

Ulaşım sektörünün sürdürülebilir dönüşümünde kritik malzemelerin rolü: Elektrikli araç bataryalarındaki kritik minerallerin durum değerlendirmesi*

İlgın İrem Gündüz

*Orta Doğu Teknik Üniversitesi, ODTÜ, TEKPOL (Bilim ve Teknoloji Politikaları
Araştırma Merkezi), Ankara
e-posta: ilginiremm@gmail.com
ORCID: 0009-0006-7383-7217*

Erkan Erdil

*Orta Doğu Teknik Üniversitesi - İktisat Bölümü ve ODTÜ-TEKPOL, Ankara
e-posta: erdil@metu.edu.tr
ORCID: 0000-0003-3091-2441*

Yelda Erden Topal

*Orta Doğu Teknik Üniversitesi – İşletme Bölümü ve ODTÜ-TEKPOL, Ankara
e-posta: yeldae@metu.edu.tr
ORCID: 0000-0003-2093-6685*

* Geliş/Submitted: 06.05.2025, Accepted/Kabul: 29.06.2025

Özet

Türkiye'nin Ulusal Katkı Beyanında yer alan karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşması, ulaşım sektöründe temiz teknolojilerin yaygınlaşmasını gerektirmektedir. Elektrikli araçlar bu dönüşümde merkezi bir rol oynarken, batarya ve depolama teknolojilerinde kullanılan hammaddeler ve kritik mineraller ise bu bağlamda öne çıkmaktadır. Üretim ve ihracat ithalat karşılama oranları incelendiğinde; Türkiye'nin gerekli malzemelerin tedarikinde göze çarpan dışa bağımlılığı kırılganlık yaratmakta ve bu nedenle de kritik mineraller için sanayi ve teknoloji politikalarının geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Küresel bağlamda da, Çin'in hammadde kaynaklarına hâkimiyeti ve ABD-Çin gerilimleri bu alandaki riskleri artırmaktadır. Çalışmanın amacı, elektrikli araçlar için gerekli hammaddelerden olan kritik minerallerin üretim ve fiyat verileri üzerinden küresel ölçekte ve Türkiye'deki mevcut durumu değerlendirmek ve sürdürülebilir dönüşümün sağlanması için sektörde atılabilecek adımlara yönelik öneriler geliştirmektir. Analiz sonuçları, Türkiye'nin yerli üretim, Ar-Ge ve tedarik zincirini güçlendirme politikalarıyla sektörel entegrasyon sağlamasının, özellikle kritik minerallerin rekabet gücünün artırılması ve sürdürülebilir dönüşümün sağlanabilmesi için gerekli olduğunu göstermiştir,

Anahtar kelimeler: Depolama, kritik mineraller, küresel fiyatlar, Türkiye, politika önerileri,

1. Giriş

Paris Anlaşması ve Yeşil Mutabakat belgeleriyle ortaya koyulan temiz enerjiye geçiş ve sıfır karbon emisyonu hedeflerinin, beraberinde getirdiği zorluklar olsa da, 2050'ye kadar gerçekleşmesi yolunda önemli adımlar atılmaktadır. Karbon emisyonunda en büyük paylardan birine sahip ulaşım sektörü de elektrikli araçlar (EA) vesilesiyle bu dönüşümün tam ortasındadır. EA'lar son yıllarda giderek daha geniş kitlelerce kullanılmalarına rağmen, geleneksel içten yanmalı araçlara göre batarya paketi gibi yüksek teknolojik bileşenler içermeleri sebebiyle daha maliyetlidir. Bu teknolojinin benimsenip daha da yaygınlaşması konusunda araç menzilinın kısa olması ve şarj istasyonlarının yetersizliği gibi alt yapı eksiklikleri ile şarj olma süresinin uzunluğu gibi teknolojiye içkin engeller olsa da, asıl önemli unsur maliyeti doğrudan etkileyen batarya ömrü ve batarya üretim aşamalarıdır. Türkiye Sınai Kalkınma Bankası'nın (TSKB) 2021 yılında yayımlanan "Elektrikli Araçlar ve Depolama Teknolojileri" başlıklı bilgi notuna göre elektrikli araçların maliyetinin yaklaşık %30'unu batarya maliyeti oluşturmaktadır (TSKB, 2021). Batarya maliyetinin yüksek oluşu, Lityum-iyon (Li-iyon) pillerde kullanılan ham madde fiyatlarından, teknoloji üretiminin yaygınlaşmamasından ve üretim verimliliğinin düşüklüğünden kaynaklanmaktadır. 2030 için öngörülen çoğu senaryoda ham madde fiyatlarının payının %15 ila %19'a kadar gerileyeceği tartışılmaktadır.

Bu bağlamdan hareketle çalışmanın temel amacı, Li-iyon pillerde kullanılan kritik malzemelerin küresel fiyatlar üzerinden mevcut durum değerlendirmesini ve ve Türkiye'nin bu malzemeler açısından ne durumda olduğunu tespit etmektir. Kritik malzemeler konusunda mevcut politika yapısını hem Türkiye açısından hem de küresel bağlamda ortaya koymak ve mevcut bu politik yapı içinde Türkiye'nin

Paris Anlaşması ile birlikte gelen hedeflerine ulaşma yolunda kritik malzemeler konusunda atacağı adımları belirlemek amaçlanmıştır. Çalışmanın sonunda bu amacın gerçekleştirilmesine yönelik politika önerileri sunulmuştur.

2. Global piyasada kritik malzemeler

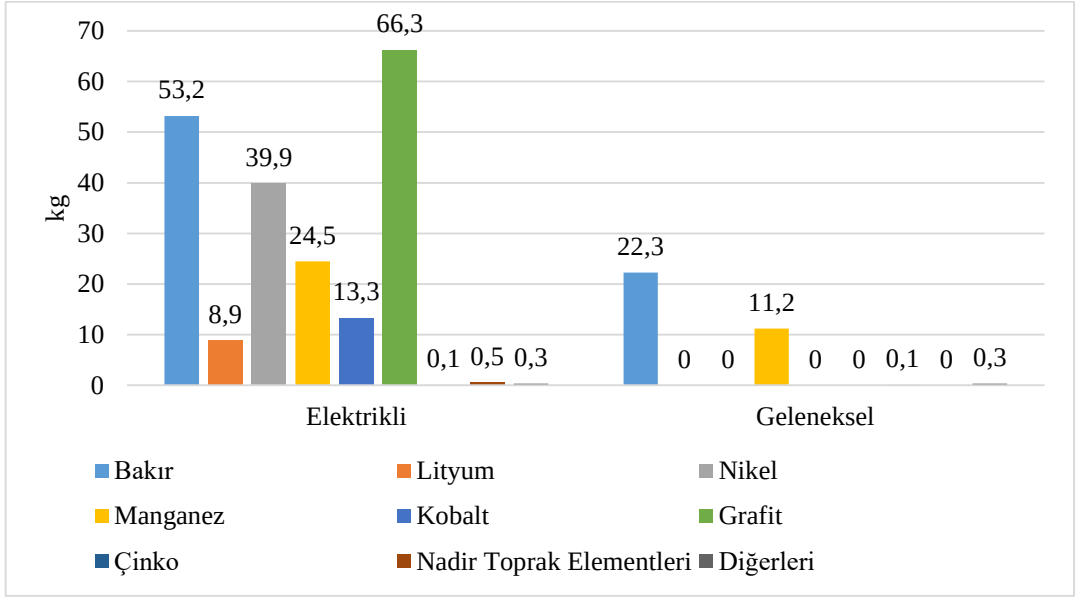
2.1. Kritik malzemelerin tanımı ve önemi

Uluslararası Enerji Ajansı'nın (International Energy Agency, IEA) 2022 yılında yayınladığı “Temiz Enerji Geçişlerinde Kritik Minerallerin Rolü - Dünya Enerji Görünümü Özel Raporu” adlı çalışmada temiz enerjiye geçiş için güvenilir, sürdürülebilir ve dayanıklı sistemler kurulması çok yönlü şekilde ele alınmıştır. Bu raporda bir EA'nın geleneksel araçlara kıyasla altı kat daha fazla mineral girdisine ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir (IEA, 2021) (Şekil 1). Bu mineraller ise lityum, nikel, kobalt, mangan, grafit, silisyum, nadir toprak elementleri, bakır ve alüminyum olarak listelenmiştir. Bu minerallerin işlevlerini basitçe tanımlamak gerekirse;

- *Lityum*: Pil hücresinin ana bileşenidir, Lityum iyonları, pil hücresinde elektrik enerjisinin depolanmasını ve taşınmasını sağlar.
- *Nikel, kobalt ve mangan*: Pil hücresinin katodunda bulunan malzemelerdir. Bu malzemeler, pil hücresinin enerji yoğunluğunun ve performansının artırılmasına yardımcı olur.
- *Demir*: Pil hücresinin katodunda bulunan bir diğer malzemedir. Demir, pil hücresinin maliyetini düşürmeye yardımcı olur.
- *Alüminyum*: Pil hücresinin anodunda bulunan bir malzemedir. Alüminyum, pil hücresinin maliyetini düşürmeye yardımcı olur.
- *Bakır*: Pil hücresinin anodunda bulunan bir malzemedir. Bakır, pil hücresinin iletkenliğini artırmaya yardımcı olur.
- *Grafit*: Pil hücresinin anodunda bulunan malzemedir. Grafit, pil hücresinin şarj ve deşarj performansını artırmaya yardımcı olur.
- *Silisyum*: Pil hücresinde yüksek kapasiteli bir anot malzemesi olarak kullanılabilir. Grafitten daha fazla lityum iyonu depolayabilir ve bu da pilin daha fazla enerji depolamasını sağlar. Bu, pilin daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasını sağlar.
- *Nadir Toprak Elementleri (NTE)*: IUPAC (2005) tanımına göre, Nadir Toprak Elementleri (NTE), atom numarası 57–71 arasında yer alan 15 lanthanoid element ile kimyasal ve fiziksel benzerlikleri nedeniyle bu gruba dahil edilen scandium (Sc) ve itriyum'u (Y) kapsayan 17 element grubudur. NTE, nikel, kobalt ve mangan gibi, pillerin katot malzemesinde kullanılabilir. Bu elementler, pilin daha yüksek voltaj ve daha fazla enerji

yoğunluğuna sahip olmasını sağlar. Ayrıca pilin elektrolitine katkı maddesi olarak kullanılabilir. Bu, pilin daha uzun ömürlü ve daha stabil olmasını sağlar.

Şekil 1¹
Elektrikli Araçlarda Yer Alan Mineral Miktarı



Kaynak: IEA (2021); *Critical Minerals Market Review 2021*, [link](#), Lisans: CC BY 4,0,

Bu mineraller yalnızca elektrikli araçlar için değil, güneş santralleri ve rüzgar türbinlerinin üretimi için de olmazsa olmaz konumdadır. Dolayısıyla karbonsuzlaşmayı sağlamak, ya da petrol ve doğalgaz gibi fosil kaynaklara olan bağımlılığı azaltmak isterken, bu minerallere yeni bir bağımlılık yaratılması ve madencilik çalışmaları sonucu su ve toprak kirliliği oluşması gibi sonuçlarla da karşılaşılabilmesi olasıdır. Bu nedenlerle, kritik mineraller, batarya depolama teknolojileri açısından “pil üretiminde alternatiflerinin yeteri kadar bulunamaması ya da daha maliyetli olması sebebiyle yeni teknolojilerin üretilmesindeki hayati rolü ve tedarik sürecinde barındırdığı riskler açısından giderek artan talebi karşılanmaya çalışılan hammaddeler” olarak tanımlanabilecektir. Amerika Birleşik Devletleri

¹ Bu şekil, yazarları tarafından IEA mteryalinden türetilmiştir ve yazarlar bu türetmeden tek başına sorumlu ve yükümlüdür. Türetme IEA tarafından hiçbir şekilde desteklenmemektedir

(ABD)'nin 2020 Enerji Yasası'nın 7002, Madde'sine göre ise kritik mineraller şu şekilde tanımlanmıştır: "Tedarik zincirinde kesinti riski taşıyan, yakıt olmayan ve enerji üretme, iletme ve depolamada kullanılan teknolojiler için temel bir işlevi olan herhangi bir element, madde ve malzeme" (IEA, 2025). Ayrıca Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırma Kurumu (USGS, United States Geological Survey) tarafından 2022 yılında ABD için kritik mineraller listesi yayınlanmıştır. Benzer şekilde Avrupa Birliği de 30 maddelik bir listeye sahiptir.

3. Arz ve talebe dair değişiklikler ve öngörüler

Kritik minerallere olan talebin, EA piyasası büyümeye devam ettikçe ve dolayısıyla bataryaya olan talep arttıkça artması beklenmektedir. IEA'nın 2023 yılı Küresel EA Görünümü (*Global EV Outlook 2023*) raporuna göre, li-iyon pil talebi 2022 yılında 2021'e göre %65 artmıştır (IEA, 2023a). Küresel talebi bu denli artıran faktörlerden birisi de devlet politikalarının iklim hedefleri yönündeki uygulama kararlılığıdır. 2030, 2040 ve 2050 gibi onar yıllık dönemler için yapılan senaryo analizlerinde talep artmaya devam etse de, 2050 de karbon - nötr olma hedefine ulaşılması da mümkün görünmemektedir. Çünkü, talep artmaya devam ederken arz güvenliği sorunu da gündeme daha sık gelmeye başlamaktadır.

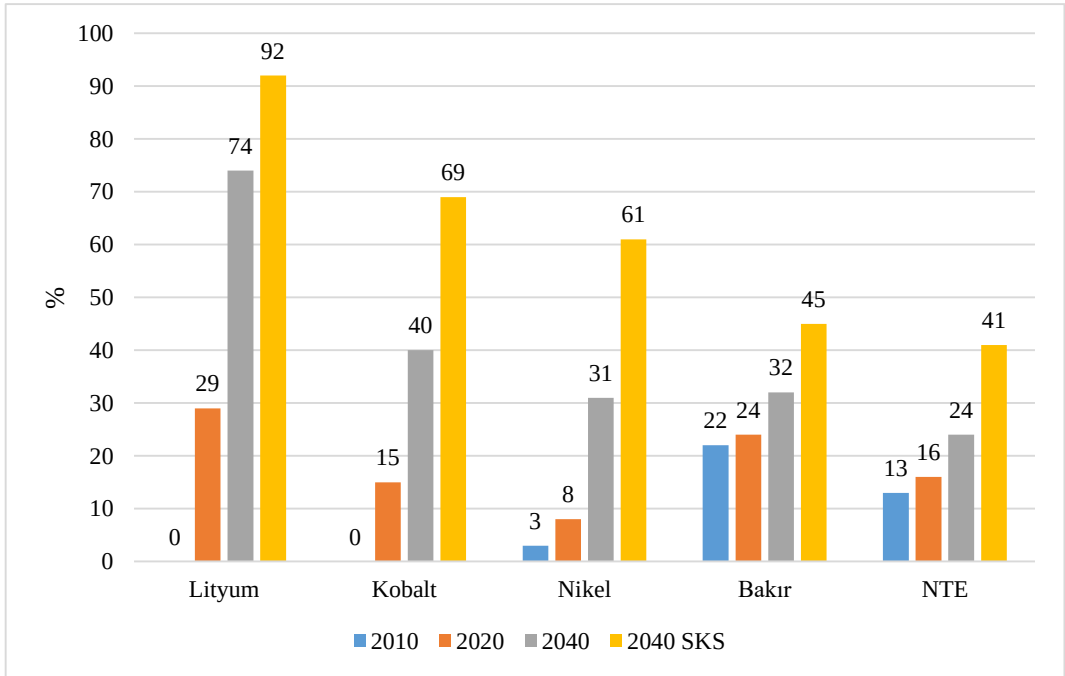
Özellikle mineraller söz konusu olduğunda ülkelerin jeopolitik konumları da hesaba katılmalıdır. 2040'a kadar talebin yukarı yönlü hareketi, minerallere olan talebin artması ve nihayetinde arzın artan talebi karşılamasında sorunlar oluşması ile sonuçlanacaktır. Aşırı talebin kritik mineral fiyatlarında yarattığı enflasyonist etki ise, EA üretim ve kullanım maliyetlerinde artışlara neden olacak, dolayısıyla iklim hedeflerinin geleceği tartışmalı hal alacaktır. Tüm bu sebeplerle kritik minerallerin fiyatlarındaki hareketliliği ve trendleri görebilmek adına dünya çapındaki rezerv ve üretim miktarları, bu minerallerin piyasadaki payları ve toplam ithalat - ihracat verilerine bakmak, bu minerallerin küresel düzeyde mevcut durumunu değerlendirmek konusunda bize yardımcı olacaktır.

Kritik minerallerin talep ve arzı, global gelişmelerden etkilenmeye oldukça açıktır. 2020'de ortaya çıkan Covid-19 salgını, madencilik sektörünü de etkileyerek tedarik zincirinde bozulmalara yol açmıştır. Peru'dan Çin'e kadar kritik mineralleri işleyen ve üreten birçok ülkede madenler, rafineriler ve fabrikalar kapanmıştır (Akçıl vd, 2020). Bu durum, yenilenebilir enerjiye yatırım yapan ülkelerin tedarik endişesiyle stoklama yapmasına ve nadir toprak elementleri de dahil olmak üzere fiyatların artmasına neden olmuştur. Dolayısıyla tam rekabetçi bir sektör hala oluşamamıştır.

McKinsey&Company'nin 2023 yılı Ocak ayında yayınladığı çalışmaya göre, madencilikten geri dönüşüme kadar tüm li-iyon pil zinciri piyasasının 2022'den 2030'a kadar geçireceği süreçte her yıl %30 artarak 4,7 TWh büyüklüğüne ve 400

milyar dolardan fazla değere ulaşacağı öngörülmektedir (McKinsey and Company, 2024). Bu denli büyüyecek bir piyasanın arz kıtlığı yaşamaması yatırım ve büyük ölçekli sanayileşmeyi gerektirmektedir. Bu bağlamda 2030 yılında lityum karbonat talebinin arzından çok daha az olacağı; nikel için talep ve arz yakın olsa da çok az farkla talebin fazla olacağı; kobalt için arzın yeterli olacağı, manganez için nikelde olduğu gibi çok az farkla talebin daha fazla olacağı öngörülmüştür (McKinsey and Company, 2024).

Şekil 2'
Temiz Enerji Minerallerinin Toplam Talep İçindeki Payı



Kaynak: IEA (2024); *Critical Minerals Market Review 2024*, [link](#), Lisans: CC BY 4,0,

“Toplam talep” deyimi, elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji santralleri, enerji depolama sistemleri, elektronik cihazlar ve inşaat sektörü gibi tüm uygulamalarda kullanılan minerallerin net ihtiyaç miktarını (geri dönüşümle karşılanan miktarlar hariç) kapsar. Şekil 2’ye göre, 2020-2040 döneminde iki farklı iklim politikası yol haritası öngörülmüştür: STEPS (Stated Policies Scenario),

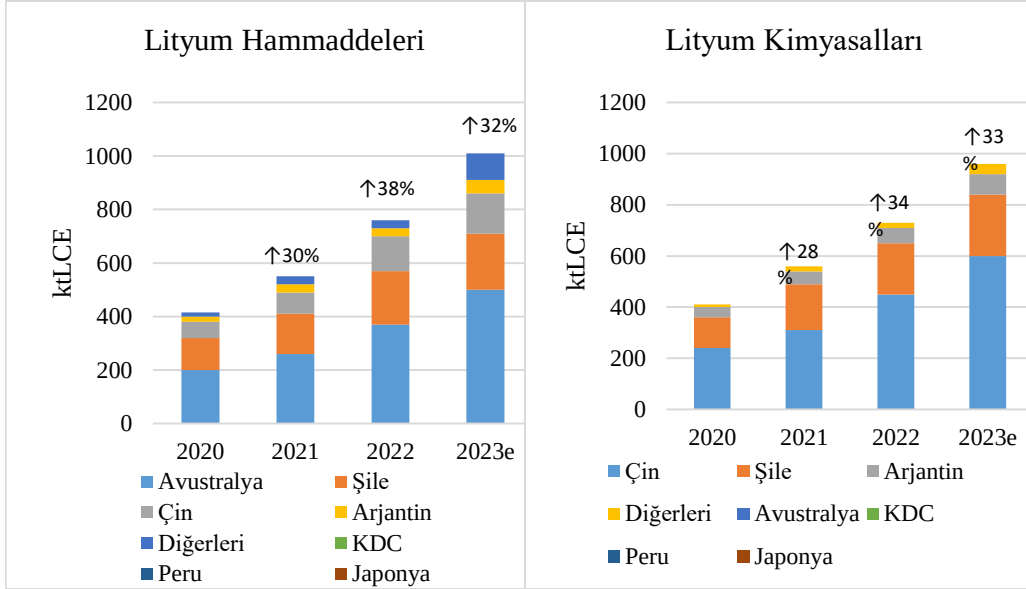
² Bu şekil, yazarları tarafından IEA mteryalinden türetilmiştir ve yazarlar bu türetmeden tek başına sorumlu ve yükümlüdür. Türetme IEA tarafından hiçbir şekilde desteklenmemektedir.

mevcut politika taahhütlerinin sürdürülmesi varsayımına; SDS (Sustainable Development Scenario) ise daha sıkı düzenlemeler ve hızlı iklim eylemleriyle Paris Anlaşması hedeflerine uyumlu bir geçişe dayanmaktadır (IEA, 2023a). Her iki senaryoda da en güçlü talep artışı lityumda öne çıkar; Li-iyon bataryaların ana hammaddesi olan lityumun oksit ve hidroksit türevleri de bu talebi destekler. SDS senaryosunda lityum için toplam talebin, 2020'deki %30 düzeyinden 2040'ta %90'a kadar yükselmesi beklenirken, STEPS'de bu oran %60–70 civarında kalacaktır. Bu hızlı artış, özellikle dışa bağımlı ülkelerin stratejik rezerv oluşturma ve geri dönüşüm altyapılarını güçlendirme ihtiyacını acil bir şekilde ortaya koymaktadır. MTA'nın 2017 raporuna göre, ülkelerdeki tanımlanmış lityum kaynakları yaklaşık 47 milyon ton olarak yenilenmiştir (Akgök ve Şahiner, 2017). Arjantin ve Bolivya'da tanımlanan lityum kaynakları her biri yaklaşık 9 milyon tondur (Akgök ve Şahiner, 2017). Başlıca lityum üreten ülkelerdeki kaynaklar ise şöyledir:

- Avustralya; 2 milyon tondan fazla,
- Şili; 7,5 milyon tondan fazla,
- Çin; yaklaşık 7 milyon ton,
- ABD; yaklaşık 6,9 milyon ton,
- Kanada; lityum kaynakları yaklaşık 2 milyon ton,
- Kongo (Kinşasa), Rusya ve Sırbistan'ın her biri yaklaşık 1 milyon ton,
- Brezilya ve Meksika'daki lityum kaynakları her biri yaklaşık 200,000 ton ve
- Avusturya ve Zimbabve'nin her biri 100,000 tonu aşmaktadır (Akgök ve Şahiner, 2017)

Türkiye'de ekonomik açıdan işletilebilir düzeyde bir lityum yatağı henüz tespit edilmemiştir. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nün 2017 tarihli “Dünya’da ve Türkiye’de Lityum” raporuna göre, Yozgat–Sorgun bölgesindeki pegmatitlerde lepidolit minerali varlığı belirlenmiş olsa da yürütülen jeolojik ve analitik çalışmalar ticari ölçekte çıkarıma uygun somut sonuçlar vermemiştir (İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, 2019). Bu durum, lityumun Türkiye açısından büyük ölçüde ithalata bağımlı kalacağını ve bu nedenle stratejik açıdan kritik mineraller arasında önceliklendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Şekil 3³
Lityum Üretimindeki Değişim



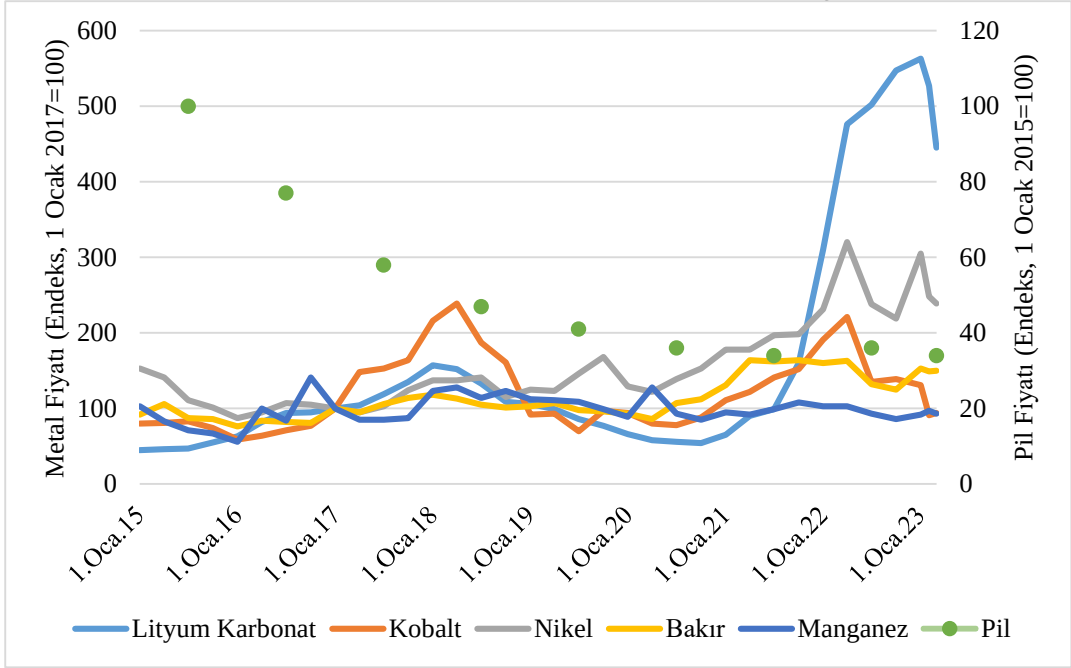
Kaynak: IEA (2023a); *Critical Minerals Market Review 2023*, link, Lisans: CC BY 4,0,

Lityum arzının yıldan yıla güçlü bir şekilde arttığı görülmektedir (Şekil 3). Ancak lityum için kaynak bakımından zengin olan ülkelerin işleme kapasitesi gelişmediği sürece üretim hacminde diğer ülkelerin gerisinde kaldığı da bilinmektedir. Bu sebeple kritik mineraller konusunda hem ulusal, hem de ülkelerin işbirliği içerisinde olduğu bir strateji geliştirmek iklim hedefleri açısından daha gerçekçi olarak kabul edilebilecektir.

İklim hedefleriyle tutarlı bir senaryo için, mevcut madenlerden ve projelerden beklenen arzın, 2030 yılına kadar öngörülen lityum ve kobalt ihtiyacının yalnızca yarısını ve bakır ihtiyacının %80'ini karşılayacağı tahmin edilmektedir (IEA, 2021). 2017'den 2022'ye kadar olan süreçte lityum talebi üç katına çıkarken nikel ve kobalt talebi sırasıyla %40 ve %70 artmıştır. Artan fiyatlara ek olarak bakır, lityum, nikel, kobalt ve grafit gibi madenlerin pazar büyüklüğü iki katına çıkarak 2022'de 320 milyar ABD dolarına ulaşmıştır (IEA, 2023a).

³ Bu şekil, yazarları tarafından IEA mteryalinden türetilmiştir ve yazarlar bu türetmeden tek başına sorumlu ve yükümlüdür. Türetme IEA tarafından hiçbir şekilde desteklenmemektedir.

Şekil 4*
Kritik Metal ve Minerallerdeki Fiyat Değişimi
2015-2023 Yılları Arası Bazı Kritik Mineral ve Pil Fiyatları



Kaynak: IEA (2023); *Critical Minerals Market Review 2023*, link, Lisans: CC BY 4,0,

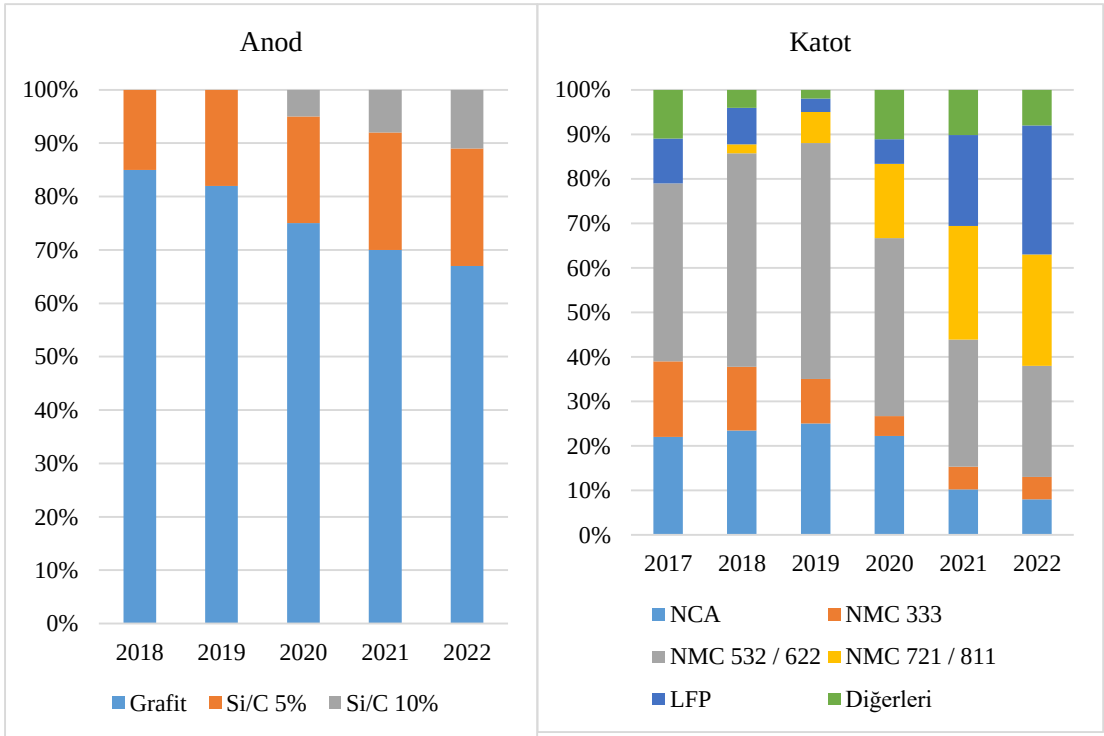
Şekil 4 incelendiğinde pil fiyatının 2020'ye kadar azaldığı, daha sonra aynı kaldığı görülecektir. Ancak aynı durum mineraller için geçerli değildir. Fiyatlarındaki dalgalanmalarının dışında lityum karbonat, nikel ve kobalt fiyatlarının 2022 yılında artmaya başladığı görülmektedir. Eşit oranda nikel, manganer ve kobalt kullanan Nikel Manganer Kobalt (NMC) piller 2015 yılına kadar daha yaygın kullanılmaktayken; kobalt fiyatlarındaki artışlar ve kobalt madenciliğini halkın kabul etmemesi ile, pillerde daha düşük kobalt kullanım oranlarına doğru bir kayma gerçekleşmiştir (IEA, 2023a). 2022 yılında nikel fiyatı artarak 2015-2020 ortalamasının iki katına ve tarihindeki en yüksek fiyatına ulaşmıştır. Bu durum, enerji yoğunluğu daha düşük olsa da, nikelde daha az bağımlı olan (LFP gibi) kimyasalların kullanılmasını teşvik etmiştir. Lityum karbonat fiyatları da son iki yıldır istikrarlı bir şekilde artmaktadır. 2021'deki fiyatlarıyla

* Bu şekil, yazarları tarafından IEA mteryalinden türetilmiştir ve yazarlar bu türetmeden tek başına sorumlu ve yükümlüdür. Türetme IEA tarafından hiçbir şekilde desteklenmemektedir.

karşılaştırmca, güncel fiyatlar dört-beş katına çıkmış ve 2022 boyunca artmaya devam etmiştir. 1 Ocak 2022 ile 1 Ocak 2023 arasında ise neredeyse iki kat fark mevcuttur. 2023'ün başında lityum fiyatları 2015-2020 dönemi ortalamasının altı kat üzerindedir. Nikel ve lityumun aksine, mangan fiyatları nispeten istikrarlı seyretmiştir. Lityum, nikel ve kobalt fiyatlarındaki artışın bir nedeni de 2021 yılında arzın talebe göre yetersiz kalmasıdır (IEA, 2023a). Bu sebeple arz güvenliği fiyat istikrarı için en önde gelen konulardan biridir. 2022 yılında nikel ve kobalt arzı talebin üzerine çıkmış olsa da lityumda bu durum söz konusu olmamış, ve 2021 yılında fiyatının daha güçlü yükselmesine neden olmuştur (IEA, 2023a). Ocak ve Mart 2023 arasında lityum fiyatları %20 düşerek 2022 sonundaki seviyelerine geri dönmüştür (IEA, 2023a).

Şekil 5⁵

Katot ve Anot Kimyasına Göre EV Pilinin Satış Paylarının Gelişimi



Kaynak: IEA (2023); *Critical Minerals Market Review 2023*, Link, Lisans: CC BY 4,0,

⁵ Bu şekil, yazarları tarafından IEA mteryalinden türetilmiştir ve yazarlar bu türetmeden tek başına sorumlu ve yükümlüdür. Türetme IEA tarafından hiçbir şekilde desteklenmemektedir.

Çin'den sonra çoğu şirket Li-iyon piller için yeni katot aktif malzemeler geliştirmeye başlamıştır. Kobalt içeriğini azaltmak amacıyla üretilen Lityum demir fosfat piller 2022'de pazar paylarını oldukça artırmış olsa da NMC içerikli katot malzemeler önemini hala korumaktadır. Anot tarafında da grafit kullanımı azaltılmasına ve silisyum içeren anotların kullanımına yönelik çalışmalar devam etmektedir (Şekil 5).

Li-iyon pillerin kritik minerallere aşırı bağımlı olması gerçeği sebebiyle, geri dönüşüm ve lityum iyon sonrası pil alternatifleri konusu gelecekte en çok gelişmenin yaşandığı konular olacaktır (IEA, 2023a). Son yıllarda hem geri dönüşüm teknolojilerinde, hem de alternatif pil kimyalarında kayda değer ilerlemeler kaydedilmiştir. Avrupa merkezli girişimler Altium ve Tozero, geri dönüştürülmüş katot malzemelerinin yeni malzemelerle karşılaştırılabilir performans göstermesini sağlayarak CO₂ emisyonlarını %70 oranında azaltırken maliyetleri %20 düşürdüklerini raporlamıştır (Carey, 2025). ABD'deki Redwood Materials, lityum, nikel ve kobalt gibi kritik minerallerin %98'ini geri kazanmakta ve 2026'ya kadar yıllık 100 GWh lityum bazlı CAM (Cathode Active Material) üretimi hedeflemektedir (Alistar, 2025). Diğer yandan, ticari ölçüğe taşınan sodyum-iyon piller de dikkat çekmektedir: CATL'nin seri üretilen Naxtra ürünü ve Çin'de devreye alınan şebeke-formasyonlu sodyum-iyon enerji depolama tesisi, sodyumun hem maliyet, hem de hammadde çeşitliliği açısından çekici bir alternatif olduğunu göstermektedir. Bu gelişmeler, yalnızca pil ömrü sonu yönetimini güçlendirmekle kalmayıp aynı zamanda lityum-iyon hakimiyetinin ötesinde sürdürülebilir ve çeşitlendirilmiş bir enerji depolama geleceğine kapı aralamaktadır.

4. Pazar lideri Çin

Çin, günümüzde temiz enerji teknolojileri pazarında lider konumdadır. Güneş enerjisi, rüzgar sistemleri ve piller gibi birçok alanda dünya çapında üretim kapasitesinin en az %60'ını kontrol etmektedir. EA ve pillerin dörtte biri, güneş panelleri ve yakıt hücrelerinin ise tamamına yakını Çin'den ithal edilmektedir (IEA, 2023b). Çin'in uzun vadeli temiz enerji stratejisinin ve kritik madenlerdeki hakimiyetinin sonuçları artık tedarik zincirinde net bir şekilde görülmektedir. Goldman Sachs Araştırması'na göre, Çin şu anda dünya NTE rafinasyonunun %85 - %90'ını ve global NTE miktatıs üretimini %92'sini gerçekleştirmektedir (Cohen, 2023). Benzer şekilde, EA pilleri için gerekli olan kobaltın %68'ini, nikelin %65'ini ve lityumun %60'ını rafine etmektedir (Cohen, 2023). Ayrıca pil bileşenlerinin %65'inin, pil hücrelerinin %71'inin ve dünya elektrikli araçlarının %57'sinin Çin'de üretildiği tahmin edilmektedir. Ne ABD ne de başka

bir ülke şu anda bu alanlarda Çin'i geride bırakabilecek bir konumda değildir (Cohen, 2023).

Çin, Ağustos 2023'te galyum ve germanyum ihracatına lisans zorunluluğu getirerek stratejik tedarik kontrolünü başlatmış, ardından 20 Ekim 2023'te grafit ihracatına lisans koşulu ekleyerek doğal grafitte %65, sentetik grafitte %75 ve küresel grafitte %90 paya sahip olmanın avantajını pekiştirmiştir (Liu ve Patton, 2023). Ayrıca dünyadaki anotların %90'ından fazlasını üretmektedir (Morenhout, 2023). Bu lisans zorunluluğu, 3 Aralık 2024'te galyum, germanyum ve antimona yönelik tüm ihracatın ABD'ye yasaklanmasına kadar genişletilmiştir (Lv ve Munroe, 2024). Öte yandan Hollanda, 1 Nisan 2025'te yalnızca ileri seviyede yarı iletken üretim ekipmanı ihracatını lisans kapsamına alırken, mineralleri kapsam dışında bırakmıştır. Bu gelişmeler, Çin'in stratejik minerallerdeki küresel hakimiyetini pekiştirirken, tedarik zinciri güvenliğini sağlamak için diğer ülkelerin de benzer önlemler aldığını göstermektedir.

Hem temiz enerjiye geçişte önem arz eden minerallerini, hem de batarya teknolojilerinde kullanılan madenlerin fiyatları dünya çapında ithalat ve ihracat oranlarına göre hesaplandığında, çoğu madenin ihracatçısı konumundaki Çin fiyatlar üzerinde oldukça büyük etkiye sahiptir. Sahip olduğu rezervler açısından lider konumda olmadığı madenlerin bile rafinasyonu ve bataryada kullanıma hazır duruma getirme aşamaları konusunda güçlü bir rakibi yoktur. Dolayısıyla kaynak bakımından zengin ülkeler bile işleme yeteneğine sahip olmadığından bu malzemeleri ithal etmek durumundadır. Örneğin, Türkiye grafit konusunda önemli kaynağa sahip olmasına rağmen, tatmin edici ve istenilen kalitede üretim hacmine sahip olmadığından, grafitin piyasa fiyatları üzerinde herhangi bir hakimiyeti söz konusu değildir. Ayrıca bazı madenlerin borsada işlem görmemesi sebebiyle fiyatı etkileyen faktörler üreticinin inisiyatifinde arz ve talebe dayalı olarak oluşmaktadır. Bu sebeple bu malzemelerin fiyatlarındaki değişiklikler söz konusu olduğunda rekabet edebilecek fiyat avantajı bulunan bir ülke henüz mevcut değildir.

Tablo 1
Çin'in Global Pazardaki Payı (VENDITTI, 2022)

Çin'in Dünyadaki Payı	Çıkarma	İşleme
Bakır	%8	%40
Nikel	%5	%35
Kobalt	%1,5	%65
Nadir Toprak Elementleri	%60	%87
Lityum	%13	%58

Kaynak: <https://elements.visualcapitalist.com/visualizing-chinas-dominance-in-clean-energy-metals/>

Tablo 1’de görüldüğü üzere Çin rezerv konusunda zengin olmayan madenleri bile işleme ve üretme kapasitesinde çoğu mineral için dünya ihtiyacının yarısını ya da yarıdan fazlasını karşılamaktadır.

5. Kritik malzemelere küresel fiyat seviyelerinin değerlendirilmesi

IEA’nın kritik mineraller listesindeki minerallerin mevcut üretim dinamikleri ile fiyat bilgileri ve 2008-2023 yılları arasında bu fiyatların değişimi uluslararası açık erişimli veritabanlarından (fred.stlouisfed; tradingeconomics.com; metalry; USG,CMA&MCS) derlenerek incelenmiştir. Alüminyum, Bakır, Demir ve Nikel bilgileri “fred.stlouisfed” veritabanından; kobalt için “tradingeconomics” ve “metalry” veritabanlarından, Lityum ve manganez için “metalary” veritabanından; grafit ve silisyum için ise “USG,CMA&MCS” veritabanlarından yıllara göre fiyat bilgileri derlenmiş ve Tablo 2’de sunulmuştur.

Alüminyum üretiminde pazar payının yaklaşık %58’i Çin’e ait olup, bunu Hindistan (%6), Rusya (%5), Kanada (%4) ve Birleşik Arap Emirlikleri (%4) takip etmektedir (US Department of Energy, 2023). Dünya alüminyum talebi pandemi etkisine rağmen son 10 yılda ortalama %3,4 büyümüştür (TALSAD, 2022). 2022 yılı birincil alüminyum üretimi 2021 yılına göre %2,04 artış ile 68,5 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (TALSAD, 2022). Alüminyum rafinasyon ve dönüşüm üretiminin %60’tan fazlası Rusya ve Çin’den geldiğinden, pandemide Çin’in karantinaları ve Rusya-Ukrayna savaşı fiyatlar üzerinde etkili olmuştur. Tablo 2’de görüleceği üzere 2021 ve 2022 de alüminyum en yüksek fiyattadır. Pandemi sonrası tedarik zincirindeki aksaklıklar ve Rusya ile Ukrayna savaşının arz kısıtı yaratması bu artışa sebep olmuştur. Alüminyum üretimi için kullanılabilen dünya çapındaki

boksit miktarının 55 ila 75 milyar ton civarında olduğu tahmin edilmektedir; 30 milyonu da işletilebilir durumdadır (US Department of Energy, 2023).

Bakır, diğer minerallerden farklı olarak üretici ülkelerin çeşitliliği nedeniyle tedarik konusunda düşük riske sahiptir. Cevher tenörünün (cevher içindeki metal yüzdesi) üretim çıktısını azaltacak şekilde düşmesi ve inşaat sektöründen gelen talep rekabeti ile ilgili bazı endişeler sebebiyle kritik materyal içinde değerlendirilmektedir (US Department of Energy, 2023). Öte yandan, bakır talebindeki büyümeye rağmen rezervlerinin yakın zamanda tükenmesi pek mümkün görünmemektedir. 2022 yılında rafine üretimin tüketimi karşılayabilmesiyle (sırasıyla 25,3 ve 25,1 milyon mt) arz - talep dengesi sağlanmıştır (Nornickel, 2021). Arz - talepteki denge sebebiyle 2021 yılına kadar bakır fiyatlarında ciddi bir artış söz konusu olmamıştır. 2017-2021 yılları arasında ise bakır fiyatı dengesini bulmuşken, pandemi sebebiyle 2021 yılında fiyatlarda ciddi artış yaşanmıştır. Tedarik zincirlerinin tekrar eski haline gelmesiyle fiyat yeniden düşüşe geçmiştir. Rezerv konusunda bolluk görülse de, küresel olarak elektrifikasyon dönüşümünde büyük önem taşıyan bakır için, artan talebin aynı hızla karşılanamayacağı endişesi gündeme gelmektedir. Bu sebeple çoğu çalışmada ileride bakır arzında kıtlık olabileceğini öne sürülmekte ve önümüzdeki yıllarda bakır fiyatlarının tekrar artışa geçmesi beklenmektedir (Mills, 2023). Rafinasyon konusunda Çin yaklaşık %39 küresel pazar payı ile lider ülke iken, onu %8 ile Şili ve %6 ile Japonya ve Demokratik Kongo Cumhuriyeti (DKC) takip etmektedir (US Department of Energy, 2023). Dünyanın en büyük bakır üreticisi Şili'dir, DKC, Peru ve Çin diğer üreticilerdir. Şili 5,2 milyon ton metal bakır üretimi ile dünya bakır üretiminde birinci sırada iken bunu 2,2 milyon ton ile Peru, 1,9 milyon ton ile Çin takip etmektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Bakır üretiminde yaşanan sorunlar nedeniyle, (su kirliliği ve yerel toplulukların tepkileri) Şili ve Peru için gelecekte bakır arzındaki rollerinin değişebileceği düşünülmektedir (US Department of Energy, 2023).

Tablo 2

Depolama Teknolojilerinde kullanılan Kritik Malzemelerin Küresel Fiyatlarının
Yıllara Göre Değişimi (2008-2023)

Malzeme Türleri Fiyatları (Metrik Ton Başına \$)				
Yıllar	Alüminyum	Bakır	Demir	Nikel
2008	2577,9	6963,5	61,5	21141,4
2009	1668,4	5164,6	79,9	14666,7
2010	2172,9	7538,4	146,7	21809,9
2011	2400,6	8823,5	167,7	22909,1
2012	2022,7	7958,9	128,5	17541,7
2013	1846,6	7331,4	135,3	15029,9
2014	1867,4	6863,3	97,3	16893,3
2015	1664,6	5510,4	56,1	11862,6
2016	1604,1	4867,8	58,5	9595,1
2017	1967,6	6169,9	71,1	10409,6
2018	2108,4	6529,7	70,1	13114,0
2019	1794,4	6010,1	93,6	13913,9
2020	1704,0	6174,5	108,0	13790,4
2021	2472,9	9317,4	158,1	18467,0
2022	2706,9	8828,9	120,7	25867,2
2023	2256,1	8490,7	120,3	21528,6

Tablo 2 (devamı)

Malzeme Türleri Fiyatları (Metrik Ton Başına \$)					
Yıllar	Kobalt	Lityum	Manganez	Grafit	Silisyum
2008	93242	4440	4580	b,y	
2009	80420	4530	2390	b,y	
2010	46980	4350	2760	b,y	
2011	38329	3870	3480	b,y	
2012	31234	4220	2950	1600	
2013	24423	4390	2330	1500	
2014	27102	5050	2290	1400	
2015	33864	6500	2140	1800	
2016	23861	7475	1660	2100	100
2017	37347	9100	1850	1400	130
2018	80490	16500	2060	1600	150
2019	32250	b,y	b,y	1340	105,7
2020	32200	b,y	b,y	1340	96,8
2021	70500	b,y	b,y	1330	220,3
2022	52000	b,y	b,y	1200	361,8
2023	30000	b,y	b,y	b,y	b,y

Demir ise depolama alanında kullanılan bir diğer kritik materyaldir. Li- iyon pillerin varyantlarında bulunan nikel, manganez ve kobalt yerine demir ve fosfor kullanan LFP katot içeren piller açısından demir kritik bir malzemedir. Enerji yoğunluğu daha düşük olsa da pazar payında artış söz konusudur. Tedarik zinciri yukarıda sayılan minerallere oranla daha az arz güvenliği riski taşıdığından gelecekte daha da önem kazanması beklenmektedir. En fazla demir cevheri üreten ülkeler Avustralya, Brezilya, Çin, Hindistan ve Rusya'dır. Bu ülkeler, dünya demir üretiminin %70'inden fazlasını gerçekleştirmektedir (Tuncel vd., 2017). Son on yılda Çin'in küresel demir cevheri tüketimindeki payı iki katına çıktığından, Çin dünya demir cevheri üretiminin neredeyse yarısını tek başına tüketmeye başlamıştır (Dinlen, 2022). Demir cevheri, dünya ticaretinde öne çıkan bir hammaddedir. Çin ekonomisinin gidişatı ve diğer metal fiyatlarındaki değişimler demir fiyatlarını etkilemektedir (bkz, Tablo 2 Sütun 3). Covid-19 salgını, demir cevheri üretimini ve tedarik zincirini Çin'de yaşanan karantinalar sebebiyle etkilemiştir. Bu yüzden demir fiyatlarındaki en dramatik artış pandemiden sonra, 2021 yılında görülmüştür.

Demir cevheri ihracatında Avustralya ve Brezilya başı çekmektedir. Bu iki ülke, dünya demir cevheri pazarının yaklaşık %73'ünü kontrol etmektedir (Dinlen, 2022).

Elektrikli araçlarda kullanılan bir diğer kritik mineral olan nikelin toplam küresel üretimi 2022 yılında 3,3 milyon ton olmuştur. Lider nikel üreticisi olan Endonezya 2022 yılında 1,6 milyon ton üretim ile dünyadaki toplam üretimin %49'unu üstlenmiştir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Üretimin %10'u Filipinler'e aitken, %7'sini de Rusya gerçekleştirmiştir. Çin ise 0,11 milyon ton ile %3'lük paya sahiptir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Tablo 2'de görüleceği üzere 2019 yılındaki ortalama nikel fiyatı 14,000 ABD\$/ton civarında iken, pandemiden sonra 2022 yılında fiyatı artarak 25,000 ABD\$/ton seviyesinin çıkmıştır. Pandemide yaşanan tedarik zincirindeki aksaklıklar bu duruma sebep olmuştur (HKEX, 2024).

Kritik minerallerden bir diğeri Kobalt'ın ise, yaklaşık %70'i DKC'de üretilmektedir. Endonezya ve Rusya ise üretimde yaklaşık %5'lik paya sahiptir. DKC ve Avustralya, global kobalt rezervlerinin %65'inden fazlasına sahiptirler. Global üretimin %60'ı DKC'de yoğunlaşmaktadır (US Department of Energy, 2023). Kobalt en pahalı mineraldir ve Li-iyon pillerde kullanımı özellikle üretim maliyetlerini artırmaktadır. Trading Economics'e göre metrik ton başına kobalt fiyatları 2019-2022 yılları arasında yaklaşık 32,000 dolardan 52,000\$'a çıkmıştır. Ayrıca 2022 Mart ayında 82,000\$'a kadar yükselmiştir (Trading Economics, 2024). Bu durum fiyatların yıl içinde bile oldukça fazla dalgalandığını göstermektedir. 2022 yılında kobalt arzında %20'lik bir artış yaşanmış, dolayısıyla arzda yaşanan fazlalık 2023 yılında fiyatların düşmesine neden olmuştur (Okyay, 2023). Çin ise 2022'de rafine kobalt üretiminin %75'inden fazlasını üstlenmiştir (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2024). Kobalt fiyatında 2008'den bu yana en yüksek fiyatların görüldüğü yıllar 2018 ve 2021 yılları olmuştur (Tablo 2). DKC'deki siyasi ve sosyal karışıklıklar ve Çin'in daimi artan kobalt talebi, fiyatların bu denli artmasında rol oynamıştır. Çin kobalt tüketiminin ortalama %80'den fazlasını pillerde kullandığı için, 2018'de hem arzın azalması hem de talebin artması aynı anda fiyatın uzun yıllar sonra en yüksek seviyeye çıkmasına sebep olmuştur (USGS, 2024). 2021 yılındaki fiyat artışı ise pandemi sebebiyle tedarik zincirindeki aksaklıklardan kaynaklanmıştır. Gelecekte NMC kimyasalları talebi arttıkça, arz bu talebi karşılayamazsa, fiyatta yeni zirveler görülmesi beklenmektedir.

Depolama teknolojilerinin üretiminde kullanılan bir diğer kritik mineral olan lityumdan, lityum karbonat ve lityum hidroksit eldesi için rafinasyon büyük ölçüde Çin (%60) ve Şili'de (%26) yoğunlaşmıştır (US Department of Energy, 2023). Global lityum üretimi, 2010'a göre dört kat artarak 2021'de ilk kez 100,000 tonu aşmıştır (Emerging Technologies, 2023). Avusturalya tek başına dünyadaki lityumun %52'sini üretmektedir (Bhutada, 2022). Üçüncü büyük üretici olan Çin, lityum tedarik zincirinde güçlü bir yere sahiptir (Akgök ve Şahiner, 2017).

USGS'nin en son yayınlarından 2024 tarihli "Mineral Commodity Summaries" de yıllık ortalama batarya kalite lityum karbonat Amerika fiyatları 2019 yılında 12,100, 2020 yılında 8,600, 2021 yılında 12,600, 2022 yılında 68,100 ve 2023 yılında 46,000 ABD dolar/ton olarak verilmiştir (USGS, 2024). Lityum Karbonat fiyatının 2022'de ulaştığı seviye genişleyen arz açığından kaynaklanmaktadır. Aynı durum lityum hidroksit için de görülmüştür. 2023 yılında yaşanan fiyat düşüşünün sebebi ise 2023 tahminlerine göre daha az EA satışı gerçekleşmesi ve lityum kimyasallarında arz fazlalığı oluşmasıdır. Kısa vadede düşüşün devam etmesi beklenmektedir (USGS, 2024). Tablo 2'de görüldüğü üzere 2011 yılından beri düzenli olarak fiyatı artan lityumun 2016 yılındaki fiyatı 2018'de iki katından daha fazla artmıştır. Bu artışın nedeni, Avustralya'da spodümen kaynaklarının devreye sokulması ve üretim kapasitesindeki artışlarla lityum arzının yeterli olacağının düşünülmesi, buna karşılık talebin çok daha hızlı yükselmesidir. 2016'da 1 aktif maden varken, 2018'in sonunda bu sayı 9'a ulaşmış; buna rağmen arz talebe yetişemeyince fiyatlar da sürdürülemez bir artış yaşanmıştır (Benchmark, 2024).

Manganez ise, mevcut durumda depolama teknolojileri ve pil üretiminde talebi çok yüksek olmasa da, nikel ve kobalt fiyatlarından dolayı (NMC) pillerde bu iki yüksek fiyatlı kritik mineral yerine kullanılma potansiyeli olan kritik minerallerden birisi olduğundan, ileride talep artışı beklenen minerallerdendir. Arz riski en az olan kritik mineral manganezdir. Bu sebeple Tablo 2'de de görüleceği üzere global fiyatlarında dramatik bir değişim yaşanmamıştır. 2022 yılında manganez üretiminin büyük bir kısmı Güney Afrika, Gabon ve Çin'de gerçekleşmiştir (World Population Review, 2025). Manganez üreticileri çeşitlidir; Güney Afrika pazar payının %36'sını oluştururken; onu Gabon (%23), Avustralya (%17), Çin (%5), Gana (%5) ve Hindistan (%2) takip etmektedir (OEC, 2024). Çin, batarya üretiminde kullanabilecek kalitede manganez sülfatın %97'sini üretmektedir (Cefai, 2023).

Kritik minerallerden bir diğer olan grafitte toplam dünya üretiminin tahmini %77'sini 2023 yılında Çin üreterek dünyanın en büyük grafit üreticisi olmuştur (USGS, 2024). Grafit borsada işlem görmediği için ithalat fiyatlarından yola çıkarak bir fiyat tablosu oluşturulmuştur (Archer, 2022). En büyük üretici Çin olduğundan uzun süredir fiyatları Çin belirlemektedir. Doğal grafit fiyatlarının düşük olmasının ve keskin değişikliklerin yaşanmamasının sebebi, diğer batarya minerallerine oranla grafit minerali daha az talep görürken arzının fazla olmasıdır (IEA, 2023). 2021 yılında dünyada 1,130,000 ton üretim gerçekleşmiştir (Gençbay ve Dinlen, 2023). Madagaskar, Mozambik ve Brezilya doğal grafit açısından diğer önemli maden ülkeleridir. Japonya, ABD, Hindistan ve Avrupa önemli yapay grafit üreticileridir (Gençbay ve Dinlen, 2023). 2021 üretim verilerine göre ise Çin küresel grafit üretiminin %68'ini, Brezilya %9'unu, Mozambik %8 ve Madagaskar ise %8'ini gerçekleştirmiştir (USGS, 2024).

Kritik minerallerden bir diğeri olan silisyum metali için önde gelen üreticiler, Çin, Brezilya ve Norveç'tir. Çin, 2023 yılında tahmini olarak küresel silisyum malzemesinin %70'inden fazlasını üretmiştir (USGS, 2024). 2023 yılında hem ferrosilisyum, hem de silisyum metali üretiminde Çin birinci sırada iken; ferrosilisyumda Rusya ve Norveç, silisyum metalinde de Brezilya ve Norveç en çok üretim yapan ülkeler olmuştur (USGS, 2024). Mevcut bir tedarik zinciri riski bulunmasa da, Çin metal sınıfı silisyum için dünyadaki üretimin %70'ine sahip olduğundan Çin'in üretim kapasitesindeki herhangi bir aksaklık, küresel tedarikte büyük sıkıntılar yaratabilme potansiyeline sahiptir.

Pandeminin doğrudan fiyatlar üzerinde etkisinin en çok gözlemlendiği metal, silisyum olmuştur (bkz, Tablo 2). Covid-19 sırasında artan cihaz ve donanım kullanımı nedeniyle çip üretiminde yarı iletken olarak kullanılan silisyuma olan talep hızla artmıştır. Üretim kapasitesi aynı kaldığından, talebe hızlı yanıt verilememiştir. 2020 sonrasında artmaya başlayan fiyatlar, arz kıtlığı giderildiği için 2023'te düşmeye başlamıştır (US Department of Energy, 2023). Yalnızca silisyum arzında değil, silisyum ürünleri ve rafineri konusunda da Çin'in tek hakim ülke olması, silisyumun kritik malzemeler listesinde yer almasına sebep olmuştur. 2021 yılında küresel kuvarsit (saf silisyum dioksit-SiO₂) kristallerinde pazar büyüklüğü 3,555,17 milyon ABD doları iken, bu payın 2027 yılında 4,125,94 milyon ABD dolarına kadar ulaşması beklenmektedir (Arıkan, 2023). 2021 yılında dünyanın en büyük ithalatçıları sırasıyla Çin (dünya ithalatının %21'i , 212 milyon \$), ABD (%11,9, 119 milyon \$), Japonya (%8,97, 89 milyon \$), Norveç (%7,12, 71 milyon \$) ve İtalya' (%5,88, 58 milyon \$) olmuştur (Arıkan, 2023). İhracatçıları ise sırasıyla Çin (dünya ihracatının %26'sı, 234 milyon \$), Hindistan (%11,1, 97 milyon \$), Brezilya (%10,6, 92 milyon \$), ABD (%9,24, 80 milyon \$), Türkiye (%8,9, 77 milyon \$) ve Norveç'tir (%7,14, 62 milyon \$) (Arıkan, 2023).

6. Batarya malzeme fiyatlarını etkileyen unsurlar

Batarya piyasası için kritik minerallerin bulunabilirliği ve tedarikinin yanısıra işleme kolaylığı da maliyeti oluşturan etkenlerdendir. Bir madeni çıkarmak ve saflaştırmak gibi süreçlerde en verimli yöntemleri tercih etmek, batarya teknolojisinin fiyatlarını etkilemektedir. Örneğin nikel sülfat bataryadaki katot malzemelerinden biri iken, bulunabilirlik ve işlenebilirlik açısından erişilebilir olmadığından, yüksek saflıkta nikelden elde edilmektedir (Van Bomme ve Dahn, 2009). Nikel ve kobalt pahalı katot malzemeleri olurken, kaynak ve üretim hacmi bakımından yeterli ve işlenebilir olduklarından manganez ve demir daha uygun fiyatlıdır. Nikel ve kobaltın yerine kullanılabilecek alternatifler geliştirilmediği takdirde 2040-2050 yılları arasında batarya fiyatlarının bu iki malzeme ve kimyasalları tarafından domine edilerek %60 daha pahalı olması beklenmektedir

(Vaalma vd., 2018). Li-iyon bataryaların genel maliyetinin %20'sinden fazlasını lityum, nikel, manganez ve kobalttan oluşan katot kısmı oluşturmaktadır. Bu malzemelerin doğada bulundukları konsantrasyon (yoğunluk) azaltıldığında batarya için gerekli malzeme maliyetleri düşebilmektedir, fakat yüksek konsantrasyonda olan hammaddelerin yer altından çıkarılması, işlenmesi ve kullanılabilir hale getirilmesi daha maliyetli olduğundan, bu minerallerin piyasa fiyatları konsantrasyonları ile ters orantılıdır.

Lityum ise, kendisinden üretilen kimyasallar da dahil, depolama teknolojilerinin üretiminde kullanılan ana hammaddelerden biri olduğundan, arz kıtlığı sorunu görülen kritik minerallerden bir tanesidir. Tablo 2'den de görüleceği gibi 2008 yılından itibaren sürekli fiyatları artmıştır ve en pahalı pil malzemesidir. Lityum karbonat ve lityum hidroksit dışında bazı lityum tuzları da bataryada kullanılabilir. Dolayısıyla fazla miktarda lityum ve kimyasal malzeme kullanma ihtiyacı doğmaktadır. Bu durum madencilik faaliyetlerinin yanısıra işleme süreçlerinin de önem kazanmasına yol açmıştır. Hammadde tedarikçisi ve batarya üreticisi arasında kalan bu sektör iki taraftaki fiyat dalgalanmalarından da etkilenmektedir. Bu alanda az oyuncu olması ve bu alanın yeni girecek oyuncular için rekabet avantajı taşımaması sebebiyle fiyatlandırmalar hammadde tedariği ve batarya piyasasındaki fiyat dalgalanmalarını idare etmek amacıyla riskten kaçınılarak oluşmaktadır (IEA, 2023).

Bu bağlamda batarya maliyetinin azaltılabilmesi ve fiyatların daha rekabetçi olması için öncelikle minerallerin bolca bulunması ve ekonomik olarak işlenebilir olması gerekmektedir. Daha sonrasında daha az hücre üretimi ile daha yüksek yoğunluklu enerji sağlayacak kimyasalların keşfi gerekmektedir. Kısaca batarya fiyatları, kritik malzemelerin uygun fiyatla temin edilerek yüksek performans sağlayacak şekilde kullanılması ve kullanım yerlerinde ikame malzemelerin keşfedilmesi halinde ucuzlayacaktır (Turcheniuk vd., 2021).

Li-iyon sonrasındaki piller için yapılan araştırmalar, sodyum iyon pillerin bu duruma örnek olabileceğini göstermektedir. Hücre üretiminde değişiklik olmaksızın, lityum yerine sodyum kullanılan bataryaların malzeme maliyetlerinin %1,5-3'e kadar azaltılabileceği tahmin edilmektedir (Vaalma vd., 2018). Tablo 3'de görüleceği üzere, batarya maliyetini artıran ve en yüksek fiyatlara sahip olan malzemeler kobalt, nikel ve lityum olmuştur. Nikel ve kobaltın rezervleri fazla olsa da, düşük konsantrasyonda bulunmaları sebebiyle daha fazla malzeme işlenmesi gerektiğinden, kullanılan teknolojiler sebebiyle ek maliyet yaratmaktadır (Vaalma vd., 2018).

Tablo 3

Li-iyon Bataryadaki Kritik Malzemelerin Güncel Fiyatları (MAPEG, 2024)

Maden	Tür	Fiyat
Alüminyum	LMB %99,7	2113\$
Bakır	LMB	8366\$
Demir	İnce cevher, %58Fe yüksek kalite Çin limanları, İnce cevher, %62 Fe Çin limanları, Pelet cevheri, %65 Fe Çin limanları,	100,34-107,2\$ 114,18\$ 139,02\$
Fosfat	DAP (Diammonium fosfat) FOB ABD Limanları %70 BPL Fas Kazablanka,	625\$ 300\$
Kobalt	Metal, serbest piyasa Kobalt Sülfat, serbest piyasa, ton	51015\$ 8863\$
Manganez	Serbest piyasa, elektrolitik %99,7 Metalurjik %32Mn index, dmtu metal içeriği Metalurjik %38Mn index, dmtu metal içeriği Metalurjik %44-45Mn index, dmtu metal içeriği	2275\$ 4,64-4,72\$ 5,70\$ 6,2-6,49\$
Nikel	LMB Nikel cevheri %1,8, CIF Çin %15-20 Fe, Su içeriği: %30-35 Si:Mg oranı <2 Laterite %1,5 Ni içeriği CIF Çin Nikel sülfat, Batarya kalitesi	30400 \$ 103-105\$ 70-73\$ 5369-5456\$
Lityum Mineralleri	Lityum karbonat, %99,5 LiC2O3 batarya için Lityum hidroksit 56,5% LiOH Avrupa, Spodümen kons, min %6 LiO2 CIF Çin Metal Lityum, min, %99 Li,	72773\$ 74225\$ 5400-5600\$ 424,454\$
Nadir Toprak Elementleri	Seryum Oksit, %99, FOB Çin, Lantanyum Oksit, %99,9, FOB Çin, Neodiyum Oksit, %99,5, FOB Çin, Samarium Oksit %99,9, FOB Çin, Lantanyum/Seryum metal batarya için	965\$ 987\$ 113,187\$ 2,177\$ 3,990\$

Kaynak: <https://www.mapeg.gov.tr/Sayfa/Madenistatistik> Temel Maden Fiyatları,

7. Türkiye'nin mevcut durumu

Türkiye, temiz enerji teknolojilerindeki küresel rekabette geri kalmamak amacıyla Yeşil Mutabakat Eylem Planı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) 2019–2023 Stratejik Planı, İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı 2024–2030 ile Türkiye Ulusal Enerji ve İklim Planı (NEKP) gibi kapsamlı politika belgelerini yürürlüğe koymuştur. Buna rağmen, kritik minerallerin (lityum, kobalt, grafit, vb.) tedarik zinciri güvenliğini sağlamaya yönelik somut strateji dokümanları hâlen eksiktir; bu durum, Türkiye'yi üretim, ithalat ve ihracat dinamiklerinde uluslararası rakiplerinin gerisinde bırakmaktadır.

MTA'nın 2023 verilerine göre, Türkiye'nin madencilik sektörü maden üretim ihtiyacının yalnızca %65,5'ini karşılamış, geri kalan %34,5'i için 2,773 milyar USD tutarında dış alım yapmak zorunda kalmıştır; başlıca ithalat partnerleri Rusya, Kolombiya ve Avustralya; ihracat partnerleri ise Çin, ABD ve Bulgaristan'dır (<https://www.mta.gov.tr/v3,0/bilgi-merkezi/maden-dis-ticaret>).

ETKB bünyesinde 28 Aralık 2019'da kurulan Nadir Toprak Elementleri Araştırma Enstitüsü (NATEN), lantanit ve ağır NTE'lerin yanı sıra lityum, kobalt ve grafit gibi kritik mineraller için jeokimyasal ve metalürjik laboratuvar çalışmaları yürütmektedir (<https://www.enerji.gov.tr/birimler/naten>). Henüz ticari ölçüğe geçilememiş olsa da bu girişim, ulusal potansiyelin belirlenmesi açısından önemli bir ilk adımdır.

Ayrıca, TENMAK'ın son yıllarda bu konudaki çalışmaları konuya verilen önemin arttığını göstermektedir. NATEN birimi tarafından düzenlenen “Batarya Hammaddeleri ve Geri Dönüşüm Çalıştayı”nda, jeotermal sınırlardan lityum ekstraksiyon pilot yöntemleri ele alınmıştır. Ayrıca Mayıs 2025'te gerçekleştirilen “Türkiye Enerji Depolama Teknolojileri Stratejisi ve Eylem Planı Çalıştayı”nda, jeotermal brin örneklerinden lityum ekstraksiyonu için pilot saha projelerinin başlatılması, yerli rafineri altyapılarının fizibilite etütlerinin yürütülmesi ve kritik mineral rezervlerinin haritalanmasına yönelik jeolojik araştırma programlarının önceliklendirilmesi gibi tedarik zinciri güvenliği ve yerli üretim kapasitelerini artırmaya yönelik somut girişimler tartışılmıştır.

TOGG'un 2033 hedefi olan yıllık 100,000 araç üretimi ve Aspilsan'ın yıllık 21 milyon adet lityum-iyon hücre üretim kapasitesi duyurması gibi ulusal hedefler Türkiye'nin kritik mineral talebinin katbekat artacağını göstermektedir. USGS'in 2023 tarihli *Mineral Commodity Summaries* raporuna göre Türkiye için ne lityum ne de kobalt cevheri veya rafine üretimi bildirilmiştir; bu da sıfır yerli üretim ve %100 dışa bağımlılık anlamına gelir (USGS, 2024). Ayrıca MTA verileri, 2022–2023 dönemi için lityum-iyon pillerde kullanılan ara ürünler hariç, ülkenin ihtiyacını tamamen ithalatla karşılamak zorunda olduğunu göstermektedir (MTA, 2024). Dolayısıyla elektrikli araç pilleri için kritik öneme sahip lityum ve kobalt

minerallerinde Türkiye hâlihazırda neredeyse tamamen ithalata bağımlıdır. Mevcut politika belgelerinde artması beklenen talebin stratejik olarak nasıl karşılanacağına dair ayrıntılı bir yol haritası bulunmamaktadır.

Sonuç olarak, Türkiye'nin mevcut strateji belgelerini kritik mineraller bağlamında güncellemesi, NATEN ve TENMAK gibi kurumlar aracılığıyla saha verilerine dayalı rezerv belirleme ve işleme kapasitesini hızla artıracak projeler geliştirmesi; ayrıca tedarik çeşitlendirmesi ve döngüsel ekonomi uygulamalarını hızlandırması, dış ticaret açığını azaltmak ve sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşmak için zorunludur.

Türkiye, küresel çaptaki “temiz enerji” yarışından geri kalmamak adına adımlar atmaya başlamıştır. Yenilenebilir enerji alanında koyduğu hedefleri dışında sınırdaki karbon düzenlemeleri ve nükleer enerji konularında stratejik planlara (Yeşil Mutabakat Eylem Planı, ETKB 2019-2023 Stratejik Planı, İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı 2024-2030, Türkiye Ulusal Enerji ve İklim Planı vb.) sahiptir. Enerjide dışa bağımlılığı azaltmaya ve böylece dış ticaret açığını kapatarak ekonomik kalkınmayı hedefleyen Türkiye kritik mineraller açısından ise son dönemlerde bazı politika ve strateji belgeleri oluşturmasına rağmen, özellikle dış ticaret ve üretim konularında diğer ülkelerin gerisinde gözükmektedir. Çoğu ülke kendi kritik mineral listesini yayınlamışken, tedarik zincirinin güvenle sağlanabilmesi açısından Türkiye'nin de bu minerallerin üretimi, ihracatı ve ithalatı konularında strateji geliştirmesi önem arz etmektedir.

MTA'nın yayınladığı 2022 Yılı Maden Dış Ticaret Raporuna göre Türkiye'nin maden konusundaki başlıca dış ticaret ortakları Çin, ABD ve Bulgaristan olurken, ithalat konusunda Rusya, Kolombiya ve Avustralya ile işbirliği yapılmaktadır (Tablo 4) (MTA, 2024).

Tablo 4
Maden Dış Ticaretinde Faaliyet Gösteren Ülkeler

Maden İhracatında Öne Çıkan Ülkeler	Maden İthalatında Öne Çıkan Ülkeler
• Çin • ABD • Bulgaristan • İspanya • İtalya • Belçika • Hindistan • Almanya • İsrail • Romanya	• Rusya Federasyonu • Kolombiya • Avustralya • ABD • Brezilya • Hindistan • Güney Afrika Cumhuriyeti • İsveç • Çin • Kanada

2019-2023 Stratejik Planında EA'ların pillerinde kullanılan kobalt ve lityum minerallerinin üretiminin sınırlı olması nedeniyle bu minerallerin fiyatlarında yaşanacak artışlar risk olarak değerlendirilmiştir. Bu riskin etkisini azaltmak için belirlenen stratejiler arasında ise lityum ve kobalta yönelik ülke potansiyelinin belirlenmesi yer almıştır (ETKB, 2019). TOGG markası ile EA sektörüne hızlı bir giriş yapmayı hedefleyen Türkiye, 10 yılda 1 milyon araç üretmeyi ve Çinli şirket Farasis ile yerli batarya üretimine de başlamayı hedeflemektedir. Yerli pil üretiminde diğer bir adım ise yukarıda değinildiği gibi, Aspilsan'ın yılda 21 milyon adet Li-iyon hücre üretmeyi hedeflediği fabrikanın kurulmasıdır.

Türkiye maden rezervleri açısından zengin olsa da, işleyebilme ve üretim kapasitesi istenilen seviyede değildir. Tablo 5'te görüldüğü üzere madencilik alanında dış ticaret açığı oldukça yüksek oranlara erişmektedir. Bu açığı kapatmak ve arzu edilen ekonomik gelişmeyi sağlamak için üretim gerekmektedir. Hammadde ihtiyacında dışa bağımlılığı azaltabilmesi de üretime bağlıdır. EA ve batarya teknolojisi alanında öne çıkmak isteyen Türkiye bu konuda somut strateji ve politikalarından yoksundur. Özellikle kritik mineraller konusunda kapsamlı bir çalışma henüz yoktur.

Tablo 5
Türkiye'nin Madencilikte Dış Ticaret Açığı⁶

Türkiye Madencilik Sektörü		
YIL	İhracatın ithalatı Karşılama Oranı (%)	Dış Ticaret Açığı (Milyar \$)
2008	60,5	-1,9
2009	51,6	-2,2
2010	69,5	-1,5
2011	57,5	-2,6
2012	59,1	-2,8
2013	87,3	-0,7
2014	84,5	-0,8
2015	81,4	-0,9
2016	85,5	-0,6
2017	71,2	-1,8
2018	64,8	-2,4
2019	87,1	-0,7
2020	86,2	-0,6
2021	72,6	-2,1
2022	51,2	-5,7
2023	65,5	-2,8

Kaynak: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-dis-ticaret> linkindeki yıllık verilerle oluşturulmuştur.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) bünyesinde 28 Aralık 2019'da kurulan “Nadir Toprak Elementleri Araştırma Enstitüsü” NATEN, nadir toprak elementlerinin ve diğer kritik minerallerin elde edilebilmesi adına çalışmalar

⁶ Madencilik dış ticaretindeki ürün kategorileri şunlardır: (i) Endüstriyel hammaddeler, (ii) Doğal taşlar, (iii) Metalik madenler, (iv) Enerji hammaddeleri (kömür, linyit ve bitüm)

yürütmeyi hedeflemektedir. Nadir uranyum, toryum, lantanyum, paraseodmiyum, neodimyum, seryum ve ağır nadir toprak oksitler gibi çeşitli nadir toprak elementleri için laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmektedir.

Kritik malzemelerin dış ticaret açığı ve karşılama oranları değerlendirildiğinde çoğu mineral konusunda dış ticaret açığı olduğu gözlemlenmektedir. Dünya fiyatları ile paralel olarak ithalat fiyatlarının pandemiden sonra arttığı görülse de, genel bir eğilimden söz etmek mümkün değildir. Dünya için olduğu gibi, Türkiye için de fiyatlar dalgalıdır. Üretim ve dolayısıyla ihracatta eksik kalan Türkiye rezervler açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Türkiye grafit ve bor gibi bazı spesifik minerallerde rezerv açısından zengin olsa da bunları değerlendirebileceği üretim ve işleme kapasitesine sahip değildir. Bu sebeple kritik mineraller konusunda küresel arzdan ziyade, kendine özgü kriterlerle dünya çapında tedarik riski bulunmayan malzemeler Türkiye için ileride de kritik rol oynayabilecektir.

8. Kritik malzemelere dair politika görünümü ve öneriler

8.1. Türkiye için politika önerileri

Gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye zengin olduğu rezervleri kullanarak sürdürülebilirlik ve iklim hedefleri konusunda uluslararası alanda fırsat yakalayabilecektir. 2015 yılında Paris Anlaşması'nın imzalanmasını takiben 2017 yılında Dünya Bankası tarafından yayımlanan “Düşük Karbonlu Bir Gelecek İçin Minerallerin ve Metallerin Artan Rolü” raporuna göre:

- Kritik malzemeler konusunda sürdürülebilir bir pazar oluşabilmesi için kaynak açısından zengin ülkeler ve madencilik ve temiz enerji alanındaki gruplar arasında ulusal düzeyde sivil toplumu da dahil ederek diyalog geliştirilmelidir.
- Gelişmekte olan ülkeler kritik madenler açısından bulundukları durumu analiz etmeli, veri ve maden haritalaması yapmalıdır, Gelişmekte olan ülkelerin maden konusundaki potansiyelleri ekonomik büyümeleri için şarttır.
- Arz kısıtlamalarına ve talep senaryolarına dikkat ederek üretim teknolojisi seçmek, belirsizlikleri ortadan kaldırmak ve fiyatları önceden tahmin edebilmek adına önemli görülmektedir.
- Bu konuda yalnızca maden alanında değil tüm araştırma gruplarını ve sosyal grupları bir araya getirerek yeni ağlar geliştirilmesi ve farkındalığın artırılması gereklidir (World Bank Group, 2017).

Teknolojik gelişme, özellikle gelişmekte olan uygulama ve teknolojilerin olduğu bu tür sektörlerde, ekonomik büyüme ve sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi için bir ön koşul olarak kabul edilebilecektir. Temiz enerji dönüşümü ve madencilik sektöründe ise büyüme için yeniliklere ihtiyaç vardır. Ar-Ge çalışmaları bu bağlamda desteklenmeli, bu alanda çalışacak nitelikli insan kaynağı için ağlar kurulmalıdır. Çin örneğinde olduğu gibi kaynak bakımından zengin olmayan ülkeler rafinasyon konusunda kendilerini geliştirerek pazarda söz sahibi olabilme potansiyeline sahiptir. Türkiye kaynaklar açısından zengin olsa da rafinasyon ve üretim kapasitesi yetersizdir. Bu alana daha çok yatırım yapılması ve yabancı yatırımcı çekebilmek adına adımlar atılması katma değer yaratabilecektir. Kritik mineraller konusunda farkındalık yaratılmalı, önceliklendirilmiş ulusal bir kritik madenler listesi üzerinde çalışılmalıdır. MTA ve TÜİK gibi kurumların veri konusundaki çalışmalarını iyileştirmesi ve yıllık haritalama çalışmaları yapılması, kaynakları takip etmek ve değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir. Çok yönlü sonuçları olan temiz enerji dönüşümü için paydaşların iş birliği oldukça gereklidir. Gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye, kritik malzemelerde kur hareketlerinin de şiddetlendirdiği fiyat dalgalanmalarından olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle, olumlu sonuçlar yaratacak iktisat politikalarının varlığı, Türkiye'nin mevcut durumu değiştirebilmesi adına çok etkili olacaktır.

9. Sonuç

Çin, AB ve ABD gibi enerji tüketimi oldukça yüksek olan ve yeni enerji teknolojisi ile bağlantılı ürünler üreten büyük ekonomilerin temiz enerjiye hızlı bir geçiş sürecinde olmaları, kritik minerallere olan küresel talebin tırmanmasına yol açmıştır. Minerallerin rezervlerinin, üretiminin ve ihracatının belirli ülkelerde yoğunlaşması bazı minerallere yönelik arz-talep dengesizliğinin ortaya çıkmasına ve minerallerin tedarikinde belirli riskler oluşmasına neden olmaktadır.

Kritik mineraller pazarının arz ve talep ile ilgili değişikliklerden, jeopolitik zorluklardan ve teknolojik gelişmelerden etkilenmeye çok açık olduğu görülmüştür. Dolayısıyla değişken mineral fiyatları maliyetleri etkilemeye devam edecektir. Küresel çaptaki enflasyon ve piyasanın istikrarlı olmaması sebebiyle yenilikler ve batarya maliyetindeki düşümlere rağmen 2022'de yüksek seviyeleri gören mineral fiyatları 2023'te düşüş yaşamıştır. 2023'teki fiyat düşüşlerinin 2024 ve sonrasında da devam edebilmesi teknolojik yeniliklere ve arz - talep istikrarına bağlıdır.

Kritik malzemelerin küresel piyasada fiyat istikrarına kavuşabilmesi için, üretim yapan ülkelerin artması ve daha çok yatırım gerektiği aşıkardır. Piyasada tekelleşme fiyatlar üzerinde olumsuz etkilere sahip olmaktadır. 2020-2021 Pandemi dönemi tedarik zincirindeki aksaklıklar, ticari kısıtlamalar ya da Rusya-Ukrayna savaşı gibi farklı sebeplerden kaynaklanabilecek riskler Asya-Pasifik çevresindeki

ve ABD dışındaki ülkelerin de üretimde söz sahibi olmasıyla aşılabilecektir. Ayrıca 2040'a yönelik arz-talep senaryoları gibi, üretim süreçleri açısından da analize ihtiyaç vardır, Madencilik projelerinin keşiften ilk üretime geçmesinin bazen 16 yıl sürebildiği (IEA,2022) göz önüne alınırsa iklim hedefleri konusunda daha fazla geç kalmamak için ülkelerin harekete geçmesi gerekmektedir.

Madencilik faaliyetlerinin doğası gereği suya ve toprağa vereceği zararlar; dolayısıyla yol açabileceği toplumsal tepkiler de göz önüne alınmalıdır. Bu konuda hem üretici, hem yatırımcıların iklim hedefleriyle tutarlı şekilde hareket etme sorumluluğunu üstlenmesi gerekmektedir. Güvenli, dayanıklı ve sürdürülebilir bir temiz enerji sistemi inşa edebilmek çok katmanlı bir süreçtir ve hem politika yapıcılarının, hem akademisyenlerin hem de şirketlerin dahil olmasıyla ortaklaşa ilerlemesi gereken çalışmalar gerektirir. Bu hususta kritik malzemelerin karbon emisyonunu azaltacak kolaylaştırıcılar mı yoksa yeni bir ikilem mi olacağı, karar vericilerin bu konuda alacağı tavra ve izleyeceği stratejik önceliklere bağlıdır. Tüm boyutlarıyla ele alınan kritik malzemelerin kullanım sonrası geri dönüşüm konusu ise, bu malzemelerin geri dönüşümle tekrar kullanılabilir hale getirilmesinin arz güvenliğine dair risklerden kaçınabilmek adına hayati olduğunu da vurgulamaktadır.

Sonuç olarak orta ve uzun dönemde kritik malzemeler pazarı bir takım belirsizlikler nedeniyle istikrarsız bir yapıya sahip olma ihtimali ile karşı karşıyadır. Bu tür belirsizliklerin piyasada yaratacağı kırılganlıklar doğrudan EA sektörüne yansıyor; gerek üretim gerekse de tüketim tarafında sorunların derinleşmesine yol açarak teknolojinin yayılımını engelleyebilecek ve küresel iklim hedefleri için de engel teşkil edebilecektir. Yeni üretim teknolojilerinin geliştirebilmesi, pil üretimi girdileri için ikame edici malzemelere yönelik yeniliklerin yapılması ve maliyeti azaltmaya yönelik bilimsel çalışmaların desteklenmesi genelde kamu politikalarının, özelde ise bilim, teknoloji ve inovasyon politikalarının acil hedefi olmalıdır. Arzın çeşitlendirilmesi, risk azaltıcı projelere destekler verilmesi, projelerin gerçekleşme sürelerini kısaltmak adına regülasyonlar ve finansman destekleri sağlanması da bu bağlamda düşünülmeli gereken konulardır.

Çıkar Çatışması Beyanı: Yazarlar bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve/veya yayımlanmasıyla ilgili olarak herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan etmemiştir.

Finansman: Yazarlar bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve/veya yayımlanması için herhangi bir finansal destek almamıştır.

Yayın Etiği Beyanı: Yazarlar çalışmanın etik olmayan bir sorun içermediğini ve araştırma ve yayın etiğinin dikkatlice gözetildiğini beyan ederler.

Yazar Katkı Oranları: Birinci yazar %40, ikinci yazar %30, üçüncü yazar %30.

Teşekkür: Yazarlar, çalışmanın geliştirilmesinde sundukları yapıcı görüş ve öneriler için üç isimli hakeme; makalenin yazımı, verinin toplanması ve sunulması aşamalarında yol gösterici tavsiyeleriyle katkı sağlayan Sayın Prof. Dr. Oktar Türel'e ve kritik mineraller konusundaki uzmanlığıyla destek olan Sayın Prof. Dr. Özgül Keleş'e teşekkür ederler.

Kaynaklar

- AKÇİL, A., SUN, Z. ve Panda, S. (2020). COVID-19 Disruptions to Tech-Metals Supply Are A Wake-Up Call. *Nature*. 365. <https://www.nature.com/articles/d41586-020-03190-8>
- AKGÖK, Y. ve ŞAHİNER, M. (2017), *Dünyada ve Türkiye'de Lityum*, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/LİTYUM.pdf>
- ALISTAR, B. (2025), *Redwood Materials diverts its huge battery hoard toward the AI energy boom*, <https://www.businessinsider.com/redwood-materials-battery-energy-storage-ai-2025-6>
- ARCHER, C. (2022), *Graphite stocks: investors are behind, consider investing in 2023*, <https://investingstrategy.co.uk/stock-tips/graphite-stocks-investors-are-behind-consider-investing-in-2023/>
- ARIKAN, F. (2023), *Dünyada ve Türkiye'de Kuvars, Kuvarsit ve Kuvars Kumu*, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/heyelan-haritalari>
- BENCHMARK (2024), *Lithium Price Assessments*, <https://www.benchmarkminerals.com/lithium-prices>
- BHUTADA, G. (2022), *Visualizing 25 Years of Lithium Production, by Country*, <https://www.visualcapitalist.com/visualizing-25-years-of-lithium-production-by-country/>
- CAREY, N. (2025), *European EV battery material startups make recycling breakthroughs*, <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/european-ev-battery-material-startups-make-recycling-breakthroughs-2025-02-13/>
- CEFAI, S. (2023), *Spotlight on sulfate: Volatility expected in manganese sulfate amid supply and processing capacity bottlenecks*, <https://www.fastmarkets.com/insights/volatility-expected-in-manganese-sulfate/>

- COHEN, J. (2023), *Resource realism: The geopolitics of critical mineral supply chains*, Geopolitics, <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/resource-realism-the-geopolitics-of-critical-mineral-supply-chains.html>
- DİNLEN, İ. (2022), *Dünyada ve Türkiye’de Demir*, https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/dunyada_turkiyede_demir_1.pdf
- EMERGING TECHNOLOGIES (2023), *This chart shows which countries produce the most lithium*, <https://www.weforum.org/agenda/2023/01/chart-countries-produce-lithium-world/>
- ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI (2019). *2019-2023 Stratejik Planı*. https://enerji.mmo.org.tr/wp-content/uploads/2020/05/ETKB-2019-2023_Stratejik_Plan%C4%B1.pdf
- ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI (2024), *Bakır*, <https://enerji.gov.tr/bilgimerkezi-tabii-kaynaklar-bakir>
- ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI (2024), *Nikel*, <https://enerji.gov.tr/tabii-kaynaklar-nikel>
- GENÇBAY, B. ve DİNLEN, İ. (2023), *Madencilik sektörüne ait temel ekonomik göstergeler 2022*, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/TEG2022.pdf>
- HKEX (2024), *LME Nickel*, <https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/LME-Nickel#Summary>
- IUPAC (2005), *Compendium of Chemical Terminology*, <https://goldbook.iupac.org/>
- IEA (2021), *Minerals used in electric cars compared to conventional cars*, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/minerals-used-in-electric-cars-compared-to-conventional-cars>
- IEA (2022), *Temiz enerji geçişlerinde kritik minerallerin rolü*. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- IEA (2023), *Global EV Outlook 2023*, Geo, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
- IEA (2023a), *Critical Minerals Market Review 2023*, in *Critical Minerals Market Review 2023*, <https://doi.org/10.1787/9cdf8f39-en>
- IEA (2023b), *Energy Technology Perspectives*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a86b480e-2b03-4e25-bae1-da1395e0b620/EnergyTechnologyPerspectives2023.pdf>
- IEA (2024), *Mineral requirements for clean energy transitions*, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/mineral-requirements-for-clean-energy-transitions>
- IEA (2025), *Energy Act of 2020 (Critical minerals provisions)*, <https://www.iea.org/policies/16065-energy-act-of-2020-critical-minerals-provisions>
- İSTANBUL MADEN İHRACATÇILARI BİRLİĞİ, (2019), *Lityum Yataklarının Durumu, İşletmeciliği ve Geleceği*, <https://doi.org/10.30797/madencilik.1010286>
- LIU, S. ve PATTON, D. (2023), *China, world’s top graphite producer, tightens exports of key battery material*, <https://www.reuters.com/world/china/china-require-export-permits-some-graphite-products-dec-1-2023-10-20/>
- LV, A. ve MUNROE, T. (2024), *China bans export of critical minerals to US as trade tensions escalate*, <https://www.reuters.com/markets/commodities/china-bans-exports-gallium-germanium-antimony-us-2024-12-03/>
- MAGEM (2024), *Maden İstatistikleri*, <https://www.mapeg.gov.tr/Sayfa/Madenistatistik>
- MCKINSEY AND COMPANY (2024), *Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular*, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular>

- MILLS, R. (2023), *Copper shortage getting real, Kitco*, <https://aheadoftheherd.com/copper-shortage-getting-real-richard-mills/>
- MTA (2024), *Madencilik'in GSYH İçindeki Payı*, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-dis-ticaret>
- MORENHOUT, T. (2023), *China's Latest Move in the Critical Mineral and Technology Trade War*, Center of Global Energy Policy at Colombia, <https://www.energypolicy.columbia.edu/chinas-latest-move-in-the-critical-mineral-and-technology-trade-war>
- NORNICKEL (2021), *Navigating the Transition to a Net Zero World*, 69, https://www.nornickel.com/upload/iblock/27f/strategy_day_presentation_2021.pdf
- OECD (2024), *Manganese Ore in TR*, <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/manganese-ore/reporter/tur>
- OKYAY, V. (2023), *2022 Yılı Kobalt Piyasası Değerlendirmesi*, <https://madencilikturkiye.com/2022-kobalt-piyasasi-degerlendirmesi/>
- TALSAD (2022), *Dünyada ve Türkiye'de Alüminyum Sektör Raporu*, 6, http://talsad.org.tr/wp-content/uploads/2023/12/TALSAD_Dunyada_ve_Turkiyede_Aluminyum_Sektor_Raporu_Ozet_2022.pdf
- T.C TİCARET BAKANLIĞI (2024), *Afrika, Kıtının İlk Kobalt Rafinerisine Sahip Olmaya Bir Adım Daha Yaklaştı*, <https://ticaret.gov.tr/blog/sector-haberleri/afrika-kitanin-ilk-kobalt-rafinerisine-sahip-olmaya-bir-adim-daha-yaklasti>
- TENMAK (2025), *TENMAK'ta Türkiye Enerji Depolama Teknolojileri Stratejisi ve Eylem Planı Çalıştayı Gerçekleştirildi*, <https://www.tenmak.gov.tr/haberler-slide/4488-tenmak-ta-turkiye-enerji-depolama-teknolojileri-stratejisi-ve-eylem-plani-calistayi-gerceklestirildi>
- TRADING ECONOMICS (2024), *Kobalt*, <https://tradingeconomics.com/commodity/cobalt>
- TUNCEL, S., ARI, N., YOLERİ, B., ve ŞAHİNİNER, M. (2017), *Dünyada ve Türkiye'de Demir*, https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/dunyada_turkiyede_demir.pdf
- TURCHENIUK, K., BONDAREV, D., AMATUCCI, G. G., ve YUSHIN, G. (2021), *Battery materials for low-cost electric transportation*, *Materials Today*, 42 (February), 57–72, <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.09.027>
- U.S.G.S - GEOLOGICAL SURVEY (2024), *Mineral Commodity Summaries 2024*, <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/mcs2024>
- USA DEP. OF ENERGY (2023), *Critical Materials Assessment* (Issue: July), https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/doe-critical-material-assessment_07312023.pdf
- VAALMA, C., BUCHHOLZ, D., WEIL, M., ve PASSERINI, S. (2018), *A cost and resource analysis of sodium-ion batteries*, *Nature Reviews Materials*, 3, <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2018.13>
- VAN BOMME, A. ve DAHN, J. R. (2009), “Analysis of the growth mechanism of coprecipitated spherical and dense nickel, manganese, and cobalt-containing hydroxides in the presence of aqueous ammonia”, *Chemistry of Materials*, 21(8), 1500–1503, <https://doi.org/10.1021/cm803144d>
- VENDITTI, B. (2022), *Visualizing China's Dominance in Clean Energy Metals*, <https://elements.visualcapitalist.com/visualizing-chinas-dominance-in-clean-energy-metals/>

WORLD BANK GROUP (2017), *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future*, 14, <https://documents1.worldbank.org/curated/en/207371500386458722/pdf/117581-WP-P159838-PUBLIC-ClimateSmartMiningJuly.pdf>

WORLD POPULATION REVIEW (2025). *Manganese production by country 2025*. <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/manganese-production-by-country>

Extended summary

Sustainable transformation in the transportation sector and critical materials: An assessment of the status of critical minerals in electric vehicle batteries

Abstract

Achieving the decarbonization targets set out in Türkiye's Nationally Determined Contribution (NDC) requires the widespread adoption of clean technologies in the transportation sector. While electric vehicles play a central role in this transition, the raw materials and critical minerals used in battery and storage technologies also come to fore in this context. An examination of production and price data reveals that Türkiye's dependent on imports for the supply of these critical materials and this dependence creates vulnerabilities to underlined the necessity of industrial and technological policies for critical minerals. On a global scale, China's dominance over raw materials and the tensions between the U.S. and China further increase the risks in this field. The aim of this study is to assess Türkiye's current situation by conducting an analysis of critical minerals—essential for electric vehicles—based on global prices and production data, and to develop recommendations for steps that can be taken to ensure a sustainable transition in this sector. The analysis results show that strengthening domestic production, R&D, and supply chains is essential for Türkiye to achieve sectoral integration, particularly to enhance the competitiveness of critical minerals and ensure sustainable transformation.

Key words: Storage, critical minerals, global prices, Türkiye, policy recommendations,

Türkiye's Nationally Determined Contribution (NDC) targets require transformation in key sectors such as transportation and energy. These two sectors are among the main contributors to carbon emissions in Türkiye and need the widespread adoption of clean technologies to effectively contribute to climate goals. Particularly in terms of the production and use costs of electric vehicle technologies and the necessary knowledge and skill accumulation, Türkiye is seen as dependent on imports and thus vulnerable regarding raw materials. In this context, developing policies for the raw materials needed in storage technologies is critically important for achieving the sectoral transformations Turkey aims for. Addressing the lack of

policies and integration concerning critical materials used in storage technologies and batteries, which are key components for the widespread use of electric vehicles, is essential, China's dominance over global raw material sources, the indispensable trade partnership between Turkey and the EU, and the U.S.-China trade war are significant for understanding the global landscape, Material-based innovations and technology development further increase geographic vulnerabilities in supply chains, emphasizing the importance of this issue, Analyzing to what extent Türkiye's climate strategies, particularly in developing and producing clean technologies in the transport sector, are integrated with industrial policies for the supply and processing of these raw materials is crucial, Although Türkiye has taken important steps toward clean energy transition in the transportation and energy sectors in recent years, it remains dependent on imports for the raw materials needed for battery technologies and electric vehicles, Thus, it must develop policies to promote the local spread of clean technologies, Climate goals highlight the need to manage foreign policy risks and address supply challenges through locally developed alternatives, This study underlines that for the success of the NDC, it is not enough to set targets alone; technology and innovation policies based on strategic inputs must also be integrated into climate policies, The central argument of the study is that to achieve its climate goals, Türkiye must adopt a forward-looking, strategic, and innovation-focused policy transformation in which energy, transportation, and mining policies converge within a common strategic framework, especially regarding critical raw materials, The spread of electric vehicles is a major factor affecting the market for critical materials such as lithium-ion batteries, Accordingly, the study aims to examine the sectoral status of these critical materials and Türkiye's position in this area, Electric vehicles play a central role in the transition to clean energy and achieving zero carbon emissions, However, due to their high-tech components and battery storage, they are more expensive than conventional vehicles, Battery costs, which account for about 30% of the total cost, are influenced by factors such as high raw material prices, the limited spread of production technologies, and insufficient production capacity, Recommended policies for Türkiye include increasing domestic production capacity, promoting R&D activities, and strengthening raw material supply chains, These measures aim to enhance Türkiye's competitiveness in the electric vehicle industry and contribute to a sustainable energy transition,

The implications extend far beyond Türkiye's borders, As countries around the world grapple with similar challenges in aligning their financial systems with climate goals, Türkiye's experience offers both a cautionary tale and a roadmap for change, The technical solutions for decarbonization are increasingly well understood, but the financial and political challenges of redirecting capital flows remain the critical bottleneck in the race against climate breakdown,