve dijital dönüşüm teknolojilerinde ikame edilemez nitelikleri yatıyor. “İkiz dönüşüm” olarak adlandırılan bu süreç; bir yandan iklim değişikliğiyle mücadeleyi diğer yandan dijital altyapının güçlendirilmesini aynı anda hedefliyor. Bu bağlamda Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) analizlerine göre temiz enerji teknolojilerinde kullanılan mineral talebinin 2040 yılına kadar en az dört kat artması bekleniyor. Üstelik yenilenebilir enerji kaynaklı işlerin küresel ölçekte 16 milyondan fazla istihdam sağlamış olması, kritik mineralleri günümüz teknolojisinin ana girdisi olmaktan çıkarak ekonomik büyüme ve istihdamın da belirleyicileri konumuna taşıyor.¹

Kritik minerallerin önemi yalnızca teknolojik gereksinimlerle de sınırlı değil. Küresel arzın özellikle Çin başta olmak üzere az sayıda ülkede yoğunlaşması, tedarik zincirlerinde ciddi kırılganlıkları beraberinde getiriyor. Örneğin, nadir toprak elementleri işleme kapasitesinde yaklaşık %90'lık paya sahip olan Çin'in jeopolitik gerilimler doğrultusunda bu mineralere yönelik ticari kısıtlamalar getirmesi, reel sektör üzerinde hem fiyatlar hem de üretim süreçleri bakımından önemli baskılar oluşturuyor. Jet motorlarında kullanılan samaryumun ABD'de piyasa değerinin 60 katına alıcı bulması veya bazı elektrikli araç modellerinin üretiminin durdurulması bu kırılganlığın somut göstergelerindendir.

Kritik minerallerin madencilik faaliyetleri sonunda elde edilmesi, çevresel ve sosyo-ekonomik boyutları da tartışılması gereken konular arasına ekliyor. Madencilik süreçlerinin toprak ve su kaynaklarının kirlenmesine yol açması, biyolojik çeşitliliği tehdit etmesi ve çeşitli yollarla insan sağlığı üzerinde ciddi olumsuz etkiler bırakması, bu kaynakları son derece riskli bir zemine taşıyor. Ayrıca kritik mineral rezervlerinin büyük ölçüde Latin Amerika ve Afrika gibi insan hakları standartlarının zayıf olduğu coğrafyalarda yoğunlaşması konunun etik ve toplumsal sorumluluk boyutunu artırıyor. Bu bağlamda yeşil ve dijital dönüşümler beraberinde dikkate alınması gereken "ekolojik ve normatif maliyetler" de içeriyor.

Bu analiz notunda, günümüz ekonomi politiğinin ana meselelerinden biri haline gelen kritik minerallerin sundukları fırsatlar ve barındırdıkları riskler yanında kullanım alanları, küresel üretim-dağılım verileri, tedarik zincirindeki stratejik rolleri ve bu bağlamda ortaya çıkan jeopolitik rekabet çok boyutlu bir perspektifle ele alınıyor.



“

Kritik mineraller
küçük hacimlerine
rağmen teknolojik
dönüşümde
stratejik rol
oynuyor.

”



2. BÖLÜM

**FIRSATLAR
ÇERÇEVESİNDE
KRİTİK MİNERALLER:**
TANIM, KAPSAM VE
KULLANIM ALANLARI

2.1. Kritik Minerallerin Tanımı ve Kapsamı

Kritik mineraller üzerinde küresel ölçekte uzlaşılmış bir tanım bulunmazken ülkelerin stratejik hedefleri, teknolojik gelişmişlik seviyeleri ve ekonomik gereksinimlerine göre tanım ve kapsamı değişip şekilleniyor. Bu nedenle kritik minerallerin belirlenmesine yönelik evrensel ve yeknesak bir standarttan söz etmek mümkün değil. Örneğin Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (*U.S. Geological Survey - USGS*) kritik mineralleri ABD'nin ekonomik refahı ve ulusal güvenliği açısından hayati öneme sahip tedarik riski yüksek mineraller olarak tanımlıyor.² Kurumun 2018 yılında yayımladığı listede helyum, potas, renyum, stronsiyum ve uranyum gibi mineraller yer alırken teknolojik gereksinimlere göre 2022 yılında güncellenen listede bu mineraller yer almıyor. Buna karşılık listeye lityum, nikel, çinko eklenirken nadir toprak elementlerine ise ayrı yer veriliyor.

Avrupa Komisyonu da kritik mineralleri “ekonomik önem” ve “tedarik riski” kriterlerine göre değerlendiriyor ve bu çerçevede bir liste hazırlanıyor.³ 2011 yılında yayımlanan nihai kritik mineraller listesi 14 minerali içerirken 2023 yılı itibarıyla bu sayı kobalt, nikel, lityum ve mangan gibi stratejik önemi giderek artan minerallerin eklenmesiyle 34'e yükseldi. Bunun yanı sıra Avusturalya, Kanada ve Hindistan gibi ülkeler de kendi ulusal öncelikleri doğrultusunda kritik mineraller stratejilerini geliştiriyorlar ve listelerini dönemsel olarak güncelliyorlar.⁴

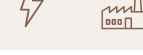
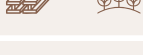
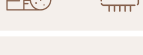
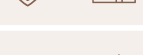
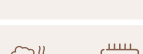
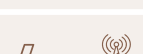
Bu bağlamda genel olarak kritik mineraller, bir ülkenin ekonomik sürdürülebilirliği, ulusal güvenliği ve stratejik sektörleri açısından vazgeçilmez nitelikte olan ve aynı zamanda tedarik riski kırılganlıklarına açık yakıt dışı (*non-fuel*) mineraller olarak tanımlanabilir. Ancak ülke örneklerinden de anlaşılacağı üzere minerallerin “kritiklik” statüsü, ülkelerin teknolojik ve stratejik sektör önceliklerine, küresel arz-talep dengelerine, jeopolitik gelişmelere bağlı olarak zaman içinde dinamik olarak değişebiliyor.

Kritik minerallerin önemi yer altından çıkarılıp işlenerek ekonomik değere dönüştürülmesi ile de sınırlı değildir. Yüksek teknoloji, temiz enerji, dijital dönüşüm ve savunma sanayi gibi stratejik sektörlerin üretim süreçlerinde oynadıkları vazgeçilmez rol onların önemini artırıyor. İkame edilmeleri zor olan bu mineraller mıknatıslı çiplerden bataryalara, güneş panellerinden elektrikli araçlara kadar uzanan geniş bir ürün yelpazesinde kullanılıyor. Modern teknolojik altyapının temel yapı taşları olarak konumlandırabileceğimiz bu minerallerin eksikliği durumunda ise elektrikli araçların üretimi, yenilenebilir enerji sistemlerinin inşası ya da ileri düzey savunma teknolojilerinin geliştirilmesine kadar birçok alanda ciddi aksamalar yaşanabilir. Örneğin Çin'in nadir toprak elementlerine yönelik getirdiği ihracat kısıtlamaları, Ford'un Şikago'daki üretim hattını durdurmasına ve Nissan Motor'un elektrikli araç projesindeki üretim planlarını önemli ölçüde daraltmasına sebebiyet vermiştir.⁵

KRİTİK MİNERALLER

YENİ TEKNOLOJİ ÇAĞININ GİZLİ GÜCÜ

Tablo 1. Seçili Kritik Mineraller

	Kritik Mineral	Kullanıldığı Sektörler	Kullanım Amacı/Ürün
	Li Lityum	Elektrikli araçlar; enerji depolama, elektronik	Lityum-iyon bataryalar; akıllı cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar; çipler; manyetalar; enerji depolama sistemleri
	Co Kobalt	Otomotiv, savunma, havacılık	Yüksek enerji yoğunluklu bataryalar; jet motorlarında kullanılan süper alaşımlar
	Ni Nikel	Çelik sanayi, otomotiv, enerji	Paslanmaz çelik üretimi, batarya katotları, nikel alaşımları
	Grafit	Enerji, imalat sanayi	Batarya anotları (özellikle lityum-iyon), elektrik motorları, çelik fırınlarda refrakter madde
	Cu Bakır	Elektrik, elektronik, inşaat	Elektrik kabloları, motor sargıları, jeneratörler; güneş panelleri devreleri
	Al Alüminyum	Havacılık, inşaat, otomotiv	Hafif yapılar; enerji verimli taşıtlar; ısı yalıtımı ürünleri
	Mn Manganez	Çelik sanayi, enerji, tarım	Çeliğin dayanıklılığını artırma, kuru piller, gübre katkıları
	Platin Grubu Metaller (Pt, Rd, Rh)	Otomotiv, kimya sanayi, elektronik, tıp	Katalitik konvertörler; hidrojen yakıt hücreleri, sensör sistemleri, kanser ilaçları
	W Tungsten	Savunma sanayi, elektronik, imalat sanayi, otomotiv	Yüksek sıcaklığa dayanıklı parçalar; sert metal uçlar; ampul filamanları
	Zn Çinko	İnşaat, otomotiv, enerji, tarım	Galvanizleme (pas koruma), alaşımlarda sertlik artırıcı katkı, gübre katkıları
	Sb Antimon	Elektronik, kimya sanayi	Alev geciktirici katkıları; kurşun alaşımları, mikroçipler
	Ga Galyum	Savunma sanayi, telekomünikasyon, elektronik, enerji	Çipler; kızılötesi cihazlar; yüksek verimli fotovoltaik hücreler
	Ge Germanyum	Telekomünikasyon, enerji, elektronik, tıp	Fiber optik kablolar; IR optik cihazlar; gece görüş sistemleri

Kaynak: Yazar tarafından çeşitli kaynaklardan derlenmiştir.

Tablo 2. Nadir Toprak Elementleri

Kritik Mineral		Kullanıldığı Sektörler	Kullanım Amacı/Ürün	
		Tb Terbiyum	Elektronik, savunma sanayi, enerji	Düşük enerjili floresan lambalar; manyetik soğutma sistemleri, yüksek güçlü mıknatıslar
		Dy Disprosiyum	Enerji, otomotiv, savunma sanayi	Neodimyum mıknatıslarının ısıya dayanıklılığını artırmak için katkı, elektrikli araç motorları, rüzgâr türbinleri
		Y İtriyum	Tıp teknolojileri, elektronik, optik	Seramik süper iletkenler; LED'ler ve CRT ekranlar; lazer sistemleri, radyasyon terapisi cihazları
		Gd Gadolinyum	Tıp, enerji	Batarya anotları (özellikle lityum iyon), elektrik motorları, çelik fırınlarda refrakter madde
		Sm Samaryum	Savunma sanayi, havacılık, enerji	Samaryum-kobalt mıknatıslar; nükleer reaktörler için kontrol çubukları, lazerler
		Lu Lutesyum	Tıp, kimya sanayi, optik	PET tarayıcılarında dedektör kristalleri, katalizörler; lazer uygulamaları
		Sc Skandiyum	Havacılık, spor sanayi, elektronik	Alüminyum alaşımlarını güçlendirme (spor ve uçak ekipmanlarında), yakıt hücreleri, yüksek yoğunluklu aydınlatma
		La Lantan	Petrokimya sanayi, cam	Kamera lensleri, petrokimya katalizörleri
		Ce Seryum	Cam, otomotiv, enerji	Cam cilası, egzoz gazı temizleyici katalizörler
		Pr Praseodim	Havacılık, enerji	Uçak motor parçaları, mıknatıs alaşımları
		Nd Neodimyum	Enerji, otomotiv, elektronik	Elektrikli motor mıknatısları, kulaklıklar, türbinler
		Pm Prometyum	Enerji	Nükleer batarya üretimi
		Eu Europyum	Elektrik, elektronik	Floresan lambalar; renkli ekran aydınlatmaları
		Ho Holmiyum	Savunma sanayi, enerji	Mıknatıs yapımı, nükleer kontrol sistemleri
		Er Erbiyum	Telekomünikasyon, optik	Fiber optik amplifikatör; lazer yükselticiler
		Tm Tulyum	Tıp	X-ray cihazları, tıbbi lazer sistemleri
		Yb İterbiyum	Tıp, telekomünikasyon	Sensörler; lazer kaynakları

Kaynak: Yazar tarafından çeşitli kaynaklardan derlenmiştir.

Not: Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC)'ın tanımına göre nadir toprak elementleri; atom numaraları 57 ve 71 arasında yer alan 15 lanthanoid element ile onlara kimyasal ve fiziksel olarak benzeyen skandiyum ve itriyumdan oluşan toplam 17 elementlik bir gruptur.

2.2. Kritik Minerallerin Kullanım Alanları

İklim değişikliğiyle mücadele kapsamında ülkelerin uygulamaya koydukları politikalar ve bu politikaların giderek yaygınlaşması, fosil yakıtlara dayalı geleneksel enerji sistemlerinden temiz enerji kaynaklarına geçiş sürecini hızlandırmıştır. Ember verilerine göre 2024 yılında nükleer ve yenilenebilir enerjiden elde edilen temiz elektriğin küresel elektrik üretimindeki payı %40,9'a yükselmiştir. Bu gelişmede özellikle güneş enerji kapasitesinin iki yıl içinde iki katına çıkması etkili olmuştur.⁶

Yeşil dönüşümün merkezinde yer alan bu temiz teknolojiler, üretim süreçlerinde kritik minerallerin zorunlu girdiler olarak kullanılmasını gerektirmekte dolayısıyla söz konusu minerallere olan küresel bağımlılık da kayda değer ölçüde artmaktadır. Kısaca son yıllarda bu minerallere yönelik küresel talepte gözlemlenen artışın temel nedenlerinden biri de bu yapısal enerji dönüşümüdür.

Yenilenebilir enerji sistemleri fosil yakıtı dayalı enerji altyapısından oldukça farklıdır⁷ ve çok daha yüksek mineral yoğunluğu gerektirirler. Eşdeğer kapasitedeki bir doğal gaz santraline kıyasla bir rüzgâr enerji santrali yaklaşık sekiz kat, fotovoltaiik güneş panelleri ise iki kat daha fazla mineral kullanılmasını zorunlu kılar.⁸ Bu sistemlerin üretiminde ise ısıya dayanıklılıkları ve yüksek manyetik özellikleri nedeniyle öne çıkan neodimyum, terbiyum, indiyum, disprosyum ve praseodim gibi nadir toprak elementleri dâhil olmak üzere 22 farklı mineral kullanılır.⁹

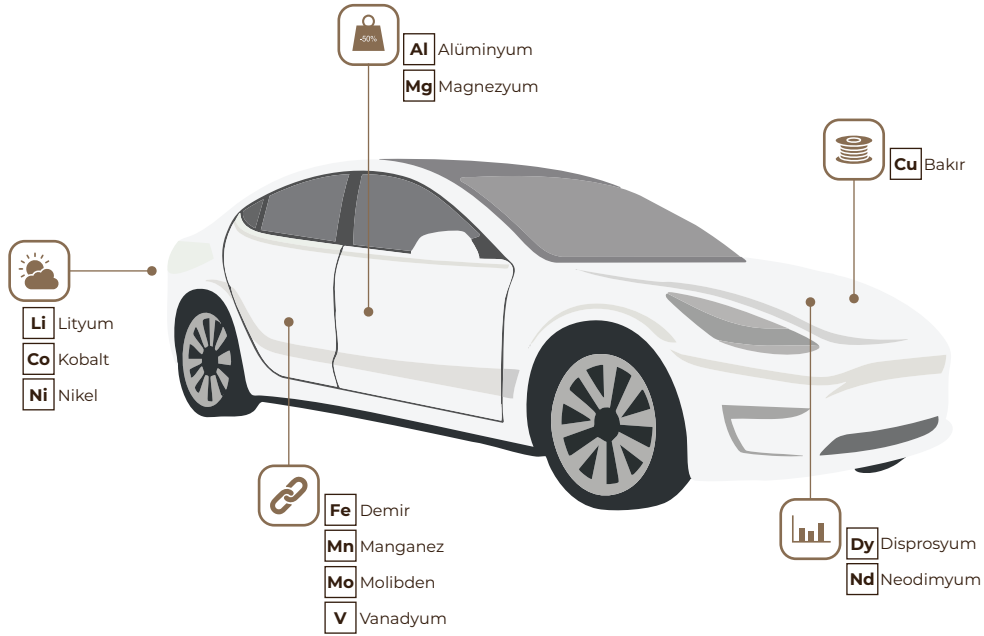
Benzer şekilde elektrifikasyon sürecinin temel unsurlarından biri olan elektrikli araçlar da önemli ölçüde mineral yoğunudur. Lityum, nikel, kobalt, manganez, grafit, silisyum, bakır, alüminyum ve nadir toprak elementleri gibi birçok kritik mineral bu araçların batarya ve motor sistemlerinde kullanılır. Örneğin bir elektrikli araç, içten yanmalı motora sahip geleneksel bir araca kıyasla ortalama altı kat daha fazla mineral girdisi gerektirir.

Kritik minerallere olan küresel talebi artıran tek unsur enerji dönüşüm süreci değildir. Savunma sanayi ve diğer ileri teknoloji uygulamaları da bu talebi ciddi şekilde tetikliyor. Örneğin ABD Savunma Bakanlığı'na göre bir F-35 savaş uçağının üretiminde 900 poundluk (yaklaşık 408 kilogram) nadir toprak elementi kullanılıyor.¹⁰ Terbiyum ve itriyum, akıllı telefon ve televizyon ekranlarında canlı renklerin elde edilmesini sağlarken seryum, kimyasal reaksiyonları kolaylaştırma özelliği sayesinde otomobil egzoz gazlarını arındıran katalitik konvertörlerde yaygın biçimde kullanılıyor. Neodimyum ve praseodim gibi elementler ise mıknaatıslı motorların üretiminde kullanılan temel girdilerdir ve bu motorlar sayesinde elektrikli araç bataryasında depolanan enerji mekanik harekete dönüştürülerek tekerleklerin dönmesini sağlar.

Yapay zekâ uygulamaları ve veri merkezlerinin hızla büyümesi kritik minerallere olan talebi artıran bir diğer unsurdur. Bakır, mükemmel iletkenliği ve dayanıklılığı sayesinde veri merkezlerinde en çok kullanılan kritik minerallerden biri olup güç dağıtım sistemlerinde, yüksek performanslı ağ ve veri kablolarında ve ısı eşanjörleri ile borular gibi soğutma altyapı-

larında kullanılır. Silisyum (özellikle ultra saf formu) işlemcilerde ve yüksek hızlı bellek/depolama bileşenlerinde yer alırken galyum (genellikle galyum nitrür veya galyum arsenit formunda) yüksek frekanslı ve verimli güç dönüştürücülerinde ve radyo frekansı bileşenlerinde giderek daha fazla yer alıyorlar. IEA'nın tahminlerine göre 2030 yılına kadar gerçekleşmesi öngörülen veri merkezi kaynaklı kapasite artışları, bakır ve silisyum için %2, nadir toprak elementleri için %3 ve galyum için %11 oranında ilave ek talep baskısı oluşturabilir. Bu oranlar toplam küresel talepte yüksek bir pay oluşturmamakla beraber 2030 yılı itibarıyla beklenen mutlak hacimler-bakır için 512 ve silisyum için 75 kiloton-tedarik güvenliği açısından kayda değer riskler barındırıyor.¹¹

Şekil 1. Bir Elektrikli Araçta Kullanılan Kritik Mineraller



Kaynak: International Council on Mining & Metals (ICMM)

Artan temiz enerji üretimi ve enerji depolama teknolojilerine olan ihtiyaç, kritik minerallere yönelik küresel talebin en önemli itici gücüdür. IEA tarafından analizlere göre, Paris İklim Anlaşması hedeflerine ulaşabilmesi için temiz enerji teknolojilerinin ihtiyaç duyduğu mineral miktarının 2040 yılına kadar mevcut seviyenin yaklaşık 4 katına çıkması beklenmektedir. Küresel ölçekte 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşabilmesi için ise 2040 yılında bugünküne kıyasla 6 kat daha fazla mineral girdisine ihtiyaç duyulabilir.

Bu dönüşüm sürecinde en yüksek talep artışlarının ise lityum, kobalt ve nadir toprak elementlerinde gerçekleşmesi beklenmektedir. 2018 yılında yaklaşık 270.00 metrik ton lityum karbonat seviyesinde olan lityum talebinin 2025 yılına kadar 1 milyon metrik tonu aşması öngörülmektedir. IEA verilerine göre, nikel, kobalt, grafit ve nadir toprak elementlerine olan talep 2024 yılında, 2010'lu yıllardaki ortalama yıllık artış oranlarına kıyasla %6 ile %8 arasında bir artış göstermiştir.

IEA'nın Net Sıfır Emisyon 2050 (NZE) Senaryosu, küresel enerji sektörünün 2050 yılına kadar sıfır karbondioksit emisyonuna ulaşmasını hedefleyen kapsamlı bir yol haritasıdır. Bu senaryo çerçevesinde 2024 yılına kıyasla 2030 yılında bazı kritik minerallerde beklenen talep artışları: elektrikli araçlar için lityum talebi yaklaşık 5 kat, batarya depolama sistemlerinde lityum talebi yaklaşık 3 kat, elektrikli araçlarda kobalt talebi yaklaşık 4,91 kat ve temiz enerji sektöründe nadir toprak elementleri yaklaşık 3,1 kat artabilir.

2024 Yılına Göre Beklenen Talep Artışı

Bakır



Lityum



Kobalt



Nikel



Grafit

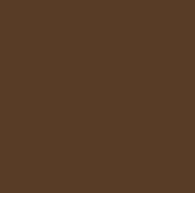


Nadir Toprak Elementleri



Batarya depolama Elektrikli araçlar Güneş panelleri Elektrik ağıları Rüzgar türbinleri Diğer temiz enerji Diğer kullanımlar

Kaynak: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025 raporundan hareketle hazırlanmıştır.
Not: Analize nadir toprak elementleri olarak neodimyum, praseodim, dispozyum ve terbiyum dâhil edilmiştir.



3.

BÖLÜM

KRİTİK MİNERALLER KAPSAMINDAKİ RİSKLER

3.1. Tedarik Riski

Kritik mineraller, savunma sanayi, yeşil teknolojiler ve dijitalleşme gibi reel sektörün en stratejik alanlarında geniş kullanım imkânı sunmalarından ötürü yüksek ekonomik değere sahiptir. Bu alanlardaki hızlı dönüşüm, söz konusu minerallere olan talebi keskin biçimde artırarak onları vazgeçilmez hâle getiriyor. Ayrıca bu mineraller yalnızca geniş kullanım alanlarıyla değil, aynı zamanda ikame edilemez özellikleriyle de öne çıkıyor. Özellikle yüksek teknoloji gerektiren uygulamalarda alternatif hammaddelerin bulunamamaları ya da işlevsel açıdan yetersiz kalmaları, kritik mineralleri stratejik açıdan daha da önemli kılıyor.

Kritik mineralleri “kritik” yapan en belirleyici unsur ise küresel tedarik zincirlerinde yaşanan yüksek derecedeki kırılganlıktır. Nadir toprak elementleri, isimlerinin çağrışımından ötürü doğada nadir bulunur izlenimi verse de gerçekte birçok yaygın metalden daha bol miktarda yer kabuğunda mevcuttur. Örneğin seryum, kalay veya kurşun gibi metallere kıyasla daha yüksek bir yoğunlukta bulunabilir.¹² Ancak esas sorun, bu minerallerin ekonomik olarak verimli ve sürdürülebilir şekilde üretebilecek yoğunlukta olmamasıdır. Dahası bu kaynakların çıkarılması ve işlenmesi; ekonomik, siyasi ve çevresel açıdan riskli sayılan sınırlı sayıda ülke ve belirli coğrafi bölgelerde yoğunlaşmıştır.¹³ Bu jeopolitik yoğunlaşma, küresel tedarik zincirlerini son derece kırılgan bir yapıya dönüştürürken arz güvenliği açısından da ciddi riskler barındırır.

Tedarik zincirinin ilk halkasını, kritik minerallerin yer altından çıkarılma sürecini kapsayan madencilik faaliyetleri oluşturur. Her ne kadar birçok ülke önemli derecede mineral maden rezervlerine sahip olsa da fiilî üretim birkaç ülkede yoğunlaşıyor. Örneğin, Arjantin-Bolivya-Şili’nin oluşturduğu ve “Lityum Üçgeni” olarak adlandırılan bölge, dünya lityum rezervlerinin yaklaşık yarısına ev sahipliği yapıyor.¹⁴ Ancak küresel lityum üretiminin yaklaşık %77’si Avustralya, Çin ve Şili tarafından gerçekleştiriliyor. Benzer şekilde kobalt üretiminin %67’si Demokratik Kongo Cumhuriyeti’nde ve nikel üretiminin ise %63’ü Endonezya’da yoğunlaşmıştır.

Bu zincirin bir sonraki ve en stratejik aşaması ise kritik minerallerin rafinasyonu ve işleme sürecidir. Cevher halinde yer altından çıkarılan madenlerin yüksek saflıkta ve kullanıma uygun malzemelere dönüştürülmesini içeren bu süreç yalnızca katma değer en yoğun aşama değil, aynı zamanda tedarik zincirinin de en kırılgan halkasıdır. İleri düzey kimyasal ve metalurjik bilgi birikimi (know-how) ile yüksek düzeyde teknik uzmanlık gerektiren bu aşama hem karmaşık hem de oldukça maliyetlidir.

Bu bağlamda kritik minerallerin rafinasyon ve işleme süreçlerinde jeopolitik açıdan belli kırılganlıklara neden olabilecek düzeyde bir yoğunlaşma söz konusudur. 1990’lı yılların başlarına kadar Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa ülkeleri, nadir toprak elementleri üretiminde büyük ölçüde kendi kendine yeterli bir yapıya sahipti. Ancak bu ülkelerde çevresel regülasyonların giderek sıkılaşması, iş gücü maliyetlerinin Asya ülkelerine kıyasla yüksek olması ve madencilik faaliyetlerinin diğer sektörlerle kıyasla daha düşük katma değer yaratması, bu ülkelerin sektördeki rekabet gücünü zayıflatmıştır. Bunun sonucunda üretim faali-

KRİTİK MİNERALLER

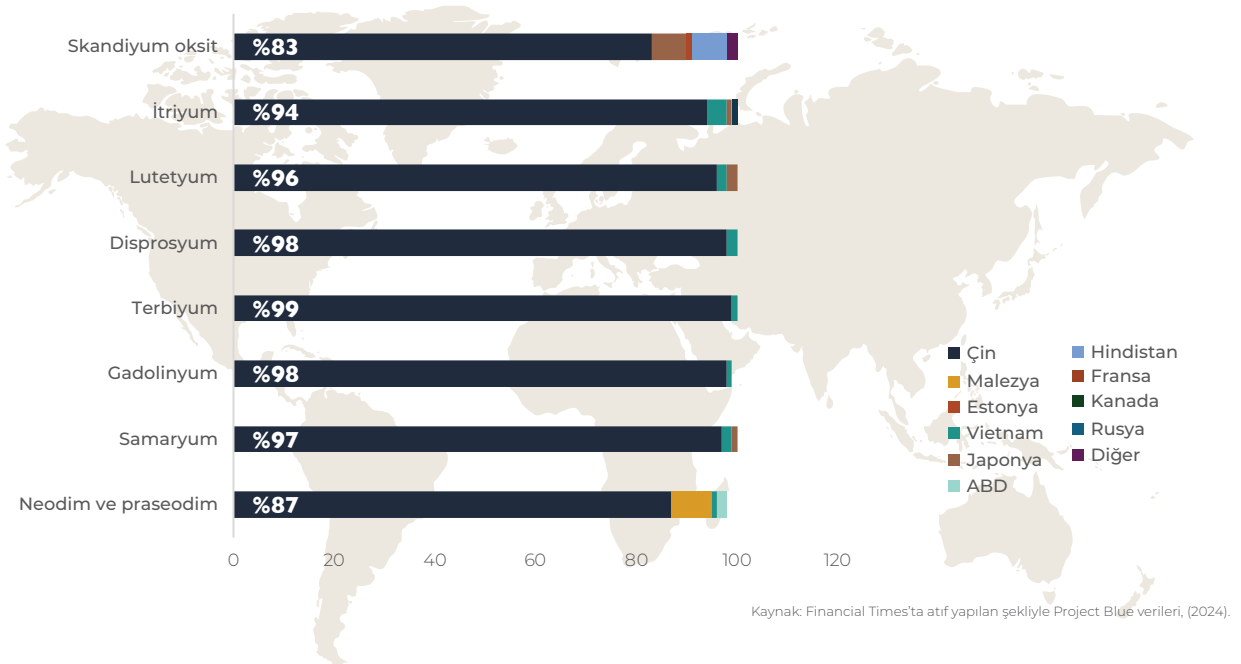
YENİ TEKNOLOJİ ÇAĞININ GİZLİ GÜCÜ

yetleri, çevresel standartların daha esnek olduğu ve üretim maliyetlerinin çok daha düşük seyrettiği Çin'e kaymıştır.¹⁵

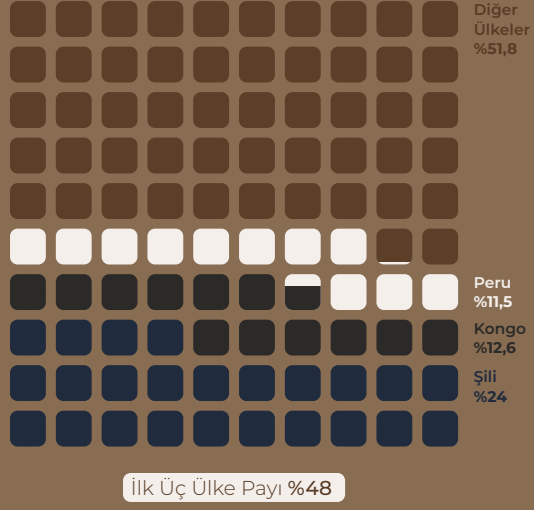
Çin ise bu gelişmeyi bir fırsat penceresi olarak değerlendirmiştir. Dönemin lideri Deng Xiaoping'in "Orta Doğu'nun petrolü varsa, Çin'in nadir toprakları var" sözü, ülkenin bu alandaki uzun vadeli planlarını açıkça ortaya koymaktadır.¹⁶ Bu doğrultuda Çin; ilk etapta doğrudan yabancı yatırımları teşvik etmiş, ardından birleşme ve satın almalar yoluyla sektördeki küresel varlığını güçlendirmiş ve nihayetinde yüksek devlet sübvansiyonlarıyla üretim kapasitesini pekiştirerek, kritik minerallerin rafinasyon ve işlenmesinde küresel lider konumuna yükselmiştir.¹⁷

Gelinen son noktada ise nadir toprak elementleri açısından zengin rezervlere sahip ülkeler dâhi bu mineralleri işleme ve rafine süreçlerinde gerekli donanımına sahip olmadıklarından Çin'den ithalat yapmak zorunda kalıyorlar. Örneğin Demokratik Kongo Cumhuriyeti kobalt madenlerinin yaklaşık %67'sine sahipken Çin, yapmış olduğu ikili anlaşmalar ile ülkedeki on kobalt maden rezervinden yedisini kendi ülkesine getirerek işliyor.¹⁸ Benzer şekilde Türkiye grafit rezervleri bakımından önemli bir potansiyele sahip olmasına karşın bu minerali yüksek saflıkta ve batarya teknolojilerine uygun kalitede işleyebilecek kapasiteye henüz ulaşamamıştır.¹⁹ Çin ise batarya kalitesinde rafine grafitin %95'ini üretebiliyor. Nadir toprak elementlerinde de Çin'in benzer üstünlüğü söz konusudur. Terbiyumun %99'u, gadolinyum ve disprosiyumun %98'i ve samaryumun %97'si Çin tarafından rafine ediliyor.

Şekil 2. Rafine Edilmiş Nadir Toprak Mineral Üretimi (%)

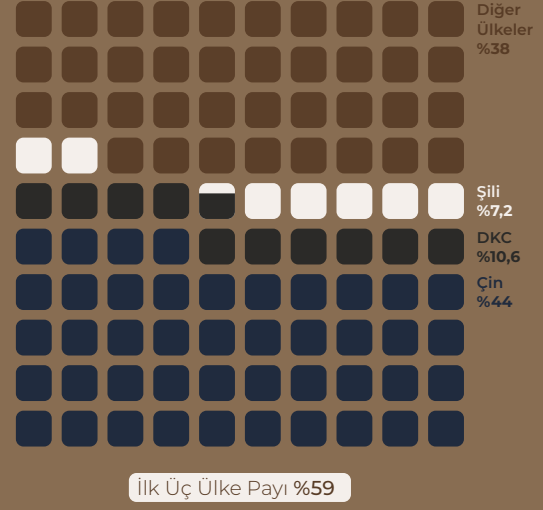


Şekil 3. Bakır Maden



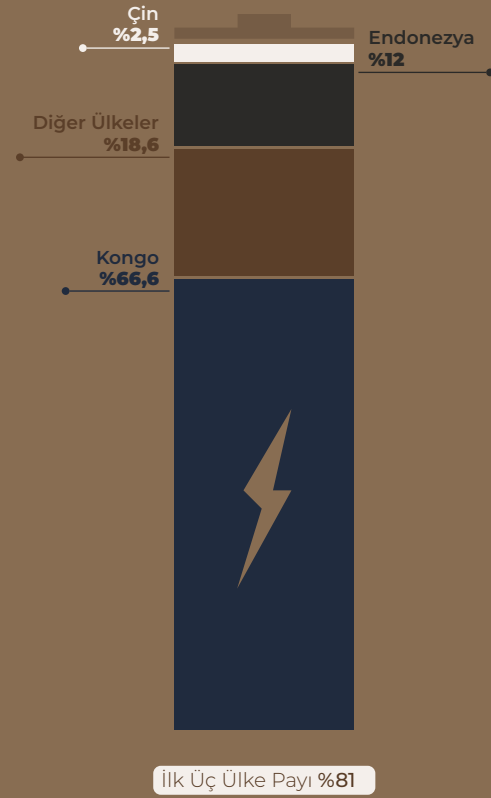
Kaynak: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025 raporundan hareketle hazırlanmıştır.

Şekil 4. Bakır Rafinasyonu



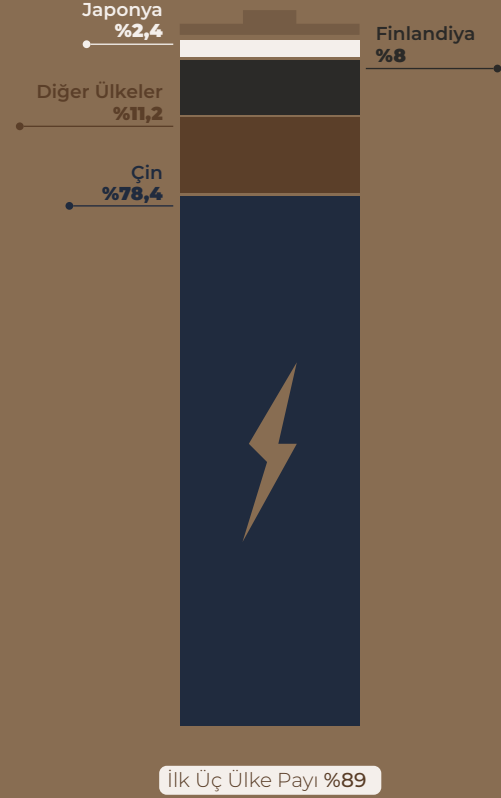
Kaynak: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025 raporundan hareketle hazırlanmıştır.

Şekil 5. Kobalt Maden



Kaynak: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025 raporundan hareketle hazırlanmıştır.

Şekil 6. Kobalt Rafinasyonu



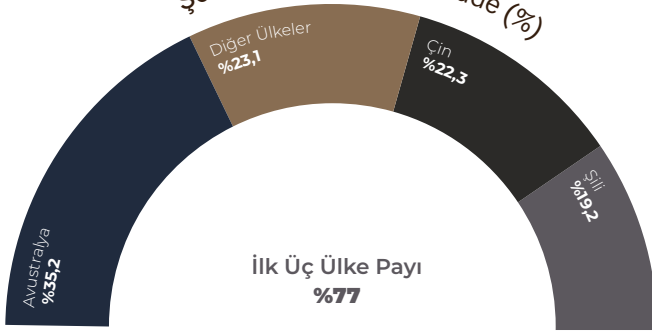
Kaynak: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025 raporundan hareketle hazırlanmıştır.

Not: Yuvarlamadan dolayı toplamlar %100'ü vermeyebilir.

KRİTİK MİNERALLER

YENİ TEKNOLOJİ ÇAĞININ GİZLİ GÜCÜ

Şekil 7. Lityum Hammadde (%)

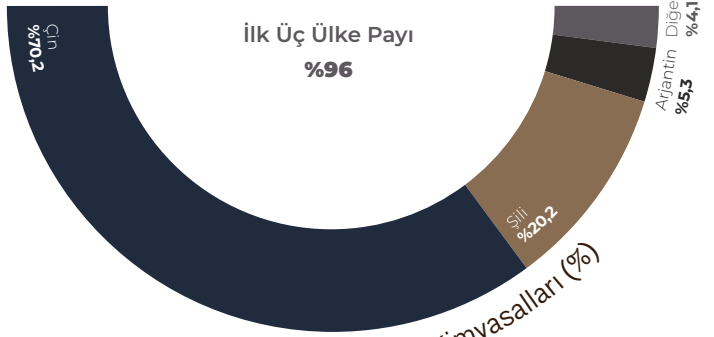


Kaynak: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025 raporundan hareketle hazırlanmıştır.

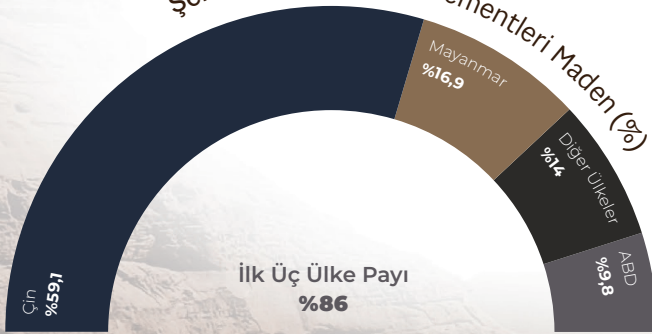
Not: Hammaddeler, lityumun sert kaya cevherlerinden, kil ve tuzlu su(tuzlu yeraltı suları veya göller) kaynaklarından çıkarılmasını kapsar. Lityum kimyasalları ise lityum karbonat, hidroksit, sülfatlar ve klorürlerin ilk üretim aşamasını kapsar ve yeniden işleme süreçlerini içermez.

İlk Üç Ülke Payı %96

Şekil 8. Lityum Kimyasalları (%)



Şekil 9. Nadir Toprak Elementleri Maden (%)

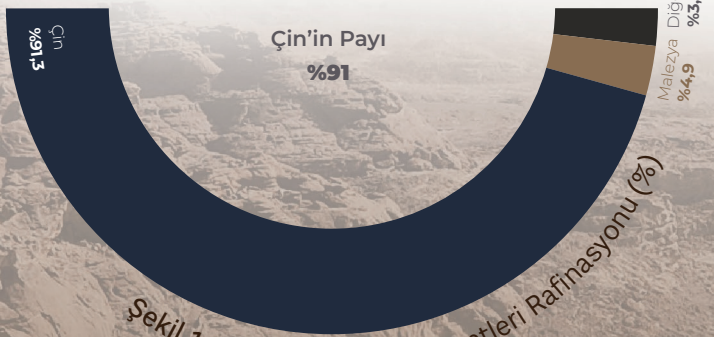


Kaynak: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025 raporundan hareketle hazırlanmıştır.

Not: Nadir toprak elementleri yalnızca dört miknatis nadir toprak elementi olan neodimyum, praseodimyum, disprosyum ve terbiyum'u kapsamaktadır.

Çin'in Payı %91

Şekil 10. Nadir Toprak Elementleri Rafinasyonu (%)



Şekil 11. Nikel Maden (%)



Kaynak: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025 raporundan hareketle hazırlanmıştır.

Şekil 12. Nikel Rafinasyonu (%)



Kaynak: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025 raporundan hareketle hazırlanmıştır.

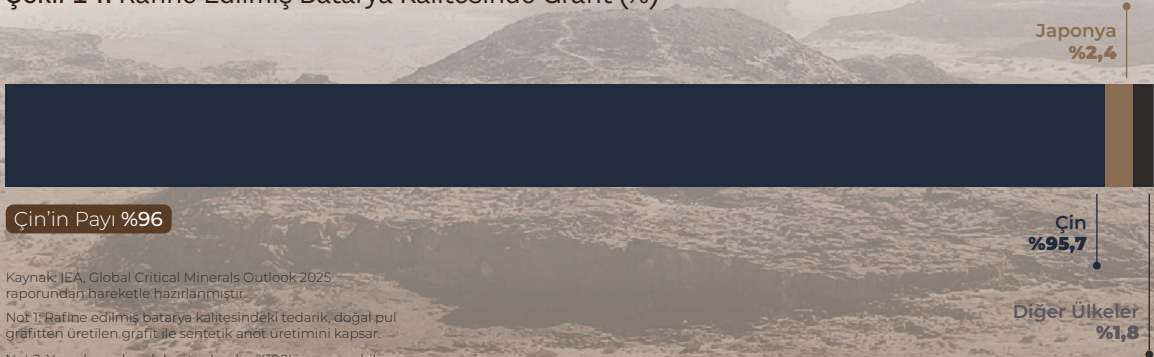
Not: Nikel rafinasyonu, nikelin metal, oksit, nikel domuz demiri, ferronikel veya sülfat haline getirilmesini kapsar ve ara üretim aşamalarındaki çıktıları içermez.

Şekil 13. Doğal Grafit (%)



Kaynak: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025 raporundan hareketle hazırlanmıştır.

Şekil 14. Rafine Edilmiş Batarya Kalitesinde Grafit (%)



Kaynak: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025 raporundan hareketle hazırlanmıştır.

Not 1: Rafine edilmiş batarya kalitesindeki tedarik, doğal pul grafitten üretilen grafit ile sentetik anot üretimini kapsar.

Not 2: Yuvarlamadan dolayı toplamlar %100'ü yermeyebilir.

Çin'in özellikle terbiyum, gadolinyum ve disprosyum gibi ağır nadir toprak elementlerinin işlenmesi ve rafinasyonunda küresel lider konumunda olması ülkeye yalnızca üretim ve ihracat temelli ekonomik avantaj sağlamıyor. Bu hâkimiyet, Çin'i küresel tedarik zincirlerinde vazgeçilmez bir aktör haline getirirken, aynı zamanda söz konusu kritik kaynaklara erişimi dış politika ve ticaret müzakerelerinde etkin bir stratejik araç olarak kullanabilmesine imkân tanıyor.

İleri düzey teknoloji üretimi ve yeşil dönüşüm süreçlerinin bu minerallere olan bağıllığı dikkate alındığında Çin'in bu sektörlerdeki tekelleşmeye varan üstünlüğü diğer ülkeler açısından ciddi dışa bağıllık riski oluşturuyor. Bu nedenle Pekin yönetimi ABD ve Avrupa Birliği başta olmak üzere yaşanan ticaret gerilimlerine “yeşil” ve “teknolojik” alanları dâhil ederek bu mücadeleyi güçlü bulunduğu tarafa doğru yönlendiriyor.²⁰ Bu durumun en güncel örneği 2 Nisan 2025 tarihinde ABD Başkanı Donald Trump tarafından açıklanan “Kurtuluş Günü Tarifeleri”dir. Trump, Çin ile süregelen ticaret savaşını bir üst boyuta taşıyarak Çin menşeli ürünlere %34 oranında ek “karşılıklı tarife” (*reciprocal tariff*) uygulayacağını açıklamıştır. Bu karara misilleme olarak Pekin yönetimi, tüm ABD ürünlerine aynı oranda gümrük vergisi getireceğini ilan etmiştir. Ayrıca samaryum, gadolinyum ve terbiyumun da içinde yer aldığı yedi nadir toprak elementinin ihracatına kısıtlama getirme kararı aldığını duyurmuştur.²¹ Bu minerallere getirilen ihracat kontrolleri piyasada arz güvenliğine ilişkin kaygıları artırırken bunun sonucunda ABD, yapay zekâ çipleri üzerindeki ihracat kontrollerini gevşetmiş ve Çinli öğrencilere uygulanan vize sınırlamalarını kısmen hafifletmiştir.²²

Çin'in kritik minerallere yönelik ihracat kontrolleri Donald Trump'ın ikinci kez ABD Başkanı seçilmesiyle ivme kazanan Ticaret Savaşlarına doğrudan bir reaksiyon niteliği taşımaktan ziyade Pekin'in ticaret politikasının uzun vadeli bir uzantısı olarak değerlendirilebilir. Örneğin 2023 yılında Çin, galyum ve germanyum başta olmak üzere kritik minerallere ihracat kısıtlamaları getirirken²³ Aralık 2024'te galyum, germanyum ve antimon elementlerinin ABD'ye ihracatının tamamen yasaklandığını beyan etti. Aynı dönemde, daha önce belirli grafit türlerine getirilen kısıtlamaların kapsamı genişletilerek bu ürünlerin nihai kullanım amacına göre ihracat izni verilmesini öngören sıkı bir denetim mekanizması yürürlüğe girdi.²⁴ Bu çerçevede ihracatçı firmaların Çin Ticaret Bakanlığı'na özel izin başvurusu yapmaları zorunlu hâle getirildi. Şubat 2025'te ise Çin, savunma sanayii ve ileri teknoloji uygulamalarında kullanılan tungsten, tellür, bizmut, indiyum ve molibden gibi minerallere ek ihracat kontrolleri getirdiğini ilân etti.²⁵

Çin'in bu yaklaşımı yalnızca ABD ile de sınırlı değildir. Bu politikanın tarihsel örneklerinden biri 2010 yılında Japonya ile yaşanan “nadir toprak elementleri krizi”dir.²⁶ Senkaku/Diaoyu Adaları üzerindeki egemenlik anlaşmazlığı sırasında Çin, Japonya'ya yönelik nadir toprak elementi ihracatını durdurmuştur. Benzer bir durum Eylül 2024'te antimon elementinin ihracat kontrol listesine alınmasıyla Avrupa Birliği açısından da yaşanmıştır. Çin'in bu kararı sonrasında Ekim 2024'ten itibaren AB ülkelerine yönelik antimon sevkiyatı tamamen durmuş; fiyatlar bir sene öncesine kıyasla %300'ün üzerinde artış göstermiştir.²⁷ Ayrıca Çin'in mevcut nadir toprak elementleri lisanslama sistemi yalnızca ihracat izinlerine bağlı değildir aynı zamanda kapsamlı veri paylaşımına da dayanır. Bu kapsamda ihracatçı şirketlerden operasyonel süreçlerine, iş gücü yapılarına, üretim verilerine ve nihai kullanım amaçlarına

ilişkin detaylı bilgiler talep edilir. Ayrıca ürün ve tesis görselleri ile geçmiş ticari ilişkileri belgeleyen dokümanların da başvuru dosyasına eklenmesi istenir.²⁸

Öte yandan Çin'in ihracat politikası kritik minerallerin işlenmesine yönelik teknolojileri de kapsayacak şekilde genişliyor. Ocak 2025'te Çin Ticaret Bakanlığı, lityum demir fosfat (LFP) katot malzemesi üretimi ve lityum işleme teknolojilerine yönelik yeni ihracat lisansı düzenlemeleri önerisinde bulundu.²⁹ Kamuoyunun görüşüne sunulan bu düzenleme kritik teknolojilerin transferini kontrol etme stratejisi bağlamında değerlendirilebilir.

Tablo 3. Enerji Dönüşümünde Kullanılan Kritik Minerallere Getirilen İhracat Kısıtlamaları

Mineral Teknoloji	Üretici Ülke	Pazar Payı	Kontrol Türü
Lityum	Zimbabve	%9	Aralık 2022'de ham lityum cevheri ihracatına yasak getirildi; Ocak 2023'te tüm işlenmemiş baz mineraller için ihracat lisans zorunluluğu uygulaması kondu.
Galyum	Çin	%99	Temmuz 2023'te ihracat lisans zorunluluğu getirildi; Aralık 2024'te ABD'ye ihracat yasağı ilan etti.
Germanyum	Çin	%74	Temmuz 2023'te ihracat lisansı; Aralık 2024'te ABD'ye ihracat yasağı.
Antimon	Çin	%74	Eylül 2024'te ihracat lisansı; Aralık 2024'te ABD'ye ihracat yasağı.
Nadir Toprak Elementleri	Çin	%92	Kasım 2023'te ihracat bildirim zorunluluğu getirildi (Ekim 2025'e kadar geçerli); Nisan 2025'te 7 orta ve ağır nadir toprak elementleri için ihracat lisansları uygulaması.
Grafit	Çin	%98	Aralık 2023'te ihracat lisans zorunluluğu getirildi.
Kobalt	Kongo	%68	Şubat 2025'te dört aylık ihracat durdurma kararı açıklandı.
Tungsten	Çin	%44	Şubat 2025'te ihracat zorunluluğu getirildi.
Bizmut	Çin	%80	Şubat 2025'te ihracat zorunluluğu getirildi.
İndiyum	Çin	%70	Şubat 2025'te ihracat zorunluluğu getirildi.
Tellür	Çin	%77	Şubat 2025'te ihracat zorunluluğu getirildi.
Molibden	Çin	%81	Şubat 2025'te ihracat zorunluluğu getirildi.
Nikel	Filipinler	%9	Şubat 2025'te ham mineral ihracatına yönelik yasak önerisi getirildi.
Nadir Toprak Teknolojisi	Çin	%92	Aralık 2023'te nadir toprakların çıkarılması ve ayrıştırılması teknolojilerinin ihracatına yasak getirildi.
LFP Katot Teknolojisi	Çin	%98	Ocak 2025'te ilgili teknolojiye ihracat kontrolü önerildi.
Lityum Rafinasyonu	Çin	%72	Ocak 2025'te teknoloji ihracat kontrolü önerildi.

Kaynak: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025.

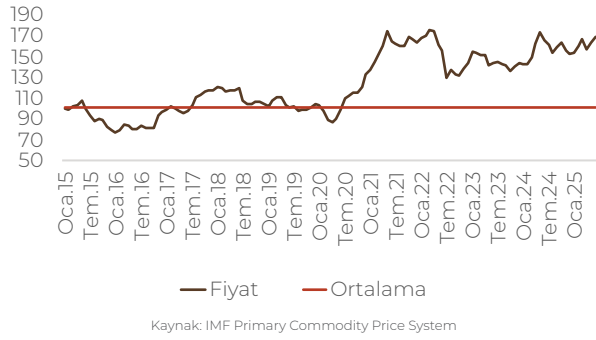
Kritik minerallere yönelik ihracat kısıtlamaları yalnızca Çin tarafından benimsenen özgün bir politika tercihi değildir. Kaynak açısından zengin birçok ülke; yerli sanayi kapasitesini geliştirme, katma değeri ulusal sınırlar içinde tutma ve stratejik özerkliğini artırma hedefiyle kritik minerallere yönelik çeşitli kontrol önlemlerine başvuruyor. Örneğin Demokratik Kongo Cumhuriyeti Şubat 2025'te kobalt ihracatını dört aylığına askıya alacağını duyurdu. Endonezya ise Ocak 2014'te başlattığı nikel cevheri ihracatına yönelik kısıtlamaları Ocak 2020 itibarıyla tam ihracat yasağına dönüştürdü. Buna ilaveten Haziran 2023 itibarıyla boksit cevheri ihracatına da benzer bir yasak getirdi. Malezya da işlenmemiş nadir toprak elementlerinin ihracatını sınırlandırmaya yönelik politikalar geliştirirken bu kapsamda yerli rafinasyon ve işleme kapasitesinin artırılmasını hedefliyor. Zimbabve ise 2023 yılında yürürlüğe koyduğu düzenlemeyle yalnızca belirli şartları karşılayan işlenmiş lityumun ihracatına izin verdiğini duyurdu. Bu kapsamda ham lityum ihracatı cumhurbaşkanlığı onayına bağlanırken bu tür ihracat izinleri yalnızca yerli kişi veya şirketlere tahsis edildi.³⁰

Kritik minerallere yönelik kısıtlamaların yoğunlaşmasında ekonomik ve jeopolitik gelişmelerin etkisi büyüktür. Özellikle 2022 yılında Rusya'nın Ukrayna'yı işgali sonrasında hızla yükselen ham madde ve enerji fiyatları ile artan jeopolitik gerilimler, bu yoğunlaşmanın altındaki temel nedenlerden bir diğeridir. OECD tarafından yapılan analizler 2023 yılında en az bir ihracat kısıtlamasına tabi tutulan kritik mineral ürünlerinin sayısının bir önceki yıla kıyasla %3,4 oranında arttığını gösteriyor. Söz konusu dönemde manganez, galyum, hafniyum, germanyum, bakır, kobalt ve nadir toprak elementleri en yoğun ihracat kısıtlamasına maruz kalan ürün grupları arasında yer alıyor. Örnek vermek gerekirse kobalt için bu oran %67'ye ulaşırken nadir toprak elementleri için %46 düzeyindedir.³¹

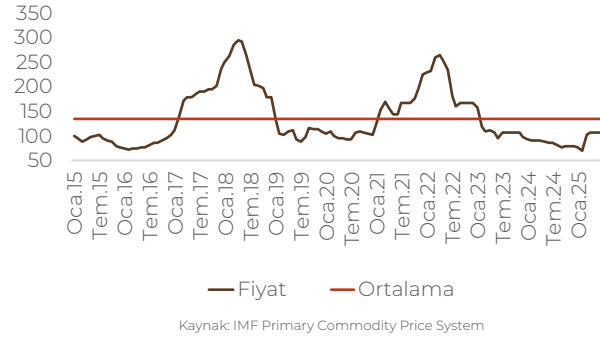
Kritik minerallerin tedarik zincirlerinde yaşanan jeopolitik yoğunlaşmaya bağlı kırılganlıklar, ülkelerin ihracat kısıtlamalarının sayıca ve kapsam olarak artması bu minerallerin fiyat oluşum mekanizmalarını da ciddi şekilde etkiliyor. Özellikle 2022 yılında Rusya-Ukrayna Savaşı'nın tetiklediği jeopolitik gerilimler, başta nikel ve vanadyum gibi Rusya üretimli kritik minerallerde fiyat dalgalanmalarına yol açmıştır. Ancak yılın ikinci çeyreğinden itibaren gözlenen fiyat artışlarının büyük bir kısmı elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerine yönelik hızla artan talebin oluşturduğu arz-talep dengesizliğinden kaynaklanıyor. 2017'den 2022'ye kadar lityum üretiminde %180 oranında artış kaydedilmiş olmasına rağmen yükselen talep karşısında arz yetersiz kalmış ve bu durum "lityum kıtlığına" neden olmuştur.³² Bu gelişmenin sonucunda 2022 yılı itibarıyla lityum fiyatları %400'ün üzerinde artış göstermiştir. Benzer şekilde nikel fiyatları yaklaşık %90 ve kobalt fiyatları ise %112 oranında yükselmiştir.

Seçili Kritik Minerallerin Fiyat Değişimleri (2015=100, endeks değerleriyle)

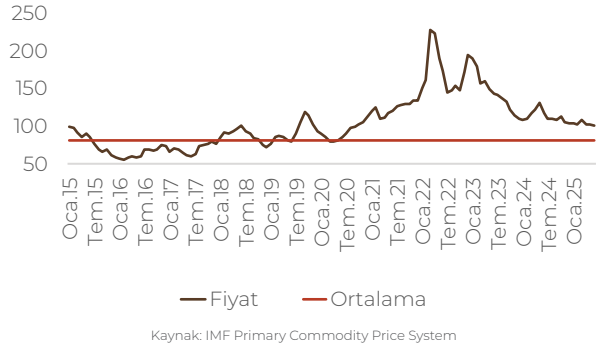
Şekil 15. Bakır Fiyatı



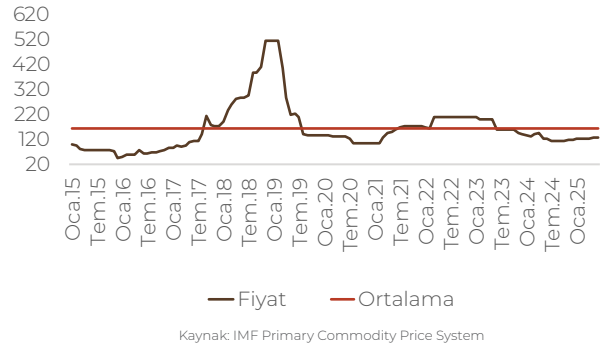
Şekil 16. Kobalt Fiyatı



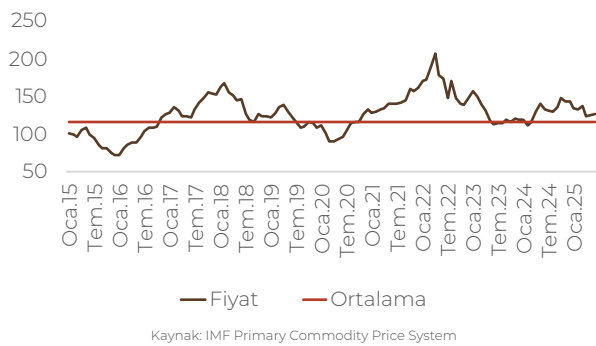
Şekil 17. Nikel Fiyatı



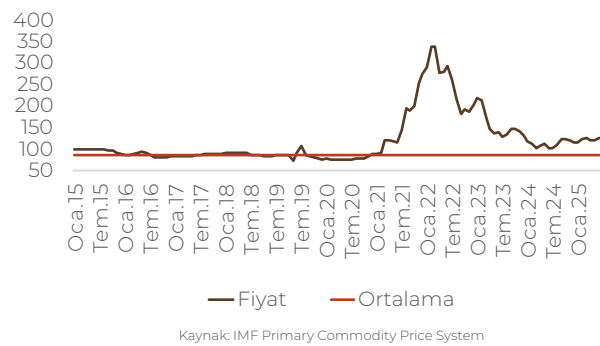
Şekil 18. Vanadyum Fiyatı



Şekil 19. Çinko Fiyatı



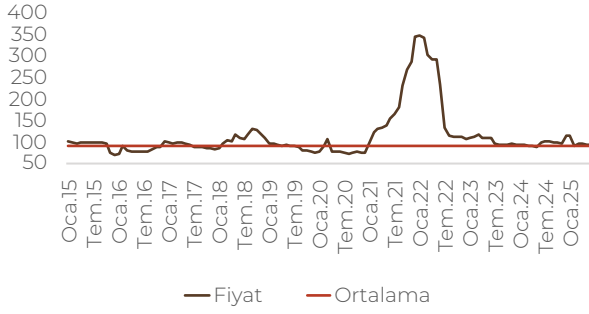
Şekil 20. Nadir Toprak Elementi Karbonatları



KRİTİK MİNERALLER

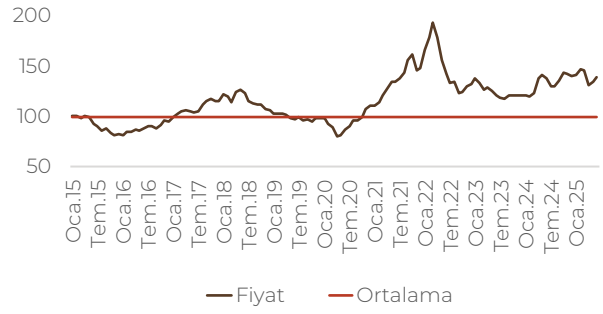
YENİ TEKNOLOJİ ÇAĞININ GİZLİ GÜCÜ

Şekil 21. Manganez Fiyatı



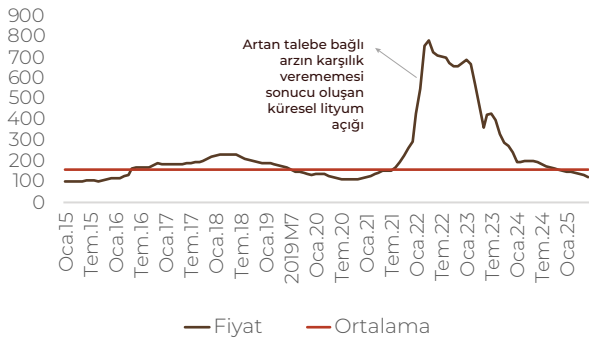
Kaynak: IMF Primary Commodity Price System

Şekil 22. Alüminyum Fiyatı



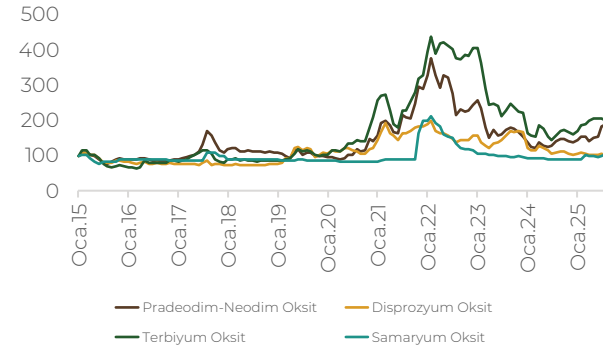
Kaynak: IMF Primary Commodity Price System

Şekil 23. Lityum Fiyatı



Kaynak: IMF Primary Commodity Price System

Şekil 24. Seçili Nadir Toprak Elementleri Fiyat Değişimleri



Not: (2025=100)

Kaynak: Bloomberg verilerinden hareketle ITOSAM tarafından hazırlanmıştır.

3.2. Çevresel ve Sosyal Riskler

Kritik mineraller, literatürde “ikiz dönüşüm” olarak adlandırılan yeşil ve dijital dönüşümün yanı sıra teknolojik ilerlemenin de vazgeçilmez yapı taşlarıdır. Ancak tüm stratejik önemlerine karşın bu minerallerin çıkarılması ve işlenmesi doğrudan madencilik faaliyetlerine dayanmaktadır. Madencilik ise çevresel ve toplumsal açıdan ciddi riskleri beraberinde getirmektedir.

Madencilik faaliyetleri çoğu zaman bulundukları ekosistemleri doğrudan veya dolaylı şekilde olumsuz etkileyerek habitat kaybına, ormansızlaşmaya, su ve toprak kirliliğine ve biyolojik çeşitlilikte azalmaya yol açmaktadır.³³ Örneğin, dünya lityum rezervlerinin yaklaşık

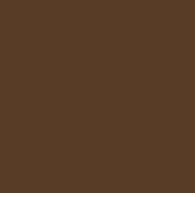
yarısını barındıran Güney Amerika'daki "Lityum Üçgeni" bölgesinde, madencilik kaynaklı su tüketimi tarımsal üretimi sekteye uğratmış ve flamingo gibi türlerin yaşam alanlarını daraltmıştır. Benzer şekilde Arjantin'de Hombre Muerto bölgesinde yaşayan topluluklar, lityum için yoğun su pompalanmasının ardından hayvanlarını otlattıkları çayırların kuruduğunu belirtmiştir.³⁴ Çin'de nadir toprak elementlerinin çıkarılması ise hem toprak hem de suyun kirlenmesine neden olmuş, "zehir gölleri" olarak adlandırılan devasa atık sahalarının ortaya çıkmasına yol açmıştır.

Çevresel etkilerin ötesinde, bu süreçlerin en ağır yükünü çoğu zaman yerli ve yerel topluluklar taşımaktadır. Su kaynaklarının kirlenmesi, tarım arazilerinin verimsizleşmesi ve hava kirliliği; geçim kaynaklarını zayıflatarak yoksulluğu derinleştirmekte, göçü tetiklemekte ve sosyal huzursuzlukları artırmaktadır.³⁵ Angola, Çad ve Demokratik Kongo Cumhuriyeti örneklerinde görüldüğü üzere doğal kaynak zenginliği çoğu zaman "kaynak laneti"ne dönüşürken yolsuzluk, otoriter yönetimler, militarizasyon ve iç çatışmalarla birlikte toplumsal refah yerine yoksulluk ve istikrarsızlığı derinleştirmektedir.³⁶

Madenciliğin halk sağlığı üzerindeki etkileri de göz ardı edilemeyecek boyuttadır. Brezilya'da altın madenciliği, sıtma vakalarının artışında başlıca etkenlerden biri olarak görülmektedir.³⁷ Afrika'da bazı bölgelerde Ebola ve sarı humma salgınlarının madencilik faaliyetleriyle bağlantılı olduğu ortaya konmuştur.³⁸ Koruyucu ekipmandan yoksun çalışan işçiler ağır metal zehirlenmeleri, solunum yolu rahatsızlıkları ve iş kazalarıyla karşı karşıya kalmaktadır. Bu durum yalnızca bireysel sağlık sorunları yaratmakla kalmayıp zincirleme şekilde gıda üretiminin azalması, yetersiz beslenme, zorunlu göçler, suç oranlarının artması ve toplumsal istikrarsızlık gibi sonuçlar doğurmaktadır.

Latin Amerika'daki deneyimler, bu risklerin en somut örneklerini temsil ediyor.³⁹ Kolombiya Amazonu ve Pasifik kıyılarında yasa dışı altın ve mineral madenciliği, silahlı grupların kontrolünde yürütülürken bu süreçte cıva ile su kaynakları kirleniyor ve yerel halkın sağlığı ciddi tehdit altına giriyor. Amazon-Orinoco havzasındaki nadir toprak elementleri arayışları ise çevresel ve sosyal kırılganlıkları derinleştirmiş; savunmasız haldeki işçilerin insan onuruna yakışmayan çalıştırılmasına neden olmuştur. Uzun yıllar silahlı çatışmalar, kitlesel yerinden edilmeler ve organize suç gruplarıyla şekillenen Kolombiya'daki toplumsal yapı bu durumu daha da karmaşık hale getirmiştir. Yerli, Afro-Kolombiyalı ve kırsal toplulukların sistematik şekilde hedef alınması, mineral çıkarımının insan hakları merkezli bir yaklaşımla ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Benzer biçimde Myanmar'ın Çin sınırındaki Kachin bölgesinde, çevresel denetimin yok denecek kadar az olması, silahlı grupların nadir toprak elementlerini kontrol altına almasına zemin hazırlamaktadır.⁴⁰

Bu tablo, kritik minerallerin sunduğu teknolojik ve ekonomik fırsatların yanında, çıkarma süreçlerinin doğurduğu çevresel ve toplumsal maliyetlerin de göz ardı edilmemesi gerektiğini göstermektedir. Yeşil ve teknolojik dönüşüm coşkusu içerisinde gözden kaçırılmaması gereken gerçek; bu sürecin bazı bölgeleri "feda edilmiş bölgeler"e dönüştürerek yeni adaletsizlikler yaratma riskidir. Bu dönüşümlerin ki özellikle yeşil dönüşümün *kimseyi geride bırakmadan*, adil ve sürdürülebilir olabilmesi yalnızca teknolojik çözümlerle değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal maliyetlerin kabul edilmesi, telafi edilmesi ve adil biçimde paylaşılmasıyla mümkündür.



4.

BÖLÜM

SONUÇ

Kritik mineraller, tarih boyunca uygarlıkların yönünü belirleyen enerji kaynakları ve madenlerle kurulan ilişkinin günümüzdeki en güncel tezahürüdür. Nasıl ki geçmişte kömür Sanayi Devrimi'nin, petrol ise 20. yüzyılın siyasal ve ekonomik dengelerinin temelini oluşturduysa, günümüzün yeşil ve dijital dönüşüm süreçleri de lityum, kobalt, nikel, grafit ve nadir toprak elementleri gibi minerallerin stratejik önemini giderek artırmaktadır. Bu mineraller yalnızca teknolojik yeniliklerin itici gücü değil, aynı zamanda ekonomik büyüme, istihdam yaratma ve küresel rekabet alanlarının da belirleyicisi haline gelmiştir. Yenilenebilir enerji, elektrikli araçlar, batarya teknolojileri, dijital altyapılar ve ileri savunma sanayii uygulamaları düşünüldüğünde kritik mineraller, modern toplumların sürdürülebilirlik, güvenlik ve kalkınma hedeflerinin kesişim noktasında yer almaktadır.

Ancak bu stratejik değer, beraberinde ciddi kırılganlıkları da gündeme taşımaktadır. Üretim ve rafinasyon süreçlerinin belirli coğrafyalarda, özellikle Çin gibi birkaç aktörde yoğunlaşması, arz güvenliğini yüksek oranda jeopolitik gerilimlere bağımlı kılmaktadır. Ticaret savaşları, ihracat kısıtlamaları ve stratejik ambargolar, kritik minerallerin yalnızca ekonomik değil aynı zamanda diplomatik bir koz olarak da kullanılabileceğini açıkça göstermektedir. Bu durum, ülkelerin ulusal güvenlik stratejilerinde madencilik ve tedarik zincirlerinin giderek daha merkezi bir yere oturmasına yol açmaktadır. Nitekim son yıllarda ABD, Avrupa Birliği ve diğer aktörler, yerli üretim ve işleme kapasitesini artırmaya, stratejik stoklar oluşturmaya ve tedarik kaynaklarını çeşitlendirmeye yönelik politikaları hızla devreye sokmuştur.

Öte yandan kritik minerallerin çıkarılması, çevresel ve toplumsal maliyetleri bakımından da ciddi bir sınamadır. Madencilik faaliyetlerinin su kaynaklarını tüketmesi, toprak ve hava kirliliğini artırması ve biyolojik çeşitliliği tehdit etmesi, “yeşil dönüşüm” kavramının ironik bir şekilde ekolojik tahribatla iç içe geçtiğini göstermektedir. Ayrıca kaynakların çoğunlukla insan hakları standartlarının zayıf olduğu bölgelerde bulunması, yerel toplulukların yaşam alanlarının daralmasına, zorunlu göçlere ve sosyal adaletsizliklere neden olmaktadır. Bu nedenle enerji ve teknoloji odaklı büyük dönüşüm süreçlerinin gerçekten sürdürülebilir olabilmesi, yalnızca teknolojik çözümlerle değil aynı zamanda çevresel maliyetlerin azaltılması, toplumsal sorumlulukların üstlenilmesi ve uluslararası etik standartların gözetilmesiyle mümkündür.

Sonuç olarak, kritik mineraller günümüz ekonomi politiğinin en stratejik unsurlarından biri olarak küresel gündemi belirlemektedir. Onların bulunduğu fırsatlar, iklim değişikliği ile mücadele, dijitalleşme ve teknolojik yeniliklerin hızlandırılması açısından hayati öneme sahiptir. Ancak aynı zamanda tedarik zinciri kırılganlıkları, jeopolitik rekabet, çevresel tahribat ve toplumsal adaletsizlikler gibi riskleri de beraberinde getirmektedir. Bu ikili gerçeklik, uluslararası toplumun önüne karmaşık ama ertelenemez bir görev koymaktadır: kritik mineralleri yalnızca ekonomik ve teknolojik ilerlemenin motoru olarak değil, aynı zamanda küresel ölçekte adil, şeffaf ve sürdürülebilir bir düzenin inşasında doğru yönetilmesi gereken stratejik bir sorumluluk olarak ele almak. Geleceğin dünyası, bu küçük hacimli fakat büyük etkili minerallerin nasıl değerlendirileceğine bağlı olarak şekillenecektir.

SON NOTLAR

- ¹ IRENA & ILO, “Renewable energy and jobs: Annual review 2024, 2024.
- ² ABD’nin kiritik mineraller listesini hazırlarken baz aldığı kriterler ve 2022 yılına ait nihai kritik mineraller listesi hakkında detaylı bilgi için bkz. Congress.gov, “Critical Mineral Resources: National Policy and Critical Minerals List”, <https://www.congress.gov/crs-product/R47982>, (erişim tarihi: 16.07.2025).
- ³ Avrupa Komisyonu’nun kritik mineraller listesi hazırlarken baz aldığı kriterler ve 2023 yılına ait nihai kritik mineraller listesi hakkında detaylı bilgi için bkz. European Commission, “Critical raw materials”, https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en#fifth-list-2023-of-critical-raw-materials-for-the-eu, (erişim tarihi: 16.07.2025).
- ⁴ İlgili ülkelerin kritik mineraller listeleri için bkz. Government of Canada, “Critical minerals in Canada”, <https://www.canada.ca/en/campaign/critical-minerals-in-canada/critical-minerals-an-opportunity-for-canada.html>; Department of Industry, Science and Resources, “Australis’s Critical Minerals List and Strategic Materials List”, <https://www.industry.gov.au/publications/australias-critical-minerals-list-and-strategic-materials-list>; Ministry of Mines, “Thirty Critical Minerals List Released”, <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=1942027>, (erişim tarihi: 16.07.2025).
- ⁵ Ford Still Scrambling to Get Rare-Earth Magnets”, *Wall Street Journal*, <https://www.wsj.com/business/autos/ford-still-scrambling-to-get-rare-earth-magnets-2bc0aee6>; “Nissan to scale back production plan for new EV due to China rare earth curbs, Kyodo reports”, Reuters, <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/nissan-scale-back-production-plan-new-ev-due-china-rare-earth-curbs-kyodo-2025-07-08/> (Erişim tarihi: 17.07.2025).
- ⁶ Euan Graham vd., “Global Electricity Review 2025”, Ember, Nisan 2025.
- ⁷ Fosil yakıtlara dayalı geleneksel enerji sistemi, merkezi enerji sistemi modeli üzerine inşa edilmiştir. Bu modelde, fosil yakıtlar genellikle büyük ölçekli enerji santrallerinde enerjiye dönüştürülmekte ve elde edilen yüksek miktardaki enerji uzun mesafeler boyunca sağlanan iletim hatlarıyla tüketim merkezlerine ulaştırılmaktadır. Buna karşın yenilenebilir enerji sistemleri ağırlıklı olarak dağıtık enerji modeli prensibine dayanmakta ve üretim, tüketim noktalarına yakın alanlarda gerçekleştirilmektedir. Daha

detaylı bilgi için bkz. IEA, Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources: Power system opportunities and best practices, Mayıs 2022, <https://www.iea.org/reports/unlocking-the-potential-of-distributed-energy-resources>.

⁸ IEA, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transition, Mayıs 2021.

⁹ Pieter van Exter, Sybren Bosch, Branco Schipper, Benjamin Sprecher, Rene Kleijin, Metal Demand For Renewable Electricity Generation In the Netherlands: Navigating a Complex Supply Chain. Metabolic, Universität Leiden, Copper.

¹⁰ Todd Lopez, “DOD Looks to Establish ‘Mine-to-Magnet’ Supply Chain for Rare Earth Materials”, U.S. Department of Defense, 11.03.2024, <https://www.defense.gov/News/News-Stories/Article/Article/3700059/dod-looks-to-establish-mine-to-magnet-supply-chain-for-rare-earth-materials/>, (Erişim tarihi: 17.07.2025).

¹¹ IEA, Energy and AI, Nisan 2025, <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>.

¹² Bloomberg, Why Rare Earths Are China’s Trump Card in Trade War With US, 12 Haziran 2025, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2025-06-12/how-china-s-rare-earths-dominance-provides-leverage-in-trump-trade-war>, (Erişim tarihi: 22.07.2025).

¹³ Etem Karakaya, “Kritik mineraller ve hammaddelerde ciddi tedarik riski var”, İklimması, <https://www.iklimmasasi.com/kritik-mineral-ve-hammaddelerde-ciddi-tedarik-riski-var/>, (Erişim tarihi: 22.07.2025).

¹⁴ Detaylı bilgi için bkz. U.S.G.S – Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2025, Mart 2025, (Erişim tarihi: 23.07.2025)

¹⁵ Guillaume Pitron, Nadir Metaller Savaşı: Enerji Geçiřinin ve Dijitalleşmenin Karanlık Yüzü, (İř Bankası Kültür Yayınları, 2024).

¹⁶ Financial Times, China won the rare earths race. Can it stay on top?, <https://www.ft.com/content/045bf600-a89d-4dda-b63b-0a88024b80a4> (Erişim tarihi: 10.09.2025).

¹⁷ Financial Times, Letter: What’s missing from the US rare earths supply chains, <https://www.ft.com/content/78d27637-5e9a-4a65-b704-ba078e52e215>, (Erişim tarihi: 10.09.2025).

¹⁸ Etem Karakaya, “Kritik mineraller ve hammaddelerde ciddi tedarik riski var”, İklimması.

¹⁹ I. İrem Gündüz vd., “Ulaşım sektörünün sürdürülebilir dönüşümünde kritik malzemelerin rolü: Elektrikli araç bataryalarındaki kritik minerallerin durum değerlendirmesi”, ODTÜ Geliřme Dergisi, 52 (Haziran), 2025, 119-151.

- ²⁰ Bingül Satioğlu, Ticaret Savaşlarında Yeni Perde: Yeşil Dönüşüm, İTOSAM Görüş Yazısı, 09.07.2024, <https://itosam.org.tr/gundem/ticaret-savaslarinda-yeni-perde-yesil-donusum-cosm>.
- ²¹ Chad P. Bown, US – China Trade War Tariffs: An Up-to-Date Chart, Peterson Institute for International Economics, <https://www.piie.com/research/piie-charts/2019/us-china-trade-war-tariffs-date-chart>, 14 Mayıs 2025; “A Timeline of the U.S. – China Trade War So Far”, Time, 27.06.2025, <https://time.com/7292207/us-china-trade-war-trump-tariffs-timeline/>, (Erişim tarihi: 23.07.2025).
- ²² Angela Huyue Zhang, Rare Earths Are China’s Trump Card, Project Syndicate.
- ²³ “China bans export of critical minerals to US as trade tensions escalate”, Reuters, <https://www.reuters.com/markets/commodities/china-bans-exports-gallium-germanium-antimony-us-2024-12-03/>.
- ²⁴ Reuters, China, world’s top graphite producer, tightens exports of key battery, <https://www.reuters.com/world/china/china-require-export-permits-some-graphite-products-dec-1-2023-10-20/>.
- ²⁵ Reuters, China expands key mineral export controls after US imposes tariffs, <https://www.reuters.com/world/china/china-expands-critical-mineral-export-controls-after-us-imposes-tariffs-2025-02-04/>.
- ²⁶ The New York Times, Amid Tension, China Blocks Vital Exports to Japan, <https://www.nytimes.com/2010/09/23/business/global/23rare.html>.
- ²⁷ Discovery Alert, China’s Antimony Export Controls Disrupt EU Supply Chains, <https://discoveryalert.com.au/news/china-antimony-export-controls-impact-eu-supply-2025/>; Reuters, China export controls freeze antimony shipments to EU from October, <https://www.reuters.com/markets/commodities/china-export-controls-freeze-antimony-shipments-eu-october-2025-03-20/>; Reuters, China’s rare earth exports grind to a halt as trade war controls bite, <https://www.reuters.com/markets/commodities/chinas-rare-earth-exports-grind-halt-trade-war-controls-bite-2025-04-11/>.
- ²⁸ Financial Times, China demands sensitive information for rare earth exports, companies warn <https://www.ft.com/content/0fce7177-a713-4c06-ba22-0ae429efe73f>.
- ²⁹ Reuters, China proposes further export curbs on battery, critical mineral tech, <https://www.reuters.com/technology/china-proposes-further-export-curbs-battery-critical-minerals-tech-2025-01-02/>.
- ³⁰ Ülkelerin kritik minerallere yönelik getirmiş olduğu kısıtlamalar Uluslararası Enerji Ajansı’nın ilgili veritabanından elde edilmiştir. Detaylı bilgi için bkz. IEA, Critical Minerals Policy Tracker,

<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/critical-minerals-policy-tracker>,
(Erişim tarihi: 23.07.2025)

- ³¹ OECD, OECD Inventory of Export Restrictions on Industrial Raw Materials 2025: Monitoring the Use of Export Restrictions Amid Growing Market and Policy Tensions, (OECD Publishing, Paris, 2025).
- ³² IEA, Global EV Outlook 2023, Nisan 2023.
- ³³ WWF, Critical Minerals at a Critical Moment, Mayıs 2025.
- ³⁴ Yale Environment360, Why the Rush to Mine Lithium Could Dry Up the High Andes.
- ³⁵ The Conversation, Niger delta is rich in resources, but environmental destruction is pushing people into poverty.
- ³⁶ Tom Achoki, The Critical- Minerals Race Could Fuel Global Inequality, Project Syndicate, Haziran 2024.
- ³⁷ Gold Mining in Brazil's Amazon Rainforest is a Major Contributor to Malaria Outbreaks, Stanford Research Brief, Mayıs 2021.
- ³⁸ Rob Wallace ve Rodrick Wallace, "Ebola's Ecologies", New Left Review 102, Kasım/Aralık 2016.
- ³⁹ Tom Achoki, The Critical- Minerals Race Could Fuel Global Inequality, Project Syndicate, Ağustos 2025.
- ⁴⁰ Bloomberg Businessweek Türkiye, Çin sınırında isyancılar nadir toprak metal imparatorluğu kuruyor, Ağustos 2025.

KRİTİK MİNERALLER

YENİ TEKNOLOJİ ÇAĞININ GİZLİ GÜCÜ