



WORLD BANK GROUP

İklim Eylemi İçin Mineraller: Temiz Enerji Geçişinin Mineral Yoğunluğu

İKLİM AKILLI MADENCİLİK TESİSİ

Kirsten Hund, Daniele La Porta, Thao P. Fabregas, Tim Laing, John Drexhage



Climate **Smart** Mining

© 2020 Uluslararası İmar ve
Kalkınma Bankası/ Dünya Bankası

1818 H Caddesi Kuzeybatı
Washington, DC 20433
Telefon: 202-473-1000
www.worldbank.org

Bu çalışma, Dünya Bankası personelinin dış katkılarıyla bir üründür. Bu çalışmada ifade edilen bulgular, yorumlar ve sonuçlar, Dünya Bankası, İcra Direktörleri Kurulu veya

Temsil ettikleri hükümetler.

Dünya Bankası bu çalışmada yer alan verilerin doğruluğunu garanti etmez. Bu çalışmada yer alan herhangi bir haritada gösterilen sınırlar, renkler, mezhepler ve diğer bilgiler, Dünya Bankası'nın herhangi bir bölgenin yasal statüsü veya onayı ile ilgili herhangi bir yargısı anlamına gelmez.
veya bu tür sınırların kabulü.

Bu rapor Dünya Bankası Grubu'nun İklim Akıllı Madencilik Girişimi tarafından desteklenmiştir. İklim Akıllı Madencilik Girişimi, Anglo American, Hollanda Dışişleri Bakanlığı ve Rio Tinto tarafından desteklenmektedir. Alman Federal Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Bakanlığı (BMZ) adına Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH de bu raporun geliştirilmesini desteklemiştir. Ayrıca Jane Sunderland'a (editör) ve Mark Lindop'a (tasarımcı) teşekkür etmek istiyoruz.

Haklar ve İzinler

Bu çalışmadaki materyal telif hakkına tabidir. Dünya Bankası bilgisinin yayılmasını teşvik ettiği için, bu çalışma, bu çalışmaya tam atıf yapıldığı sürece, ticari olmayan amaçlar için tamamen veya kısmen çoğaltılabilir.

Haklar ve lisanslar, yan haklar dahil olmak üzere, ile ilgili tüm sorular şu adrese yönlendirilmelidir:

Dünya Bankası Yayınları
Dünya Bankası Grubu
1818 H Street NW
Washington, DC 20433,

Amerika

Faks: 202-522-2625

İçindekiler

Önsöz	7
Teşekkürler	8
Kısaltmalar	9
Yönetici Özeti	11
Metodoloji - Mineral Talebinin Tahmini	19
Genel Metodoloji	19
<small>Geri dönüşüm, yeniden kullanım</small>	25
Küresel Isınma Potansiyeli	26
Modeli Belirsizliği	28
Temiz Enerji Geçişinde Minerallerin Rolü	31
Yenilenebilir Enerji ve Depolama Tahmini	32
Temiz Enerji Teknolojilerinin Mineral Yoğunluğu	37
Güneş Fotovoltaik	38
Rüzgâr	45
Jeotermal	51
Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi	55
Enerji Depolama	59
Ortaya Çıkan Enerji Teknolojileri	65
2050'ye Kadar Genel Mineral Talebi Mineral Geri	71
Dönüşümü, Yeniden Kullanım	80
Enerji Teknolojilerinin, Minerallerin Küresel Isınma Potansiyeli Enerji	87
Teknolojilerinin GWP'si Minerallerin GWP'si	87
	88
Çözüm	93
Minerallere Yönelik Genel Talep Artıyor Mineral	93
Talebi Duyarlılığı ve Riskleri Geri Dönüşüm ve	93
Yeniden Kullanımın Rolü	95
Emisyon Azaltma ve Azaltma Fırsatları Modelin	95
Ötesindeki Riskler	97
Sonraki Adımlar ve Eylemler	99
Ek A: İklim Akıllı Madencilik	101
Hakkında Ek B: Metodoloji	102
Ek C: Belirsizlikler	107
Referanslar	108

Rakamlar

Şekil ES.1	IEA Enerji Teknolojisi Perspektif Senaryolarına Göre 2050'ye Kadar Tahmini Yıllık Ortalama Mineral Talebi	11	Şekil 3.11	2050'ye Kadar 2DS Altında Mevcut Teknoloji ve Malzeme Kullanım Azaltma Altında Rüzgar Teknolojilerinden Neodimyuma Yönelik Toplam Talep	49
Şekil ES.2	2DS'ye Göre 2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam Molibden Talebi	12	Şekil 3.12	2DS Altında Jeotermalden Gelen Mineral Talebinin Payı	51
Şekil ES.3	2050'ye Kadar 2DS Altında Güneş PV Alt Teknolojilerinden İndiyuma Yönelik Toplam Talep, Temel Pay ile Karşılaştırıldı	13	Şekil 3.13	2050'ye Kadar Jeotermal İçin Gerekli Minerallere Yönelik Toplam Talep	52
Şekil ES.4	2DS Altında 2050'ye Kadar Yıllık Alüminyum Talebine Göre Alüminyum Geri Dönüşüm Projeksiyonları	14	Şekil 3.14	2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam Titanyum Talebi (2DS, Temel Senaryo)	52
Şekil ES.5	2DS'ye Göre 2050'ye Kadar Cradle-to-Gate Kullanılarak Minerallerin Çıkarılması ve İşlenmesinden Kaynaklanan Toplam Küresel Isınma Potansiyeli, Operasyonlar Hariç	15	Şekil 3.15	IEA 2DS Kapsamında 2050'ye Kadar Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisinden Kaynaklanan Mineral Talebinin Payı	55
Şekil 1.1	Modeldeki Teknoloji Kapsamı	22	Şekil 3.16	2050'ye Kadar Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi İçin Gerekli Minerallere Yönelik Toplam Talep	56
Şekil 1.2	2050 Enerji Teknolojisi Senaryoları İçin Mineral Talebinin Tahmini Metodolojisi	23	Şekil 3.17	2050'ye Kadar Teknolojiye Göre Toplam Gümüş Talebi (2DS, Temel Senaryo)	56
Şekil 1.3	Modelin Küresel Isınma Potansiyeli Bileşeninin Şeması	28	Şekil 3.18	Li-ion PİL	60
Şekil 2.1	Teknoloji Tabanlı Azaltma Senaryolarında 2050'de Tahmini Kurulu Kapasite	33	Şekil 3.19	IEA 2DS'ye Göre 2050'ye Kadar Enerji Depolamadan Kaynaklanan Mineral Talebinin Payı	61
Şekil 2.2	2050'ye Kadar Enerji Depolamada Beklenen Büyüme	35	Şekil 3.20	2050'ye Kadar Enerji Depolama İçin Gerekli Minerallere Yönelik Toplam Talep	62
Şekil 3.1	IEA 2DS'ye Göre 2050'ye Kadar Güneş Fotovoltaiklerinden Kaynaklanan Mineral Talebinin Payı	40	Şekil 3.21	2050'ye Kadar 2DS Altında Li-ion PİL Senaryolarından Kaynaklanan Minerallere Yönelik Toplam Talep	63
Şekil 3.2	2050'ye Kadar Güneş Fotovoltaikleri İçin Gerekli Minerallere Yönelik Toplam Talep	40	Şekil 3.22	Mevcut Teknoloji Altında Enerji Depolamadan Lityum İçin Toplam Talep ve 2050'ye Kadar 2DS, B2DS Altında Malzeme Kullanımının Azaltılması	64
Şekil 3.3	2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam Alüminyum Talebi (2DS, Temel Senaryo)	41	Şekil 3.23	Karbon Yakalama Depolama	65
Şekil 3.4	2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam İndiyum Talebi (2DS, Temel Senaryo)	41	Şekil 3.24	Katı Hal PİL	66
Şekil 3.5	2050'ye Kadar 2DS Altında Güneş PV Alt Teknolojilerinden İndiyuma Yönelik Toplam Talep, Temel Pay ile Karşılaştırıldı	42	Şekil 3.25	Yüzen Açık Deniz Rüzgarı	68
Şekil 3.6	Rüzgar Türbininin Evrimi	45	Şekil 3.26	Hidrojen Yakıt Hücresi	69
Şekil 3.7	IEA 2DS Kapsamında 2050'ye Kadar Rüzgardan Kaynaklanan Mineral Talebinin Payı	46	Şekil 4.1	Enerji Teknolojileri İçin Minerallere Yönelik Toplam Talep (Depolama Olmadan) Sadece 2050'ye Kadar 4DS, B2DS ve REmap Altında	71
Şekil 3.8	2050'ye Kadar Rüzgar İçin Gerekli Minerallere Yönelik Toplam Talep	47	Şekil 4.2	RTS, Ref, B2DS ve REmap'e Göre 2050'ye Kadar Enerji Teknolojilerinden (Depolama Olmadan) Elde Edilen Minerallere Yönelik Talepteki Göreceli Değişim, Temel Senaryoya Göre	72
Şekil 3.9	2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam Çinko Talebi (2DS, Temel Senaryo)	47	Şekil 4.3	2050'de Yalnızca Enerji Teknolojilerinden 2DS Altında Tahmini Yıllık Mineral Talebi, 2018 Üretim Seviyeleriyle Karşılaştırıldığında	73
Şekil 3.10	2050'ye Kadar 2DS Altında Rüzgar Alt Teknolojilerinden Neodimyuma Yönelik Toplam Talep, Temel Pay ile Karşılaştırıldı	48			

Şekil 4.4	2DS'ye Göre 2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam Bakır Talebi	75
Şekil 4.5	2DS'ye Göre 2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam Molibden Talebi	75
Şekil 4.6	2050'ye Kadar Toplam Bakır ve Molibden Talebi (2DS, Temel Senaryo)	76
Şekil 4.7	2DS Altında Talep Risk Matrisi	78
Şekil 4.8	2DS Kapsamında 2050'ye Kadar Geri Dönüşümün Alüminyum ve Bakır İçin Toplam Talep Üzerindeki Etkisi	81
Şekil 4.9	2050'ye Kadar 2DS Altında Geri Dönüşümün Nikel İçin Toplam Talep Üzerindeki Etkisi	82
Şekil 4.10	2050'ye Kadar 2DS Altında Geri Dönüşümün Kobalt ve Lityum İçin Toplam Talep Üzerindeki Etkisi	82
Şekil 4.11	2DS Altında 2050'ye Kadar Lityum İçin Toplam Talep Üzerindeki Yeniden Kullanımın Etkisi	83
Şekil 5.1	2050'ye Kadar "Beşikten Kapıya" Maden Çıkarma ve İşleme, Yenilenebilir Elektrik Üretimi Operasyonları ve Enerji Depolama Teknolojilerinin Fosil Yakıt Teknolojileriyle Karşılaştırılması	87
Şekil 5.2	2DS'ye Göre 2050'ye Kadar Enerji Teknolojileri için Beşikten Kapıya Toplam Kümülatif Emisyonlar Talep Endeksine (MtCO ₂ e) Göre	89
Şekil 5.3	2DS'ye Göre 2050'ye Kadar Teknolojiyle Cradle-to-Gate Kullanılarak Minerallerin Çıkarılması ve İşlenmesinden Elde Edilen Toplam GWP, İşlemler Hariç	91
Şekil A.1	İklim Akıllı Madencilik Yapı Taşları	101
Şekil B.1	Lityum Fiyatları, 2010–2019	106

Tablolar

Tablo 1.1	Bu Çalışmada Yer Alan Enerji Teknolojileri	20
Tablo 1.2	Senaryo Çalışmasına Dahil Edilmek Üzere Literatür İncelemesinde Belirlenen Mineraller	20
Tablo 1.3	Teknoloji Tabanlı Azaltma Senaryoları	21
Tablo 1.4	2050'de Varsayılan Alt Teknoloji Payları	24
Tablo 1.5	Teknolojilerin Varsayılan Ömrü	24
Tablo 1.6	Ömrünün Sonuna Kadar Geri Dönüşüm Oranları ve Geri Dönüştürülmüş İçerik Oranları	25
Tablo 2.1	IEA ve IRENA'dan Kısıtlanmış Teknoloji Tabanlı Azaltma Senaryoları	32
Tablo 3.1	İlgili Düşük Karbon Teknolojileriyle Minerallerin Haritalanması	37
Tablo 3.2	Güneş PV Pazarında Alt Teknoloji Penetrasyonunun Payı ⁴² 2DS Altındaki Temel Paylaşımına Karşılaştırıldığında	42
Tablo 3.3	Rüzgar Pazarında Alt Teknoloji Penetrasyonunun Payı, Temel Paya Göre	48
Tablo 3.4	Ref, 2DS ve B2DS'de Kapsanan Piller ve Alt Teknolojileri	61
Tablo B.1	Temiz Enerji Geçişinin Mineral Talebi Zorlukları Üzerindeki Etkisi	103
Tablo B.2	2018 Maden Üretimi ve 2050 Enerji Teknolojilerinden Tahmini Yıllık Talep	103

Kutu

Kutu 5.1	Alüminyum Üretiminden Kaynaklanan Emisyonların Azaltılması Enerji Teknolojilerinden Gelen Talep	90
-----------------	---	-----------



Önsöz

Bu raporda sunulan veriler her şeyi anlatıyor: İddialı iklim eylemleri minerallere yönelik önemli bir talebi beraberinde getirecek.

Düşük karbonlu bir gelecek gerçekleştirmek için küresel ısınmayı 1,5°C-2°C veya altında sınırlamak, temiz enerjiye büyük ölçekli bir geçiş gerektirir. Güneş panelleri, rüzgar türbinleri ve piller üretmek, öngörülebilir gelecekte kritik minerallere olan arz ve talebi şekillendirecektir. Bunu yapmak, çok çeşitli endüstriler ve mineral açısından zengin gelişmekte olan ülkeler için önemli sonuçlar doğuracaktır. Bu ülkeler, minerallere olan talebin artışından faydalanacaklardır ancak aynı zamanda artan madencilik faaliyetleriyle ilişkili malzeme ve iklim ayak izlerini yönetmeleri gerekir.

Bu raporun bulguları, mineral ve yenilenebilir enerji tedarik zincirlerindeki tüm paydaşların, Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 7'ye (Herkes İçin Uygun Fiyatlı ve Temiz Enerji) ulaşmak için daha temiz bir enerji sistemine geçişte hayati bir rol oynaması gerektiğini açıkça ortaya koyuyor. Ancak bunun, iklim, çevre ve özellikle madencilik faaliyetlerinden doğrudan etkilenen topluluklar olmak üzere insanlar pahasına olmaması gerekiyor.

Dünya Bankası 2017 yılında şunları yayınladı: *Düşük Karbonlu Bir Gelecek İçin Minerallerin ve Metallerin Artan Rolü*, düşük karbonlu bir geleceğin mineraller olmadan mümkün olmayacağı sonucuna varıyor. Bu rapor, bu iddiayı daha da güçlendiriyor, ancak teknoloji iyileştirmelerinin ve geri dönüşümün 2050'ye kadar mineral talebini nasıl etkileyebileceği konusunda yeni bir vurgu yapıyor. İlk kez, farklı düşük karbonlu teknolojilerin küresel ısınma potansiyeli, fosil yakıt tabanlı enerji sistemleriyle karşılaştırılarak analiz edildi. Ayrıca, belirli kritik minerallere olan taleple ilişkili riskleri yakalamak için yeni bir çerçeve sunuyoruz.

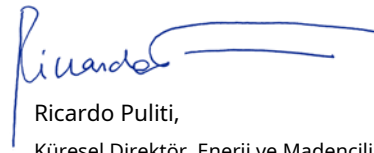
Bu rapor, politika yapıcılara, mineral üreticilerine, yenilenebilir enerji geliştiricilerine, iklim müzakerecilerine ve sivil toplum örgütlerine daha temiz bir enerji sistemine geçişin mineral talebini nasıl etkileyebileceği konusunda veri odaklı bir anlayış sağlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, her paydaşın böylesine önemli bir geçişin karbon ve malzeme ayak izlerini en aza indirmek için atabileceği eylemlere ilişkin ileriye dönük bir bakış açısı da sunmaktadır.

Düşük karbon teknolojilerinin mineral yoğunluğu göz ardı edilmemelidir. Madencilik sektörünün bugüne kadar küresel enerji kullanımının %11'ine kadarını tükettiğini ve altı büyük madencilik şirketinin madencilik projelerinin %70'inin su sıkıntısı çeken bölgelerde faaliyet gösterdiğini biliyoruz. Minerallere ve metallerle olan artan talep, kökten farklı, iklim açısından akıllı bir yaklaşım benimsemediğimiz sürece bu rakamları daha da yukarı taşıyacaktır. Bu yeni, iklimle ilgili riskleri anlamak, yenilenebilir enerji ve pil teknolojisi tedarik zincirlerinde yer alan tüm paydaşlar için kritik öneme sahip olacaktır; herhangi bir mineralin veya metalin çıkarılmasından son kullanımına kadar.

Yenilenebilir enerjinin mineral yoğunluğunun zorlukları olsa da, araştırmamız, düşük karbonlu teknolojiler daha mineral yoğun olsa bile, fosil yakıt teknolojilerinin ürettiği emisyonların yalnızca bir kısmını (%6) oluşturduğunu gösteriyor. Bu, oraya ulaşmak için daha fazla minerale ihtiyaç duyulacağı anlamına gelse bile, yenilenebilir enerjinin dağıtımının Paris Anlaşması'nı karşılamamıza yardımcı olmak için elzem olduğu anlamına geliyor.

Bu zorlukların üstesinden gelmek için Dünya Bankası, gelişmekte olan ülkelerin bu sismik değişimden faydalanmasını sağlarken, temiz enerji geçişi için minerallerin sürdürülebilir ve sorumlu bir şekilde üretilmesini ve tedarik edilmesini sağlamak amacıyla İklim-Akıllı Madencilik Girişimini başlattı. Amaç, mineral açısından zengin gelişmekte olan ülkelerin, çevreyi ve insanları korurken, mümkün olan en küçük karbon ayak iziyle bu büyüyen talebi karşılamaya iyi hazırlanmış olmalarını sağlamaktır.

İklim dostu madenciliğin benimsenmesiyle, iklimi ve çevreyi tehlikeye atmadan temiz enerji geçişini mümkün kılabileceğimizden eminim. Minerallerin karbon ve malzeme ayak izlerini azaltmak için birlikte çalışarak, iddialı iklim hedeflerini karşılamak ve herkese fayda sağlayan düşük karbonlu bir gelecek elde etmek için gereken yenilenebilir enerji ve pil depolama teknolojilerinin geniş çaplı dağıtımını destekleyebiliriz.



Ricardo Puliti,
Küresel Direktör, Enerji ve Madencilik Endüstrileri
Dünya Bankası

Teşekkürler

Bu rapor, Dünya Bankası'nın Enerji ve Çıkarma Küresel Uygulaması'nın İklim Akıllı Madencilik Ekibi tarafından geliştirilmiştir. Ekip, Daniele La Porta ve Kirsten Hund tarafından yönetilmiştir. Birincil yazarlar ve araştırma ekibi Thao P. Fabregas'tan (eski adıyla Nguyen) oluşuyordu.

Dr. Tim Laing (Brighton Üniversitesi) ve John Drexhage. Emmanouela Markoglou ve Clare Murphy-Mcgreevy iletişim desteği sağladı. Aisha I. Agily ve Helen Ba Thanh Nguyen organizasyonel destek sağladı.

Ekip, aşağıdaki kişilerin katkıları ve girdilerinden dolayı minnettardır: Ivan Jacques, Michael McCormick, Marcelo Mena-Carrasco, Peter Mockel, Remi Pelon, Sven Ulrich Renner, Benjamin Sprecher (Leiden Üniversitesi), Ester van der Voet (Leiden Üniversitesi) ve Sean Whittaker.

Modelleme aşamasında geri bildirim sağlayan uzmanlara teşekkür etmek istiyoruz: Matthew Eckelman (Northeastern Üniversitesi), Jagabanta Ningthoujam (Rocky Mountain Enstitüsü), Phillip Nuss (Alman Çevre Ajansı) ve Kohji Tokimatsu (Tokyo Teknoloji Enstitüsü).

Raporun modeli orijinal yayından oluşturulmuştur *Düşük Karbonlu Bir Gelecek İçin Minerallerin ve Metallerin Artan Rolü* ve diğer birçok değerli meslektaşımızın içgörülerinden, geri bildirimlerinden ve verilerinden faydalandık. En içten teşekkürlerimiz hepsine.

Son olarak, ekip Christopher Sheldon ve Riccardo Puliti'nin katkıları ve rehberliğinden büyük memnuniyet duymaktadır.

Kısaltmalar

2DS	2 derecelik senaryo (IEA)
4DS	4 derece senaryosu (IEA)
B2DS	2 derecelik senaryonun ötesinde (IEA)
ÇS	karbon yakalama ve depolama
CdTe	kadmiyum tellür
SiGARALAR	bakır indiyum galyum selenid
Ortak Sağlık Hizmet Sağlayıcı	Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi
Ortak₂	karbondioksit
Ortak₂ve	karbondioksit eşdeğeri
Son kullanma tarihi	hayatın sonu
sera gazı	sera gazı
Büyük	gigatonlar
Genel	gigavat
GWh	gigawatt-saat
Küresel IBP	küresel ısınma potansiyeli
ICMM	Uluslararası Madencilik ve Metaller Konseyi
Uluslararası Enerji Ajansı	Uluslararası Enerji Ajansı
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
LCOE	enerjinin eşitlenmiş maliyeti
Lityum iyon	lityum iyon
Dağ	milyon ton
M.Ö.	megavat
Ulusal Kriz Yönetimi	Ulusal Olarak Belirlenen Katkı
NMC	nikel manganez kobalt oksit
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
PV	fotovoltaik
Reiyef	geri dönüştürülmüş içerik
Referans	referans senaryosu (IRENA)
Yeniden haritalama	yenilenebilir enerji yol haritası senaryosu (IRENA)
RTS	referans teknoloji senaryosu (IEA)
Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi	Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi

Aksi belirtilmediği takdirde tüm dolarlar ABD dolarıdır.



Yönetici Özeti

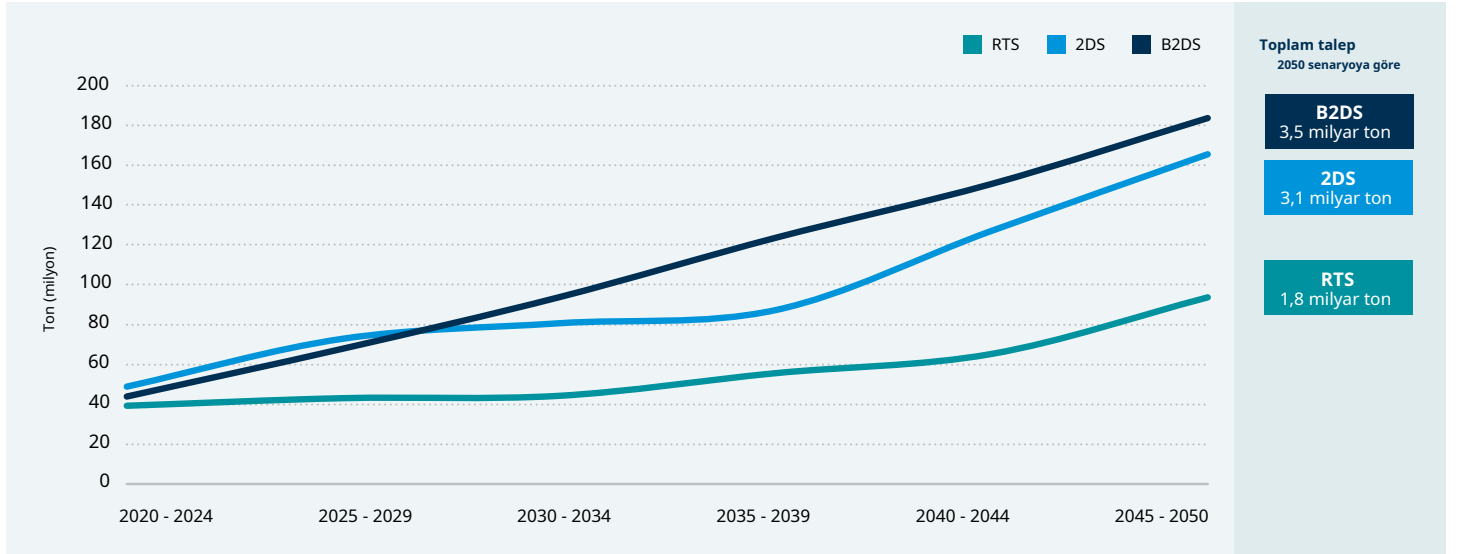
1. Düşük karbonlu bir gelecek çok mineral yoğun olacaktır çünkü temiz enerji teknolojileri fosil yakıt bazlı elektrik üretim teknolojilerinden daha fazla malzemeye ihtiyaç duyar. Paris Anlaşması'nda belirtildiği gibi iklim değişikliği hedefleri (1,50C–20C veya altı) konusunda daha büyük hırs, bu teknolojilerden daha fazlasının kurulmasını gerektirir ve bu nedenle daha büyük bir malzeme ayak izine yol açacaktır.

Düşük karbonlu teknolojiler, özellikle güneş fotovoltaik (PV), rüzgar ve jeotermal, fosil yakıt teknolojilerine kıyasla daha fazla mineral yoğunluğa sahiptir. Örneğin, 1 megavat (MW) kapasiteli güneş fotovoltaik santrali için yaklaşık 3.000 güneş paneline ihtiyaç vardır; bu, 200 MW'lık bir güneş fotovoltaik santrali projesinin 550 MW kadar büyük olabileceği anlamına gelir.

Amerikan futbolu sahaları (Mathis ve Eckhouse 2020). 2 derecelik senaryo (2DS) altında, enerji depolama teknolojilerinden gelen talebi karşılamak için grafit, lityum ve kobalt üretiminin 2018 seviyelerine göre 2050 yılına kadar yüzde 450'den fazla artırılması gerekecek. Alüminyum ve bakır gibi bazı temel minerallere olan talep yüzde olarak daha az görünse de, mutlak üretim rakamları 2050'ye kadar sırasıyla 103 milyon ton ve 29 milyon ton olarak önemlidir. Bu projeksiyonlar, bu teknolojilerin dağıtımını desteklemek için gereken ilişkili altyapıyı (örneğin, iletim hatları) veya fiziksel parçaları (şasi gibi) içermez (yeni üretilen elektrikli araçların).

Düşük karbonlu teknolojilerin maddi yoğunluğu nedeniyle, mineral tedarikinde yaşanabilecek olası sıkıntılar, belirli teknolojilerin küresel ölçekte devreye alınma hızını ve ölçeğini etkileyebilir.

Şekil ES.1 IEA Enerji Teknolojisi Perspektif Senaryolarına Göre 2050'ye Kadar Minerallerin Tahmini Yıllık Ortalama Talebi



Not: "Mineraller" bu analize dahil edilen 17 minerali ve çeliği ifade eder, ancak betonu hariç tutar. Çelik, alaya olan talebin enerji teknolojilerinden kaynaklanması nedeniyle dahil edilmiştir. Ortalama yıllık talep, verilen zaman dilimindeki minerallere olan ortalama taleptir. 2030'dan önce 2DS kapsamında B2DS'ye kıyasla daha yüksek mineral talebi, IEA tarafından 2DS'de B2DS'ye kıyasla ihtiyaç duyulacağını tahmin edildiği daha yüksek genel üretim kapasitesiyle açıklanabilir. Bu, özellikle bu zaman dilimlerinde 2DS'deki güneş fotovoltaikleri için geçerlidir. Sonuç olarak, 2DS'deki mineral talebindeki plato, yenilenebilir üretimin nispeten daha yavaş nüfuz etmesinden ve bunu 2035'ten itibaren depolama kapasitesinde hızlı bir artıştan kaynaklanmaktadır. 2DS = 2 derece senaryosu, B2DS = 2 derecenin ötesinde senaryo, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı, RTS = referans teknoloji senaryosu.

- 1 Bu rapor, gelecekte ne olacağını tahmin etmeyi amaçlamıyor; bunun yerine, gelecekteki küresel enerji sistemini incelemek ve farklı politika tercihleri ile teknoloji iyileştirmelerinin 2050 yılına kadar genel mineral talebini nasıl etkileyebileceğini ortaya koymak için bir dizi senaryo sunuyor.
- 2 2DS—B2DS (2 derecenin ötesindeki senaryo) ve RTS (referans teknoloji senaryosu) ile birlikte—Uluslararası Enerji Ajansı'nda (IEA) geliştirilen senaryolardan birini ifade eder. *Enerji Teknolojisi Perspektifleri 2017* Daha fazla bilgi için lütfen 1. bölüme bakınız.
- 3 Bu projeksiyonlar muhafazakar olabilir ve çözümlerin daha hızlı ve daha büyük ölçekte uygulanmasını gerektiren 1,50C derecelik bir senaryoda büyük olasılıkla daha büyük olacaktır. "Şasi", aracın şasisini ve ilişkili bileşenleri ifade eder.
- 4 Olası çift sayım sorunları nedeniyle çelik rakamları bu analize dahil edilmemiştir.

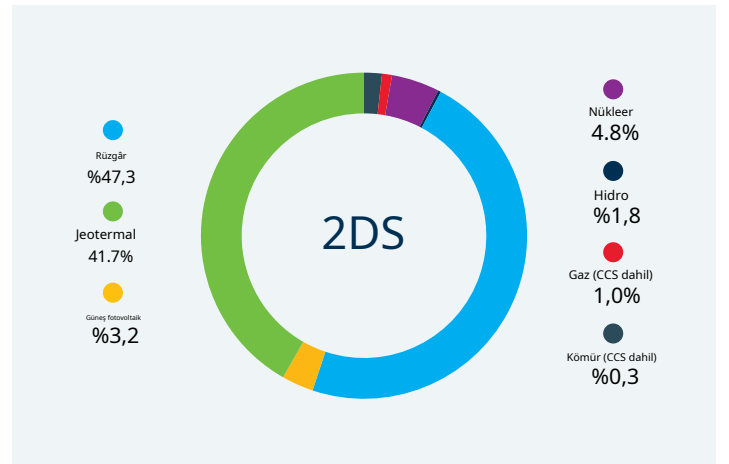
2. Her mineral, çapraz kesimli (düşük karbonlu teknolojiler yelpazesinde ihtiyaç duyulan) veya yoğun (belirli bir teknolojiye ihtiyaç duyulan) olmasına bağlı olarak farklı bir talep riski taşır. Her mineral için mutlak üretim sayıları ve talepteki göreceli artışlar, arzı karşılama kabiliyetlerinde rol oynayabilir ve iklim ve çevresel etkilere sahip olabilir.

Bakır, krom ve molibden gibi kesişen mineraller, çok çeşitli temiz enerji üretim ve depolama teknolojilerinde kullanılır ve istikrarlı talep koşullarına sahiptir. Bunun nedeni, bu minerallerin temiz enerji geçişinde herhangi bir belirli teknolojinin dağıtımına bağlı olmamasıdır. Örneğin, molibden ve bakır sekizden fazla temiz enerji üretim ve depolama teknolojisinde kullanılır; bu nedenle, teknolojik iyileştirmeler, maliyet azaltmaları ve yeni ortaya çıkan teknolojilerin dağıtımı gerçekleşse bile, bu değişikliklerin bunlara yönelik genel talep üzerinde çok az etkisi olacaktır. Bakır için, talebin en büyük payı güneş PV ve rüzgardan gelir, ancak bu yeni teknolojileri elektrik şebekelerine bağlamak için gereken iletim altyapısını içermediği için talep hafife alınmış olabilir.

Lityum, grafit ve kobalt gibi konsantre mineraller yalnızca bir veya iki teknoloji için gereklidir ve bu nedenle teknolojik bozulma ve dağıtım taleplerini önemli ölçüde etkileyebileceğinden daha yüksek talep belirsizliğine sahiptir. Bu mineraller öncelikli olarak enerji depolamada kullanılır ve 2018 üretim seviyelerine göre en yüksek talep rakamlarına sahiptir. Enerji depolama, şu anda araştırma ve geliştirme (AR-GE) ve pilot aşamalarında olan enerji depolama alt teknolojilerinin sayısı ve farklı politika seçimleri ve piyasa güçleri göz önüne alındığında 2030 sonrası en yüksek belirsizlik seviyesine sahip olduğundan, konsantre mineraller, özellikle bu minerallerin üreticileri için en yüksek talep risk seviyesine sahiptir.

Kesişen ve yoğunlaştırılmışın ötesinde, bazı mineraller düşük karbonlu geleceğe geçiş nedeniyle talepte daha yüksek seviyelerde değişikliklerle karşı karşıya kalıyor. Grafit ve lityum talebi o kadar yüksek ki, sadece talebi karşılamak için 2DS kapsamında mevcut üretimin 2050 yılına kadar neredeyse %500 oranında artırılması gerekecek. Öte yandan, 2050 yılında enerji teknolojileri için alüminyuma olan talep, mevcut üretim seviyelerinin yalnızca %9'unu oluşturuyor, ancak alüminyum çok çeşitli teknolojilerde kullanılıyor ve bu da onu teknoloji dağıtımındaki değişikliklere daha az duyarlı hale getiriyor ve bu analizdeki minerallerden herhangi birinin en yüksek mutlak talep seviyelerine sahip. Bu farklı talep risklerini anlamak, hızla gelişen enerji teknolojilerine uyum sağlaması gereken madencilik ve enerji endüstrileri için çok önemlidir. Kesişen ve konsantre mineraller arasındaki ilişkinin yanı sıra farklı talep seviyelerinin anlaşılmasını kolaylaştırmak için bu rapor, paydaşlar ve politika yapıcılar tarafından kullanılacak ve minerallerin talep riski profillerine göre kategorize edilmesine olanak tanıyan bir talep risk matrisi (şekil 4.7) geliştirmiştir.

Şekil ES.2 2DS Altında 2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam Molibden Talebi



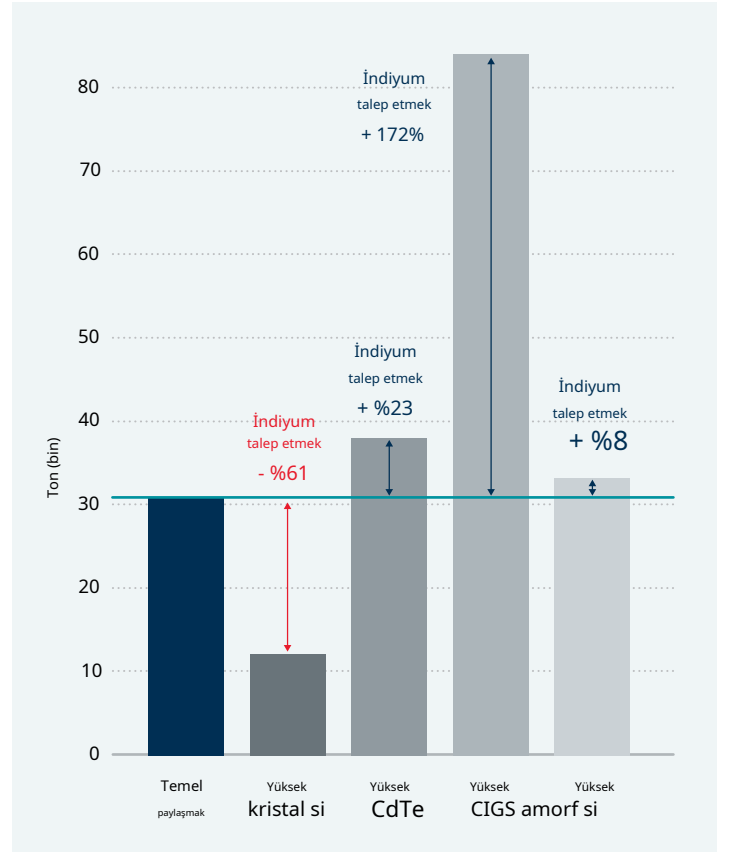
Not: 2DS = 2 derece senaryosu, CCS = karbon yakalama ve depolama, CSP = yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, PV = fotovoltaik.

3. Teknoloji ve alt teknoloji seçimi, malzeme ikamesi ve teknolojik iyileştirmeler, farklı düşük karbon senaryoları altında bireysel minerallere olan talebi değiştirecektir. Yine de, herhangi bir düşük karbon yolu minerallere olan genel talebi artıracaktır.

2DS kapsamında, enerji teknolojilerinden gelen alüminyum talebinin çoğunluğu (%87) güneş fotovoltaiklerinden karşılanacak, çinko ve titanyum talebinin ise %98'i rüzgar ve %64'ü jeotermalden karşılanacak. Güneş PV ve rüzgar, bir arada, tüm bakır talebinin %74,2'sini oluştururken, pil depolama bu analizde tüm grafit ve lityum talebini oluşturmaktadır. Her enerji teknolojisinin farklı mineral bileşimleri vardır ve bu da bir teknolojiden diğerine önemli ölçüde değişebilen talep özelliklerine yol açar.

Verimlilik iyileştirmeleri gibi ikame etkileri, 2050 yılına kadar bir teknoloji içindeki hangi alt teknolojinin en yaygın şekilde kullanılacağına bağlı olarak indiyum gibi bireysel minerallere olan talep üzerinde güçlü etkilere sahip olabilir. İkame etkilerini yönlendirebilecek faktörler arasında piyasa dinamikleri, minerallerin bulunabilirliği, teknolojik iyileştirmeler ve maliyetler yer alır. Elektrik üretimini karbondan arındırmak için ortaya çıkacak teknoloji yolu, talepte en büyük artışı yaşayacak mineralleri şekillendirecektir. Yüzen açık deniz rüzgarı, yeşil hidrojen veya katı hal pilleri gibi yeni teknolojilerin gelecekteki enerji sisteminin şeklini değiştirmesi mümkündür. Bu teknolojiler farklı mineraller gerektirir ve farklı mineral talebi etkileri taşır, ancak bunlar genellikle fosil yakıt bazlı muadillerinden daha fazla malzeme yoğun oldukları için minerallere olan genel talep yine de artacaktır.

Şekil ES.3 2050'ye Kadar 2DS Altında Güneş PV Alt Teknolojilerinden İndiyuma Yönelik Toplam Talep, Temel Pay ile Karşılaştırıldığında



Not: 2DS = 2 derece senaryo, amorf Si = amorf silisyum, CdTe = kadmiyum tellür, CIGS = bakır indiyum galyum selenid, kristal Si = kristalin silisyum, PV = fotovoltaik.

4. Minerallerin geri dönüştürülmesi ve yeniden

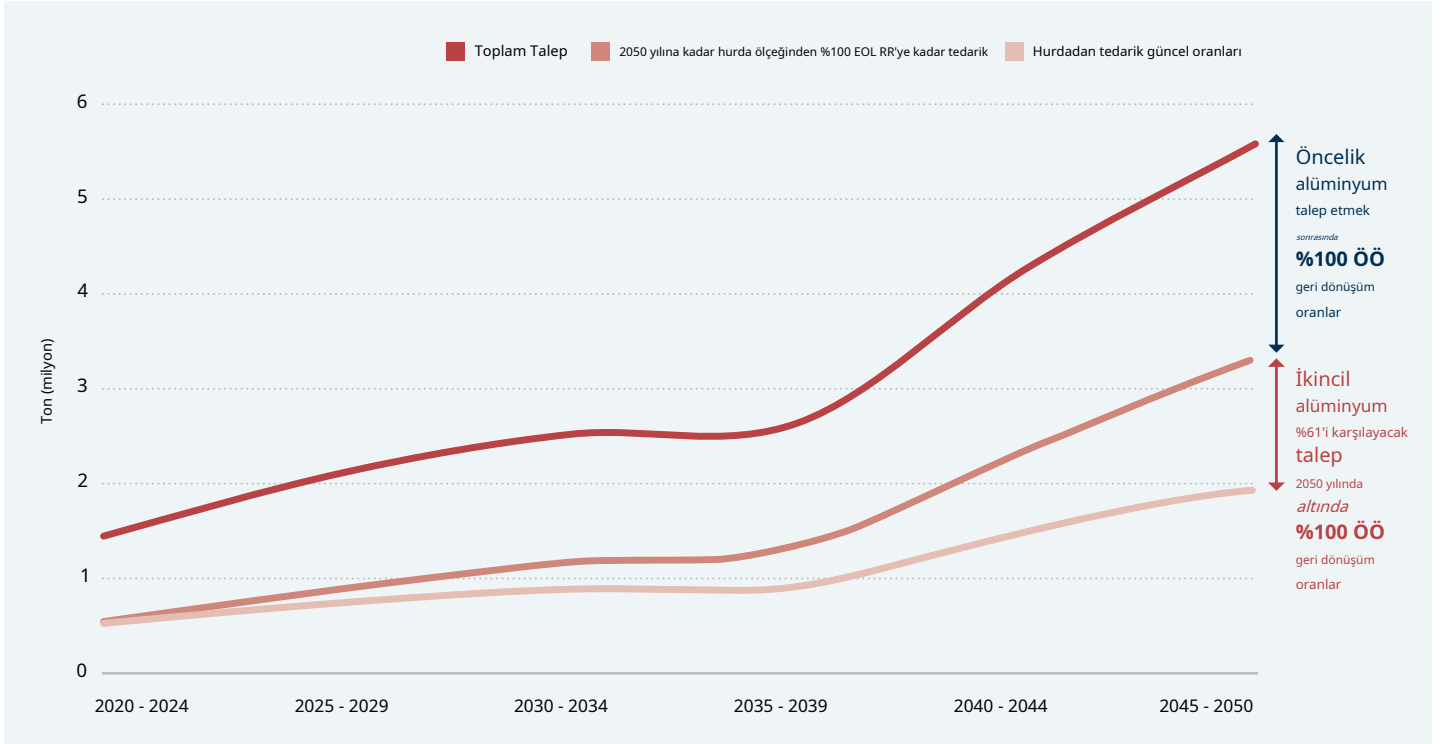
kullanılması emisyonların azaltılmasında önemli bir rol oynayabilirken, geri dönüşüm oranlarında gelecekte büyük artışlar olsa bile, bu düşük karbonlu teknolojileri üretmek için gereken kritik minerallerin sağlanması için madencilğe ihtiyaç duyulacaktır.

Geri dönüşüm ve yeniden kullanımın gelecekteki mineral talebini karşılamada rolü olacak, ancak madencilikten gelen birincil mineral talebine hala ihtiyaç duyulacak.

Geri dönüşüm oranları, maliyetler ve teknik sorunlar nedeniyle tüm mineraller için büyük ölçüde farklılık gösterir. Talebin çoğunu geri dönüşümden karşılamının zorluğu, kısmen geri dönüştürülecek ve yeniden kullanılacak mevcut malzemenin eksikliğinden, maliyetlerden ve teknolojik engellerden kaynaklanmaktadır (örneğin, bazı teknolojiler tasarım nedeniyle kolayca geri dönüştürülemez). Geri dönüşümü ve yeniden kullanımı kolaylaştırmak hayati bir parçadır

Düşük karbonlu geçişin, ancak politika önlemlerinin geri dönüşüm süreçleriyle ilişkili ekonomik ve çevresel zorluklar konusunda farkındalığı artırırken bu alanda eylemi teşvik etmesi gerekecektir. Geri dönüşüm oranlarındaki gelecekteki artışlar, lityum iyon piller gibi enerji depolama teknolojileri için bileşenlerin yeniden kullanımı ve rüzgar türbinleri gibi ekipmanların yenilenmesi gibi ham maddelere olan talepteki artışları hafifletmede önemli bir rol oynayabilir. Mineral geri dönüşüm sektöründeki bu zorlukların üstesinden gelinebilse bile, kalan birincil talebi en etkili ve çevresel ve sosyal açıdan sorumlu şekilde karşılama ihtiyacı hala devam etmektedir. Özellikle gelişmiş ülkelerde, iddialı iklim hedefleri olan bu kritik minerallerin ithalatçıların, artan çıkarma faaliyetleriyle ilişkili maddi etkileri azaltmak ve karbonu azaltmak için gelişmekte olan ülkelerdeki mineral üreticileriyle yakın bir şekilde çalışmaları hayati önem taşıyacaktır.

Şekil ES.4 2DS Altında 2050'ye Kadar Yıllık Alüminyum Talebine Göre Alüminyum Geri Dönüşüm Projeksiyonları



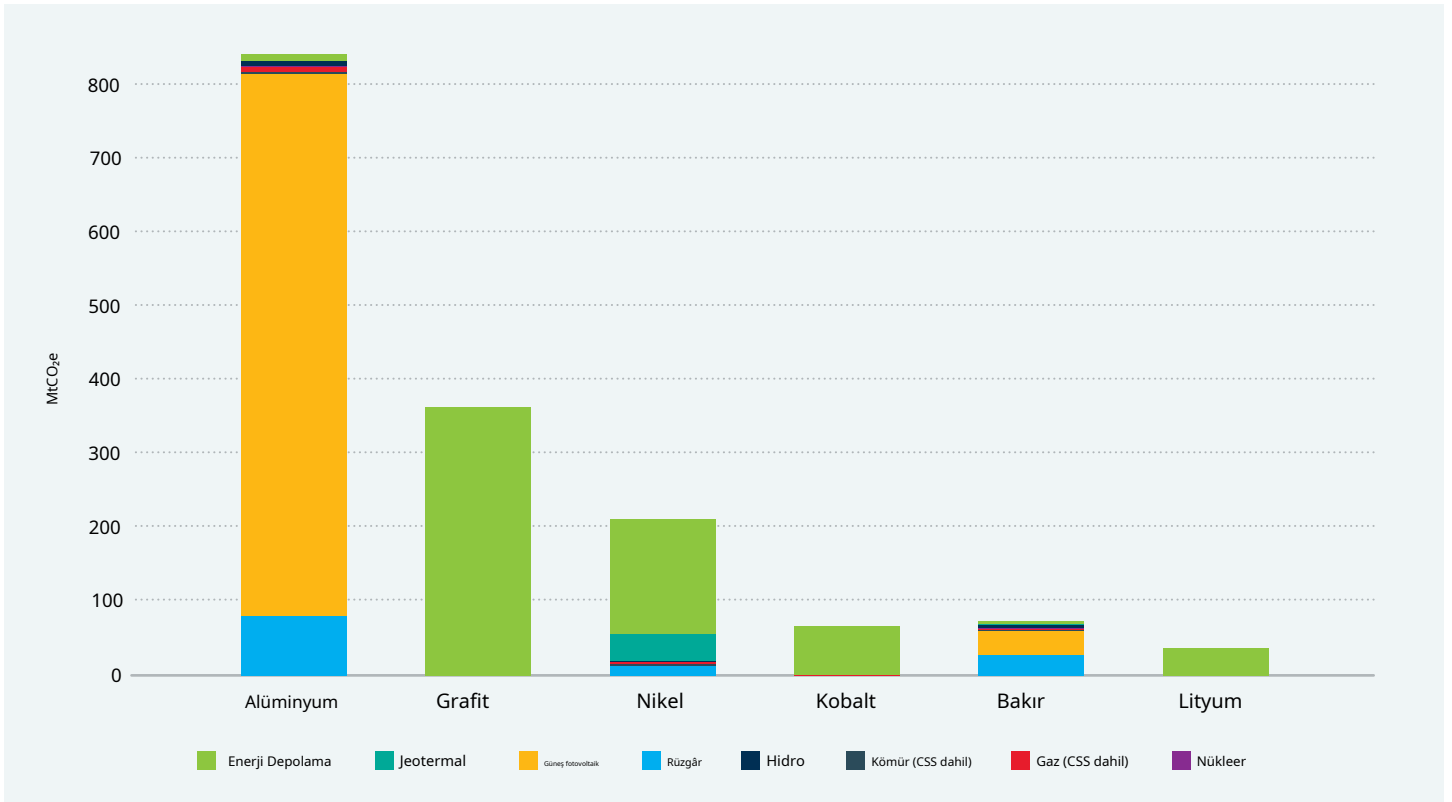
Not: EOL geri dönüşüm oranlarının 2050 yılına kadar %100 EOL'yi karşılamak için yıllık olarak artacağı varsayılmaktadır. Bu, ikincil alüminyumun zamanla artan miktarda alüminyum talebini karşıladığı anlamına gelir. 2DS = 2 derece senaryosu, EOL = kullanım ömrü sonu, RR = geri dönüşüm oranları.

5. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin daha yüksek mineral yoğunluğuna rağmen, ilişkili sera gazı emisyonlarının ölçeği fosil yakıt teknolojilerinininkinin bir kısmıdır. Ancak, karbon ve malzeme ayak izleri göz ardı edilemez.

Yenilenebilir enerjinin payını artırmak, elektrik sektörünün karbondan arındırılmasının en etkili yollarından biri olmakla birlikte, Paris Anlaşması'na taraf olan ülkelerin temiz enerji teknolojilerindeki mineral yoğunluğunu ele alması gerekiyor. Yenilenebilir enerji ve depolama teknolojilerinin üretimi ve işletiminden kaynaklanan emisyonlar, kömür ve gaz üretiminin yalnızca yüzde 6'sıdır.

2DS. Ancak, 2050'ye kadar yaklaşık 16 gigaton karbondioksit eşdeğeri (GtCO₂e) emisyonuna neden olurlar - ABD ve Çin'in 2018 emisyonlarına benzer - işleme ve üretim tesisleri arasında minerallerin taşınmasından kaynaklanan emisyonları hesaba katmadan. Birlikte, enerji teknolojileri için alüminyum, grafit ve nikel üretimi kümülatif olarak 1,4 GtCO₂'ya neden olur. 2050 yılına kadar bu rakamın, Fransa, Almanya ve Birleşik Krallık'ın 2018 yılındaki toplam karbondioksit emisyonuna yakın olacağı tahmin ediliyor. Enerji sektörünün ve pil üretiminin yeşillendirilmesi, temiz enerji teknolojilerinden kaynaklanan yukarı ve aşağı yönlü emisyonla ilgili zorlukların politika ve inovasyon yoluyla anlamlı bir şekilde ele alınmasını ve bu emisyon azaltımlarının Paris Anlaşması kapsamında ülkelerin Ulusal Olarak Belirlenmiş Katkılarına entegre edilmesini gerektirir.

Şekil ES.5 2DS'ye Göre 2050'ye Kadar Cradle-to-Gate Yöntemiyle Minerallerin Çıkarılması ve İşlenmesinden Kaynaklanan Toplam Küresel Isınma Potansiyeli, İşlemler Hariç



Not: 2DS = 2 derece senaryosu, CCS = karbon yakalama ve depolama, CSP = yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, MtCO₂e = milyon ton karbondioksit eşdeğeri.

6. Temiz enerji geçişi için gerekli minerallerin karbon ayak izini sınırlamak, kaynak açısından zengin gelişmekte olan ülkelerde ekonomik büyümeyi artırmaya ve çevresel riskleri azaltmaya yardımcı olarak çift kazanımlar sağlayabilir. Ayrıca Paris Anlaşması, Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi (SDG) 7, "herkes için uygun fiyatlı, güvenilir, sürdürülebilir ve modern enerjiye erişim" ve SDG 13, "iklim değişikliği ve etkileriyle mücadele için acil eylem" doğrultusunda 1,50C–20C yoluna geçişi sağlayacaktır.

Gelişmiş, gelişmekte olan ve gelişmekte olan ülkelerde, ayrıca mineral üreticileri ve tüketicilerinde iklim hedeflerini artırmaya yönelik bütünsel bir yaklaşım benimsemek, mineral çıkarmadan bu teknolojilerin kullanım ömrünün sonuna kadar düşük karbon teknolojilerinin tüm tedarik zincirinin anlaşılmasını ve analiz edilmesini içerir. Bu nedenle, (1) madencilik sektörünün sürdürülebilir ve sorumlu uygulamalar kullanarak 2050 yılına kadar artan talebi karşılayabilmesini; (2) hükümetlerin ve özel sektörün artan taleple ilişkili emisyonları ele almasını sağlamak için temiz enerji teknolojilerinin yukarı akış ve kullanım ömrü sonu faaliyetlerinin dikkate alınması gerekir.

düşük karbonlu bir geçişi desteklemek için bu minerallerin sürekli, istikrarlı ve uygun fiyatlı bir şekilde tedarik edilmesini sağlarken mineral üretimi; ve (3) düşük karbonlu teknolojilerin kolayca sökülüp güvenli bir şekilde bertaraf edilebilmesini ve mineral içeriklerinin bu yeni talebi kısmen karşılamak için geri dönüştürülebilmesini sağlamak için tüm tedarik zincirinde inovasyondan yararlanılır.

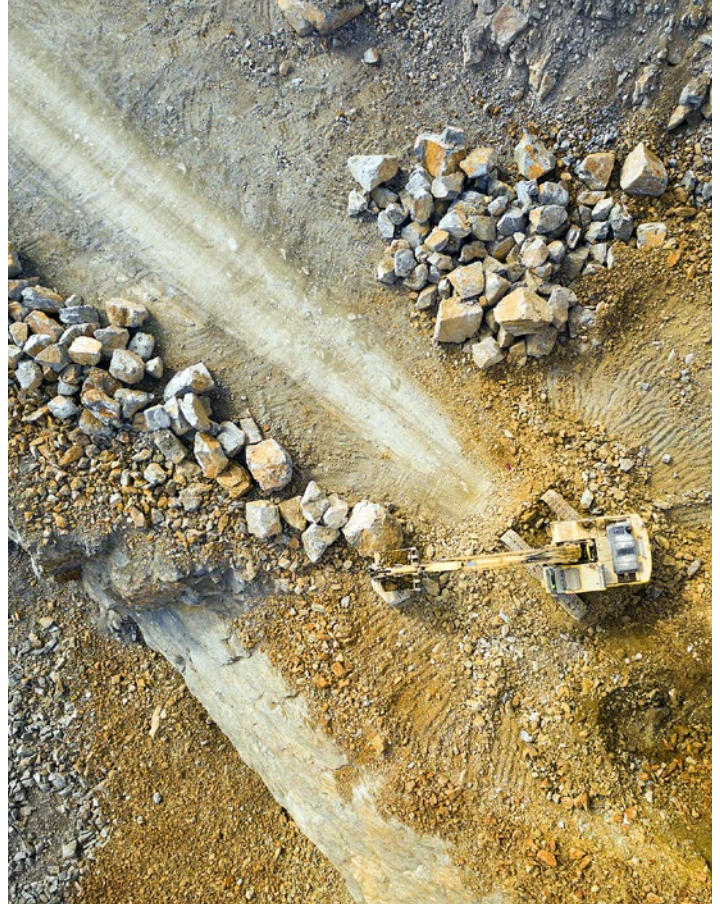
Temiz enerji teknolojisi tedarik zinciri boyunca sera gazı emisyonlarının sınırlandırılması, kaynak açısından zengin ve bu mineralleri tedarik edebilecek konumdaki gelişmekte olan ülkelerde ekonomik büyümeyi artırmanın yanı sıra iklim ve çevre risklerini azaltarak çift yönlü kazanç sağlayabilir. Ancak, artan mineral üretimiyle emisyonların ve diğer potansiyel olarak zararlı çevresel ve sosyal etkilerin azaltılması sağlanamazsa, temiz enerji teknolojilerinin iklim eylemi için bugün sahip oldukları destek seviyesini koruyamama riski vardır. Bu nedenle, bu teknolojilerin üretimi ve bertarafının insanlar ve çevre pahasına olmaması hayati önem taşımaktadır. Madencilik sektörü, SDG 7'ye katkıda bulunarak temiz enerji geçişinde önemli bir role sahiptir ve iklim değişikliğine karşı küresel mücadelede (SDG 13, Paris Anlaşması) önemli bir rol oynayabilir. İnovasyonun karbonsuzlaştırmada merkez sahneye çıkmasını sağlamak ve sorumlu mineral üretimini teşvik etmek, SDG 9'a (Sanayi, İnovasyon ve Altyapı) ve SDG 12'ye (Sorumlu Tüketim ve Üretim) eşit şekilde katkıda bulunacaktır.



7. İklim-Akıllı Madencilik Girişim, düşük karbonlu geçişten kaynaklanan yeni emisyonları en aza indirmek için hükümetler, kalkınma ortakları, endüstriler ve sivil toplumla birlikte çalışarak ve kaynak açısından zengin gelişmekte olan ülkelerle yakın bir şekilde çalışarak bu zorlukları ele alıyor ve bu stratejik mineralleri temiz enerji teknolojileri için sorumlu bir şekilde tedarik ediyor.

İklim açısından akıllı madenciliği, talep risk matrisi aracılığıyla minerallerin farklı talep risklerine ilişkin bir genel bakışla birleştirmek, iklim, enerji ve madencilik paydaşlarına, artan iklim hırsının karbon ve malzeme ayak izlerini sınırlandırırken istikrarlı bir mineral tedariki sağlamaya ilişkin riskleri anlamaları ve azaltmaları için bir çerçeve sağlar. Tedarik zinciri boyunca her paydaşın oynayacağı bir rol vardır:

- **İklim paydaşları:** Minerallerin temiz enerji geçişini sağlamada hayati bir rol oynamasıyla, iklim topluluğu üyelerinin bu minerallerin üreticileriyle (kaynak açısından zengin gelişmekte olan ülkeler ve madencilik endüstrisi dahil) yakın bir şekilde çalışarak bu emisyonların azaltılmasını sağlaması hayati önem taşıyacaktır. Mineral üretimden kaynaklanan emisyonları azaltmayı öncelik haline getiren mineral açısından zengin ülkeler, **iklime duyarlı madencilik** uygulamaları, Paris Anlaşması kapsamındaki Ulusal Belirlenmiş Katkılarına karbonsuzlaştırma çabalarını entegre etme seçeneklerini değerlendirebilir.
- **Temiz enerji paydaşları:** Enerji sektörünün, düşük karbonlu teknolojilerin sürdürülebilir ve sorumlu bir şekilde üretilmesini sağlamada ve bu teknolojilerin 10, 20 veya 30 yıl sonra kullanım ömürlerinin sonuna geldiklerinde atık yönetimini hesaba katmada önemli bir rolü vardır. Madencilik sektörü, dünyanın toplam enerji tüketiminin %2-11'ini oluşturmaktadır, bu nedenle enerji sektörünün mineral üreten ülkeler ve madencilerle yakın bir şekilde çalışarak minerallerin temiz enerji kaynakları kullanılarak üretilmesini sağlaması önemli olacaktır ve **iklime duyarlı madencilik** uygulamaları.



- **Madencilik paydaşları:** Madencilik topluluğu, tedarik ettikleri minerallerle ilişkili karbon ve malzeme ayak izlerinin en aza indirilmesini sağlayarak SDG 7'ye katkıda bulunan bir kuruluş olarak kendini konumlandırmalıdır. Bu mineralleri çıkarmak için gereken enerji, su ve arazi miktarını azaltmak ve sektörün karbon ve çevresel ayak izlerini azaltmak için inovasyon gereklidir. Bu zorlukları ele alan, örneğin uyum sağlama gibi önlemler alınmadan **iklime duyarlı madencilik** Bu uygulamalarla madencilik sektörünün temiz enerji geçişinin öncüsü ve destekçisi olarak konumlanması zorlaşacaktır.



Metodoloji

Mineral Talebinin Tahmini

Bu rapordaki metodoloji, ilgili minerallerin ve metallerin (birlikte "**mineraller**") 2050 yılına kadar elektrik üretimi ve enerji depolamasından elde edilecek.7Elektrik üretimi ve enerji depolama senaryoları (birlikte "**teknoloji tabanlı azaltma senaryoları**") Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) verilerini kullanır *Enerji Teknolojisi Perspektifleri 2016* ve *Enerji Teknolojisi Perspektifleri 2017* ve Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (IRENA) 2019 *Küresel Enerji Dönüşümü: 2050'ye Giden Yol Haritası* Her senaryoda temiz enerji teknolojilerinin sağlanması için gerekli olan mineral miktarının belirlenmesi.

Analiz, enerji depolamanın yanı sıra jeotermal, güneş, rüzgar ve geleneksel enerji teknolojilerinden gelen mineral talebini tahmin ederken, talebi karşılamak için bugüne kadar mevcut olan minerallerin küresel arzını veya düşük karbonlu bir dünyayı elektrikleştirmek için gereken yeni küresel iletim altyapısından (örneğin, yenilenebilir enerji projelerini mevcut iletim altyapısına bağlamak ve elektrikli araçlar için yeni şarj istasyonları oluşturmak) kaynaklanacak yeni mineral talebini hesaba katmıyor. Ayrıca, enerji teknolojilerinin mevcut ve gelecekteki fiyatlarını veya enerji dönüşümü için gereken minerallerin fiyatını da dikkate almıyor. Başka bir deyişle, bu rapor, fiyattan ve bugünün dünya çapındaki mineral arzının 2050'ye kadar bu yeni talebi karşılayıp karşılayamayacağından bağımsız olarak, yalnızca belirli bir temiz enerji teknolojisi alt kümesini (aşağıda listelenmiştir) karşılamak için ihtiyaç duyulacak mineral miktarını analiz ediyor.

Genel Metodoloji

Metodoloji, temiz enerji geçişinden kaynaklanan potansiyel mineral talebini belirlemek için sağlam bir model oluşturmak amacıyla birincil ve ikincil araştırmalar kullanılarak geliştirilmiştir. Temiz ve geleneksel enerji için elektrik üretimi ve enerji depolama teknolojilerinde mineral kullanımını incelemek üzere bir literatür kapsam çalışması ve temiz enerji uzmanlarıyla görüşmeler yapılmıştır. Bu bilgiler daha sonra yıllık mineral talebini tahmin etmek için modelde kullanılan varsayımları geliştirmek için kullanılmıştır. Bu yıllık talepler daha sonra 2050'ye kadar kümülatif talebe toplanmıştır. Modeldeki temel varsayımlar arasında IEA ve IRENA görünümüne dayalı teknoloji tabanlı azaltma senaryoları; bu senaryolara ulaşmak için gereken teknoloji ve alt teknolojiler; bu teknolojilerin varsayılan yaşam süreleri; ve modele dahil edilen her teknolojiden bir megavat elektrik veya bir megavat-saat enerji depolama sağlamak için gereken mineraller yer almaktadır. Modelin statik ve dinamik unsurları vardır. Her enerji teknolojisi ve alt teknolojisi için gereken kapasite, ilgili teknoloji tabanlı azaltma senaryolarına bağlı olarak yıldan yıla değişmektedir. Bir megavat veya megavat-saat veya elektrik veya enerji depolaması için gereken mineraller ve teknolojilerin yaşam süreleri gibi diğer hususlar modelde sabit kalır, ancak sonuçların bu varsayımlardan ilkinin değiştirilmesine olan duyarlılığı test edilir.

Literatür Kapsam Çalışması

Yaklaşım, mineral talebini üretmek için analize dahil edilmesi gereken her enerji teknolojisindeki alt teknolojileri tanımlamayı içeriyordu (bkz. tablo 1.1). Örneğin, bugün piyasada birçok güneş PV paneli çeşidi mevcuttur ve her birinin biraz farklı mineral gereksinimleri vardır. Rüzgar türbinleri de birçok farklı modelde olabilir ve kara ve açık deniz rüzgar türbinleri farklı miktarlarda mineral gerektirir. *Alt teknolojiler* Bunlar farklı tipte güneş panelleri, rüzgar türbinleri veya pillerdir.

Raporda daha sonra analize dahil edilmek üzere 17 mineralden oluşan bir liste belirlendi (bkz. Tablo 1.2).

7 Bu rapor Dünya Bankası'nın önceki raporuna dayanmaktadır. *Düşük Karbonlu Bir Gelecek İçin Minerallerin ve Metallerin Artan Rolü* (Haziran 2017) ve benzer bir metodoloji benimser. Analiz 17 element ve minerali kapsar: On altısı çeşitli miktarlarda çıkarma ve işleme sonrasında üretilir ve kullanılırken, biri, grafit, karbonun özel bir biçimidir.

Tablo 1.1 Bu Çalışmada Yer Alan Enerji Teknolojileri

Enerji teknolojileri									
Temiz enerji (elektrik üretimi)	Teknoloji	Alt teknoloji	Enerji depolama	Teknoloji	Alt teknoloji	Konvansiyonel enerji (elektrik üretimi)	Teknoloji	Alt teknoloji	
	Konsantre güneş enerjisi	evet		Pil: Otomotiv	Li-ion arasında bölünmüş, kurşun asit ve diğerleri		Kömür	Kömür yakıtlı elektrik nesil	
	Hidroelektrik	evet		Pil: Merkezi olmayan	Li-ion arasında bölünmüş, kurşun asit ve diğerleri			Kömür yakıtlı elektrik nesil + CCS	
	Jeotermal	evet		Pil: Izgara ölçeği	Li-ion arasında bölünmüş, kurşun asit, redoks akış ve diğerleri		Gaz	Gaz yakıtlı elektrik nesil	
	Nükleer	evet						Gaz yakıtlı elektrik nesil + CCS	
	Güneş fotovoltaik	Güneş PV - CdTe		Enerji depolama	Konvansiyonel enerji (elektrik üretimi)				
		Güneş PV - kristal silikon							
		Güneş PV - SEGARLAR							
		Güneş PV - amorf silisyum							
	Rüzgâr	Açık deniz							Enerji depolama
Karada									

Not: Burada listelenen teknolojiler için mineral talebi, bu çalışma için genel mineral talebi sonuçlarına dahil edilmiştir. CCS = karbon yakalama ve depolama, CdTe = kadmium tellür, CIGS = bakır indiyum galyum selenid, Li-ion = lityum-iyon, na = uygulanamaz, PV = fotovoltaik.

Literatür taramasından toplanan veriler, belirli bir alt teknolojinin megavat kapasitesini inşa etmek için gereken element ve minerallerin (bundan sonra mineraller olarak anılacaktır) miktarını da içeriyordu (bkz. Tablo 1.2); bu genellikle mineralin kurulu megavatın (kg/kurulu MW) kilogram cinsinden ağırlığıyla ifade edilmiştir. Örneğin, bir veri kaynağı 3 MW'lık bir rüzgar türbini inşa etmek için gereken çinkoyu bildirirken, başka bir kaynak 5 MW'lık bir türbin için gereken çinkoyu verir. Bu sayılar, 1 MW'lık bir rüzgar türbini üretmek için gereken çinko miktarını vermek üzere standartlaştırılmıştır.

Farklı tahminler toplandı ve her mineral alt teknoloji eşleşmesi için (örneğin açık deniz rüzgarı için çinko veya Li-ion piller için lityum) düşük, medyan ve yüksek bir değer seçildi. Bu farklı değerler, tahmini bir mineral talebi aralığı üretmek için modelde kullanıldı. Bu aralığın orta noktası bu analizde raporlandı.

Tablo 1.2 Senaryo Çalışmasına Dahil Edilmek Üzere Literatür İncelemede Belirlenen Mineraller

1	Alüminyum	10	Manganez
2	Krom	11	Molibden
3	Kobalt	12	Neodimyum
4	Bakır	13	Nikel
5	Grafit	14	Gümüş
6	İndiyum	15	Titanyum
7	Ütü	16	Vanadyum
8	Yol göstermek	17	Çinko
9	Lityum		

Teknoloji Tabanlı Azaltma Senaryoları

Yukarıda belirtildiği gibi, “**teknoloji tabanlı azaltma senaryoları**”, IEA ve IRENA'dan alınan 2050'ye kadar elektrik üretimi ve enerji depolama senaryolarını ifade eder. Daha spesifik olarak, bu rapor mineral talebini tahmin etmek için altı teknoloji tabanlı azaltma senaryosu kullanır (tablo 1.3).

IEA ve IRENA senaryoları hakkında yapılması gereken önemli bir ayırım, 2017 IEA senaryolarının hem elektrik üretimi hem de enerji batarya depolama penetrasyonuna ilişkin görünümü içermesi, IRENA senaryolarının ve IEA 4DS'nin ise yalnızca elektrik üretimine odaklanmasıdır. Başka bir deyişle, IRENA senaryoları ve IEA 4DS, temiz enerji geçişinde enerji depolamanın penetrasyonunu bildirmez.

4DS, IEA'nın 2017 ETP senaryoları veya IRENA'nın 2019 senaryoları için modellerde kullanılsa da, burada düşük karbonlu bir geçişe doğru marjinal ilerlemenin olduğu durum olarak tanımlanan temel senaryo olarak tutulmuştur. Bu, 4DS'nin muhtemel veya normatif olması nedeniyle değil, küresel enerji sisteminde düşük karbonlu teknoloji penetrasyonu olan ve olmayan bir gelecek arasındaki ilgili minerallere olan göreceli talebi karşılaştırmak için yapılır.

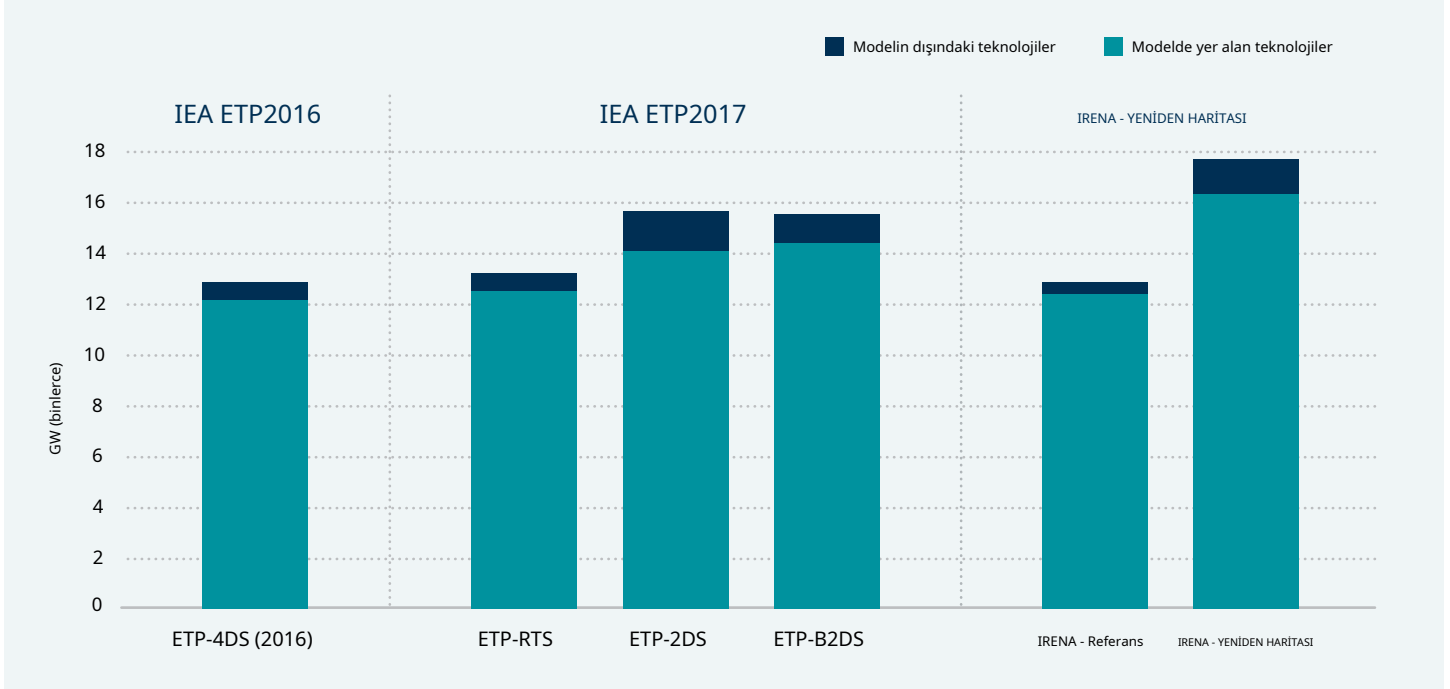
IEA ve IRENA ayrıca teknoloji kapasitesinin durumunun küresel sıcaklık senaryolarının en iddialılarını bile karşılamaya yetecek düzeyde olduğu görüşünü savunuyor. Bununla birlikte, hiçbir kurum düşük karbonlu teknoloji penetrasyonunun bu ölçekte gerçekten uygulanması için gereken malzemelerin göreceli bulunabilirliği konusunda spekülasyon yapmıyor.

Tablo 1.3 Teknoloji Tabanlı Azaltma Senaryoları

Teknoloji Tabanlı Azaltma Senaryoları			
	Senaryo kısaltması	Kaynak	Senaryo açıklaması
1	4DS (Temel senaryo)	IEA ETP (2016) raporundan 4 derecelik senaryo	Temel senaryo Dünyanın şu anki yörüngesinde devam ettiği, enerji sistemini fosil yakıt kaynaklarından uzaklaştırmada küçük iyileştirmeler yapıyor
2	RTS	IEA ETP (2017) raporundan referans teknoloji senaryosu	Tüm ülkelerin Paris Anlaşması uyarınca yasaklandığı gibi Ulusal Olarak Belirlenen Katkıları (NDC'ler) uygulayacağını ve bunun da ortalama sıcaklık artışına yol açacağını varsayar. 2100 yılına kadar 2,7°C
3	2DS	IEA ETP (2017) raporundan 2 derecelik senaryo	Ortalama küresel sıcaklık artışını sınırlama olasılığının en az %50 olduğu senaryo 2100 yılına kadar 2°C
4	B2DS (En iddialı (IEA raporundaki senaryo)	IEA ETP (2017) raporundan 2 derecelik senaryonun ötesinde	Ortalama gelecekteki sıcaklık artışlarını %50 oranında sınırlama şansına sahip senaryo 2100 yılına kadar 1,75°C
5	Referans	IRENA'dan (2019a) referans senaryosu	IEA'nın RTS'sine benzer şekilde, NDC'ler de dahil olmak üzere mevcut/planlanan politikalar kapsamında yapılan eylemleri ve taahhütleri hesaba katar. Sıcaklıklardaki artış en azından 2100 yılına kadar 2,6°C
6	Yeniden haritalama (En iddialı (IRENA'daki senaryo)	IRENA'dan yenilenebilir enerji yol haritası senaryosu (2019a)	Küresel sıcaklıktaki artışı sınırlayan iddialı senaryo 2°C'nin "çok altında" sanayi öncesi seviyelerin üzerinde 2100

Not: IEA = Uluslararası Enerji Ajansı, IRENA = Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, ETP = Enerji Teknolojileri Perspektifleri.

Şekil 1.1 Modeldeki Teknoloji Kapsamı



Kaynak: IEA 2016, 2017; IRENA 2019a.

Not: 2DS = 2 derece senaryosu, 4DS = 4 derece senaryosu, B2DS = 2 derecenin ötesinde senaryo, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı, IRENA = Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, ETP = Enerji Teknolojisi Perspektifleri, GW = gigawatt, Ref = referans senaryosu, REmap = yenilenebilir enerji yol haritası senaryosu.

Modelde yer alan elektrik üretim teknolojileri temiz ve gelenekseldir —hem IEA hem de IRENA senaryolarında gelecekte üretilen elektriğin büyük çoğunluğunu oluşturur (Şekil 1.1). Elektrik üretiminin çok küçük bir kısmı dahil edilmemiştir, esas olarak petrol bazlı elektrik santrallerinden, biyokütle elektrik santrallerinden ve dalga ve okyanus elektrik üretim tesislerinden üretilen elektrik. Bu teknolojiler, onlar için gereken mineraller hakkında kamuya açık verilerin eksikliği nedeniyle hariç tutulmuştur.

Temiz enerji teknolojilerinin çoğunluğu, özellikle güneş PV ve ayrıca rüzgar (kara ve deniz) gelişmekte olan ülkelerde, elektrik talebindeki büyük öngörülen artışlar ve buna eşlik eden artan ekonomik kalkınma, özellikle güneş olmak üzere bu ülkelerin çoğunda önemli yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birleştiğinde, konuşlandırılması bekleniyor. Örneğin, IEA'nın 2DS'sinde, güneş PV ve rüzgarın kurulu kapasitesi, 2050 yılına kadar Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) dışındaki ülkelerde OECD ülkelerine göre %117 daha yüksek.

Güneş fotovoltaiklerine bakıldığında tablo daha da çarpıcı; OECD dışındaki ülkelerde güneş fotovoltaiklerinin oranı OECD ülkelerindekinin yüzde 208'i.

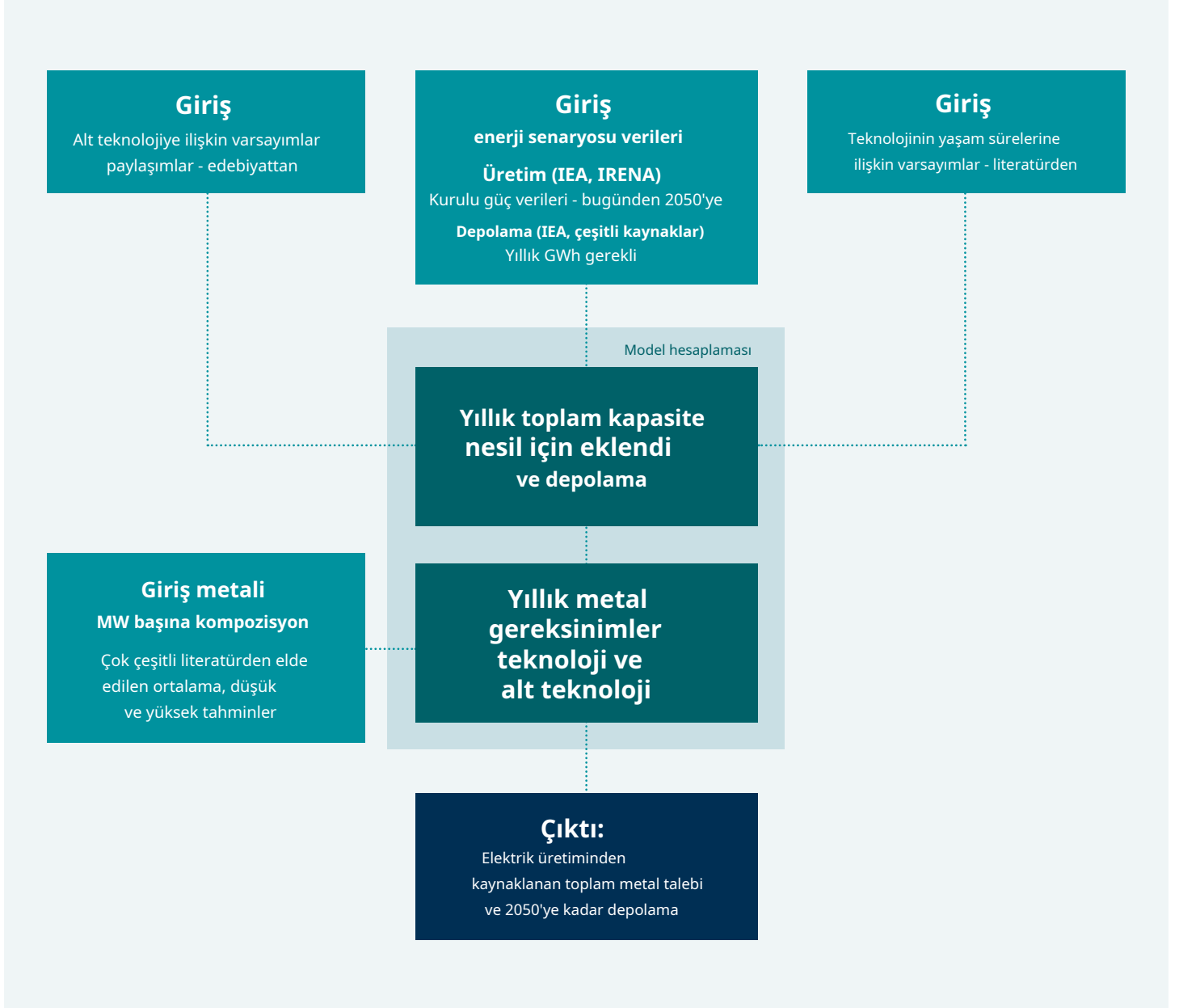
Modelleme Girişleri

Model yaklaşımı Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Temel girdiler dörtlüdür:

- IEA ve IRENA tarafından geliştirilen teknoloji tabanlı azaltma senaryoları
- Bu senaryoları karşılamak için gereken teknoloji ve alt teknoloji payları
- İlgili teknolojilerde varsayılan yaşam süreleri
- Bir megavat elektrik sağlamak için gereken minerallerin tahmin aralığı

Şekil 1.2, IEA verilerine dayalı olarak çeşitli iklim senaryoları altında mineral talebinin tahmininde kullanılan adımları göstermektedir.

Şekil 1.2 2050 Enerji Teknolojisi Senaryoları için Mineral Talebinin Tahmini Metodolojisi



Bu dört girdi, iki daha kapsamlı veri kategorisi oluşturmak için modele birleştirildi:

I. 2050 yılına kadar elektrik üretimi ve enerji depolama teknolojilerinde tahmini kapasite artışları.

II. Bu teknolojilerin tedarikinde tahmini yıllık mineral gereksinimleri, 2050 yılına kadar toplanarak elektrik üretimi ve enerji depolamasından kaynaklanan toplam mineral talebinin nihai hesaplamaları elde edildi.

Tablo 1.4, modelin temel senaryosunu oluşturan farklı alt teknolojilerin 2050 yılına kadarki penetrasyonunu göstermektedir.

Tablo 1.4 2050'de Varsayılan Alt Teknoloji Payları

Teknoloji	Alt teknoloji	2050 Penetrasyon
Enerji depolama (Otomotiv)	Lityum iyon	%100
Enerji depolama (Izgara ölçeği)	Kurşun asit	%2,5 - %5 (bağlı olarak senaryo)
Enerji depolama (Izgara ölçeği)	Lityum iyon	%70 - %84 (bağlı olarak senaryo)
Enerji depolama (Izgara ölçeği)	Redoks Akışı	%2,8 - %3,7 (bağlı olarak senaryo)
Enerji depolama (Izgara ölçeği)	Diğer ^A	%9,8 - %25
Enerji depolama (Merkezi Olmayan)	Lityum iyon	%33
Enerji depolama (Merkezi Olmayan)	Kurşun Asit	%33
Enerji depolama (Merkezi Olmayan)	Diğer ^A	%33
Güneş fotovoltaik	Kristalin silisyum	%50
Güneş fotovoltaik	Kadmiyum tellür	16,7%
Güneş fotovoltaik	Bakır indiyum galyum selenür	16,7%
Güneş fotovoltaik	Amorf silisyum	16,7%
Rüzgâr	Doğrudan tahrik	%25
Rüzgâr	Dişli	%75

Not: Pili bileşiminin bozulmasında, araç pillerinin şebekeye/merkezi olmayan enerjiye dönüştürülmesi, çeşitli senaryolar altında tahmini mineral talebinde hesaba katılmamıştır. Ancak, 4. bölümdeki yeniden kullanım bölümünde tartışılmaktadır.

a. Bu kategori, pompalı depolama gibi şebeke tabanlı ve merkezi olmayan enerji depolamanın diğer tüm biçimlerini temsil eder. Bu, teknolojilerin bileşik bir sepetini temsil ettiğinden, bu kategorinin mineral gereksinimleri hakkında hiçbir tahmin yoktur.

Minerallere olan göreceli talep, enerji teknolojilerinin beklenen uzun ömürlülüğü tarafından da yönlendirilir. Tablo 1.5, temel sıfır karbon teknolojilerinin beklenen ömürlerinin ardındaki varsayımları açıklar. Özellikle, enerji depolama için beklenen ve daha kısa olan 10 yıllık ömür, gelecekteki mineral pazarını belirlemede oynayacağı kritik rolü vurgular. Bu teknolojilerin çoğunun ömrü, alt teknolojiler arasında muhtemelen değişecektir ve ayrıca bu teknolojilerin bazılarının henüz tam ölçekli ticari dağıtıma ulaşmamış olması, hatta öngörülen ömürlerinin sonuna bile ulaşmamış olması nedeniyle belirsizdir. Teknolojilerin ömürleri öngörülenden daha uzun olursa veya yenileme yoluyla uzatılırsa, o zaman bu teknolojilerden daha azının modelin zaman dilimi içinde dağıtılması gerekecektir; örneğin, analiz rüzgâr için muhafazakar bir şekilde 20 yıllık bir ömür varsaysa da, açık deniz rüzgârı genellikle 25 yıllık bir ömürle tasarlanır ve bazı türbinler 40 yıldan uzun süredir faaliyettedir. Yaşam sürelerinin öngörülenden uzun olması durumunda, bu teknolojilerden kaynaklanan mineral talebi bu rapordaki projeksiyonlarda tahmin edilenden daha düşük olacaktır.

Tablo 1.5 Teknolojilerin Varsayılan Ömrü

Teknoloji	Varsayılan yaşam süresi (yıl)
Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi	30
Enerji depolama (tüm pil tipleri)	10
Jeotermal	30
Hidroelektrik	25
Nükleer	50
Güneş fotovoltaik	30
Rüzgâr	20
Kömür	40
Kömür + karbon yakalama ve depolama	40
Gaz	30
Gaz + karbon yakalama ve depolama	30

Model birincil ve ikincil araştırmalara dayansa da, modelin varsayımlarının çoğu temel olarak kamuya açık verilere dayanmaktadır. Bu nedenle veriler birçok açıdan sınırlıdır, en önemlisi verilerin farklı metodolojilere ve kapsamlara sahip çeşitli farklı çalışmalardan ve kritik derecede farklı yaşlardan elde edilmiş olmasıdır. Mümkün olduğunda, veriler tutarlı kaynaklardan alınmıştır, ancak bu, verilerin bazılarının daha yakın tarihli olması pahasına gerçekleşir. Yapılan ek varsayımlar ek B'de özetlenmiş ve tartışılmıştır.

Geri dönüşüm, yeniden kullanım

Yukarıda açıklanan modeli kullanarak IEA ve IRENA senaryoları altında 2050'ye kadar mineral talebini tahmin etmek için ek analizler yürütülmüştür. Mineral geri dönüşümünün ve yeniden kullanımının tahmini mineral talebini potansiyel olarak etkileyip etkilemeyeceği ve nasıl etkileyebileceği konusunda ek analizler yürütülmüştür. Mevcut haliyle, üretilen sonuçlar, bu minerallerin birincil veya ikincil minerallerden gelip gelmediğini dikkate almadan düşük karbonlu enerji teknolojilerinde son kullanım minerallerine olan talep için tahminler sunmaktadır. Geri dönüşümün birincil mineral talebi üzerindeki etkisini incelemek için beş mineral üzerinde kısa bir analiz yürütülmüştür - alüminyum, kobalt, bakır, nikel ve lityum - yeniden kullanımın etkisi yalnızca lityum için incelenirken.

Birincil mineral yeni çıkarılan malzeme olarak kabul edilirken, ikincil mineral geri dönüştürülmüş malzeme olarak kabul edilir. Geri dönüşüm için yaygın olarak bildirilen iki oran vardır: (1) **Yaşam sonu (EOL)**, bir ürünün kullanımı sonunda ne kadar mineralin geri dönüştürüldüğünü verir; ve (2) **geri dönüştürülmüş içerik (RC)** Bu, bir mineralin nihai kullanım talebine giren ikincil malzeme yüzdesini verir.

EOL ve RC oranları eşit değildir ve ilki ikincisinden daha yüksektir (bkz. tablo 1.6). Bu farkın temel nedeni hurdanın bulunabilirliğidir. Alüminyum örneğini ele alalım: Alüminyumun %42 ila %70'i ömrünün sonunda geri dönüştürülür ve bazı ülkelerde bu oran %90'a kadar çıkar; endüstri ayrıca elde ettiği hurdayı geri dönüştürmede de oldukça gelişmiştir. Yine de yeni alüminyum ürünlerinin geri dönüştürülmüş içeriğinin %34 ila %36 arasında olduğu tahmin edilmektedir. Bunun nedeni, hurdanın bulunabilirliğinin artan talebi karşılamaya yetmemesidir.

alüminyum. Ek olarak, bazı geri dönüşüm süreçleri malzemenin kendisinde kayıplara neden olur ve bazı uygulamalardan geri dönüşüme uygun malzemeyi kurtarmak teknik veya ekonomik olarak mümkün olmayabilir. Bu durum özellikle Li-ion piller için geçerlidir (Church ve Wuennenberg 2019), lityum için düşük geri dönüşüm oranlarını açıklamaya yardımcı olur (tablo 1.6). RC oranları ayrıca tüm endüstriler genelinde bir ortalamadır ve belirli minerallerde geri dönüştürülmüş malzeme optimum olmayan bir performans sağlar. Örneğin, pillerde kullanılan kobaltın son derece saf olması gerekir ve bu da geri dönüştürülmüş malzemenin belirli bir kullanım için kullanımını sınırlar (Bomgardner ve Scott 2018), rüzgar türbini kanatlarında kullanılan fiberglasın geri dönüştürülmesi son derece zordur (Martin 2020). Bu nedenler, EOL oranları %100'e ulaşsa bile (tüm olası hurdaların yakalandığı, geri dönüştürüldüğü ve yeniden kullanılabilceği anlamına gelir), RC oranlarının bu minerallere olan genel talepte önemli azalmalar olmadan %100'e ulaşmasının olası olmadığını göstermektedir.

Tablo 1.6 Ömrünün Sonuna Kadar Geri Dönüşüm Oranları ve Geri Dönüştürülmüş İçerik Oranları

Mineral	Yaşam sonu geri dönüşüm oranları	Geri dönüştürülmüş içerik oranları
Alüminyum	%42-%70	%34-%36
Kobalt	%68	%32
Bakır	%43-%53	%20-%37
Lityum	<1%	<1%
Nikel	%57-%63	%29-%41

Kaynak: UNEP 2011.

Mevcut ve potansiyel gelecekteki geri dönüşüm oranlarının birincil minerallere olan talep üzerindeki etkisini tahmin etmek için iki adımlı bir metodoloji benimsenmiştir. İlk olarak, mevcut EOL ve RC geri dönüşüm oranlarının 2050'ye kadar devam ettiği varsayılmıştır. Bu geri dönüştürülmüş içerik seviyeleri göz önüne alındığında, birincil ve ikincil mineral üretimi arasındaki denge, RC oranları ve modelde tahmin edilen mineral için genel talep seviyesi kullanılarak tahmin edilmiştir. Buradaki örtük varsayım, enerji teknolojilerinde kullanılan minerallerin, tüm uygulamalarda kullanılan minerallerle aynı birincil ve ikincil üretim dengesine sahip olduğudur.

Gelecekteki geri dönüşüm oranlarının artmasının birincil talep üzerindeki etkisi daha sonra incelenir. Gelecekteki geri dönüşüm oranlarına ilişkin tahminler, hem EOL hem de RC için seyrekler. Geri dönüşüm çabalarında gelecekte büyük bir artışın ölçeğini anlamak için, incelenen dört mineral (alüminyum, kobalt, bakır ve nikel) için aşağıdaki varsayımlar yapılır:

- **Güncel geri dönüşüm oranları:** Güncel EOL ve RC oranlarının tahminleri literatürden alınmış olup, toplanan değer aralığının orta noktası olarak alınmıştır.
- **Yeni senaryo - EOL geri dönüşüm oranlarının artırılması:** EOL geri dönüşüm oranlarının 2050 yılına kadar yüzde 100'e çıkarılması hedefleniyor. Sistemde kalan bazı kayıplar nedeniyle bu gerçekçi olmayabilir, ancak geri dönüşüm çabalarında iddialı bir artış olduğunu gösteriyor.
- **Hurda malzemenin mevcudiyeti:** Hurda malzeme bulunabilirliğinin toplam mineral talebine oranı aynı kalıyor.
- **RC oranlarına etkisi:** Dolayısıyla RC oranları, bugün gösterdiği gibi EOL oranlarıyla aynı oranı takip ediyor ve 2050 yılı RC oranları aynı oranlar kullanılarak tahmin ediliyor.
- **Birincil, ikincil mineral üretiminin belirlenmesi:** RC oranları, her yıl birincil ve ikincil mineral üretimi arasındaki dengeyi tahmin etmek için kullanılır.

Mineralin ihmal edilebilir mevcut tahmini EOL ve RC oranları göz önüne alındığında, bu işlemin lityum için yapılması mümkün değildir. Bu nedenle, gelecekteki lityum geri dönüşüm oranlarının senaryoları literatürden çıkarılmıştır.⁹

Enerji sisteminin bileşenlerinin yeniden kullanıldığı mineral yeniden kullanımı tahminlerine gelince, bunun yine nihai kullanım ile birincil mineral talebi arasında bir fark yaratma potansiyeli vardır. Örneğin, elektrikli araçlardan Li-ion pillerin elektrik şebekesi gibi sabit uygulamalar için yeniden kullanılması hakkında tartışmalar vardır. Bu nedenle, yeniden kullanımın bu etkisi, artan yeniden kullanım kalıplarının modelin enerji teknolojilerinden tahmini mineral talebi üzerindeki etkisini anlamak için raporda incelenmektedir.

Bu ek analiz mineral geri dönüşüm oranlarının tam bir resmini sağlamayı amaçlamasa da, mevcut ve gelecekteki mineral geri dönüşüm oranlarının tahmin edilmesi için araştırılması gereken önemli bir alandır.

geri dönüşüm ve yeniden kullanım, düşük karbonlu bir geleceğe ulaşmak için temiz enerji teknolojilerinin minerallere olan talebini karşılamak için yeterli olacaktır. Bu analizde ele alınmayan önemli bir husus, yenilemenin rolüdür; örneğin, rüzgar türbinleri gibi enerji teknolojilerinin tüm veya bileşen parçalarının ömürlerini uzatmak için yenilenmesi. Bununla birlikte, bunun etkileri 4. bölümdeki yeniden kullanım bölümünde tartışılmaktadır.

Küresel Isınma Potansiyeli

Bu bölüm, kısmen bir yaşam döngüsü analizi kullanarak, temiz enerji teknolojilerinin fosil yakıt teknolojileriyle karşılaştırıldığında küresel ısınma potansiyeline (GWP) odaklanmaktadır. Veriler eksik olsa da,¹⁰ İlk sonuçlar, fosil yakıtlara olan güçlü bağımlılığın devam ettiği temel senaryoya göre minerallerin ek olarak çıkarılması ve işlenmesinin önemli ölçüde daha az sera gazı (GHG) yoğunluğunda olacağını doğruluyor; temel senaryoda 2050 yılına kadar tahmini 615 gigaton karbondioksit (GtCO₂) üretilecekken, 2DS'ye geçiş yenilenebilir teknolojilerin inşası ve işletilmesinden kaynaklanan ekstra 6 GtCO₂ anlamına geliyor, ancak fosil yakıt üretiminden kaynaklanan emisyonları 350 GtCO₂'den fazla azaltıyor.

2

Bu GWP analizi yenilenebilir elektrik üretimi ve enerji depolama teknolojilerinin tüm yaşam döngüsünü kapsamaz; her bir teknolojinin işletimiyle sınırlıdır. Başka bir deyişle, GWP, enerji teknolojilerinin kullanım ömürlerinin sonuna ulaştıklarında değiştirilmesi ve elden çıkarılmasıyla ilişkili emisyonları hesaba katmaz ve rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir enerji teknolojilerinin taşınmasını veya kömür ve gazın nakliyesini hesaba katmaz. GWP analizinin amacı, yeni ve düşük karbonlu bir enerji sistemine geçişin GWP'sinin bir tahminini üretmektir.

Temel yaklaşım, düşük karbon teknolojilerinde bulunan ilgili minerallerin çıkarılması ve işlenmesindeki GWP'yi incelemek ve ardından bunu geleneksel fosil yakıt bazlı elektrik üretim kaynaklarının (yani kömür ve gaz) GWP'siyle karşılaştırmaktır. GWP, minerallerin çıkarılması, üretimi ve işlenmesinde kullanılan GHG emisyonlarının (büyük çoğunluğu karbondur) ve bu teknolojilerin işletilmesinde kullanılan bağıl miktarını ifade eder. Nükleer

9 Örneğin, Ziemann ve diğerleri (2018), 4. bölümde geri dönüşüm analizinde kullanılan lityum geri dönüşüm oranlarına ilişkin projeksiyonlar sunmaktadır.

10 Bu çalışmada temiz teknolojilerin üretiminde sera gazı (GHG) etkisine ilişkin hesaplamalar örneğin çelik veya çimentoyu kapsamamaktadır; fosil yakıt endüstrisiyle ilişkili altyapının üretimle ilişkili GHG emisyonları da incelenmemiştir.



yenilenebilir enerji ile fosil yakıt üretimi arasındaki soruna odaklanmak amacıyla enerji bu GWP analizinden çıkarılmıştır.

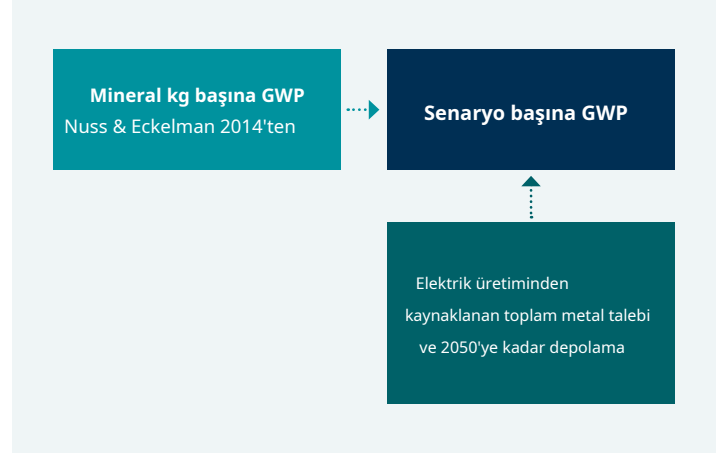
Bu çalışmada ele alınan belirli mineraller ve metallerle ilgili olarak, model Nuss ve Eckelman (2014) tarafından hazırlanan bir makaleden alınan verileri kullanır. Bu makale, doğrudan ve dolaylı emisyonlardan (örneğin, çıkarma ve işlemeden kaynaklanan emisyonlar ve bu süreçlerde kullanılan elektrik türüyle ilişkili emisyon tahminleri) karbondioksit eşdeğeri (CO₂e) cinsinden minerallerin GWP miktarının tutarlı tahminlerini verir. Yazarlar, bu malzemelerin göreceli GWP'sini "**beşikten kapıya**" kapsamına alınmamış olup, bu sayede minerallerin taşınması ve bertarafıyla ilişkili emisyonlar hariç tutulmuştur.

Enerji teknolojilerinin karbon ayak izi hakkında çok az literatür bulunmaktadır ve mevcut kaynaklar arasındaki veriler, çıkarma, işleme ve operasyonel emisyonlar etrafındaki farklı varsayımlar nedeniyle büyük ölçüde farklılık göstermektedir. Bu analiz için, temel veriler 2008 civarındaki dönemden gelmektedir ve bu nedenle bugünkü durumu tam olarak yansıtmamaktadır ve 2050 için de geçerli değildir. Mineraller için kilogram başına GWP'yi farklı şekillerde etkileyen ve daha da değişmesi muhtemel olan şeyler arasında elektrik karışımının değiştirilmesi, cevher derecelerinin düşürülmesi, emtiaların göreceli fiyatları,¹¹ ve madencilik ve üretim tekniklerini değiştirmek.

Bu değişimlerin yönü ve ölçeği minerallerden minerale farklılık gösterecektir.¹² Örneğin, demir, kok fırınlarına dayandığı süreç her zaman nispeten yüksek bir GWP'ye sahip olacaktır. Öte yandan, alüminyumun GWP'si, üretimi için gereken elektrik kaynağına çok bağlıdır. Örneğin, alüminyum üretimi için enerji kaynağı kömür santrallerinden gelen elektrik yerine hidroelektrik olduğunda GWP'si çok daha küçüktür.

Tahminleri üretmek için, modeldeki çeşitli enerji teknolojilerinden gelen minerallere yönelik toplam talep, kilogram mineral başına GWP tahminleriyle birleştirilir (Şekil 1.3). Bu daha sonra IEA 2DS'deki teknolojilerde kullanılan minerallerden kaynaklanan farklı GWP'lerin bir tahminini sağlar.

Şekil 1.3 Modelin Küresel Isınma Potansiyeli Bileşeninin Şeması



Not: GWP = küresel ısınma potansiyeli.

Her tahmin için, mineral kilogramı başına GWP aralığından ve mineral talebinin öngörülen aralığından kaynaklanan bir aralık üretildi. Bu analizde bildirilen sayılar aralığın orta noktasıdır. Bu, ek B'de daha ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

Model Belirsizliği

Birçok projeksiyonda olduğu gibi, enerji teknolojilerinden kaynaklanan gelecekteki mineral talebiyle ilgili belirsizlikler vardır, çünkü ileriye dönük projeksiyonlar üretmek için farklı metodolojilere sahip çeşitli kaynaklara güvenir. Bunlar arasında enerji teknolojilerinin mineral bileşimi; gelecekte devreye alınacak enerji teknolojilerinin payı ve ölçeği; her bir enerji teknolojisinde hangi alt teknolojilerin gerçekten devreye alınacağı; teknolojilerin ömrü ve geri dönüşüm ve yeniden kullanımın gelecekteki yolları yer alır.

Model, bu unsurlardan ikisi etrafındaki belirsizliği yakalar: (1) mineral bileşimi ve (2) enerji teknolojisi penetrasyonunun payı ve ölçeği. Her mineral için bir talep aralığı üretir ve bu analizin tüm sonuçları tahmini mineral talebi aralığının orta noktalarıdır. Bazı minerallerin aralıkları

11 Göreceli fiyatlar, iki veya daha fazla nihai metal ürünü üreten üretim süreçlerinin GWP'si için kitlesel tahsis yerine ekonomik tahsisi metodolojik seçimi nedeniyle önemlidir. Örneğin, bazı bakır rafinasyon biçimleri bakır, gümüş, selenyum ve tellür verir. Daha sonra soru, bakır rafinasyon sürecinden elde edilen GWP'nin dört mineral arasında nasıl tahsis edileceği olur. Nuss ve Eckelman (2014) tarafından benimsenen ekonomik tahsis, GWP'yi dört minerallerden elde edilen gelire göre tahsis eder. Kitlesel tahsis, elde edilen ürünlerin kütlesine göre tahsis eder. Ekonomik tahsis metodolojisi altında, görece fiyatlardaki büyük kaymalar, GWP'nin nihai kullanım metalleri arasındaki tahsisini kaydırır.

12 Bu sorunlar van der Voet ve diğerleri (2019) tarafından yedi belirli metal için derinlemesine araştırılmıştır. GWP kaynaklarıyla ilgili sorunların daha ayrıntılı bir tartışması ek B'de bulunabilir.

önemlidir. Örneğin, alüminyum güneş PV'sinde çerçeveler için kullanılır; ancak bu hizmet sentetik veya kompozit malzemelerle sağlanabilir ve alüminyum değiştirilirse veya değiştirildiğinde, bu minerale olan talep önemli ölçüde düşebilir.

Enerji teknolojisi penetrasyonunun payı ve ölçeğiyle ilgili belirsizliğin ikinci yönü çeşitli senaryoların kullanımıyla yakalanır. IEA'dan farklı senaryolar, düşük karbonlu enerji teknolojilerinin daha geniş bir şekilde konuşlandırılmasının etkisini yakalamak için kullanılır. Dört IEA senaryosu, daha yüksek iklim hırsının etkisini vurgulamak için kullanılır ve daha yüksek hırsın minerallere olan talebi artırdığı yönündeki açık bir eğilimi gösterir.

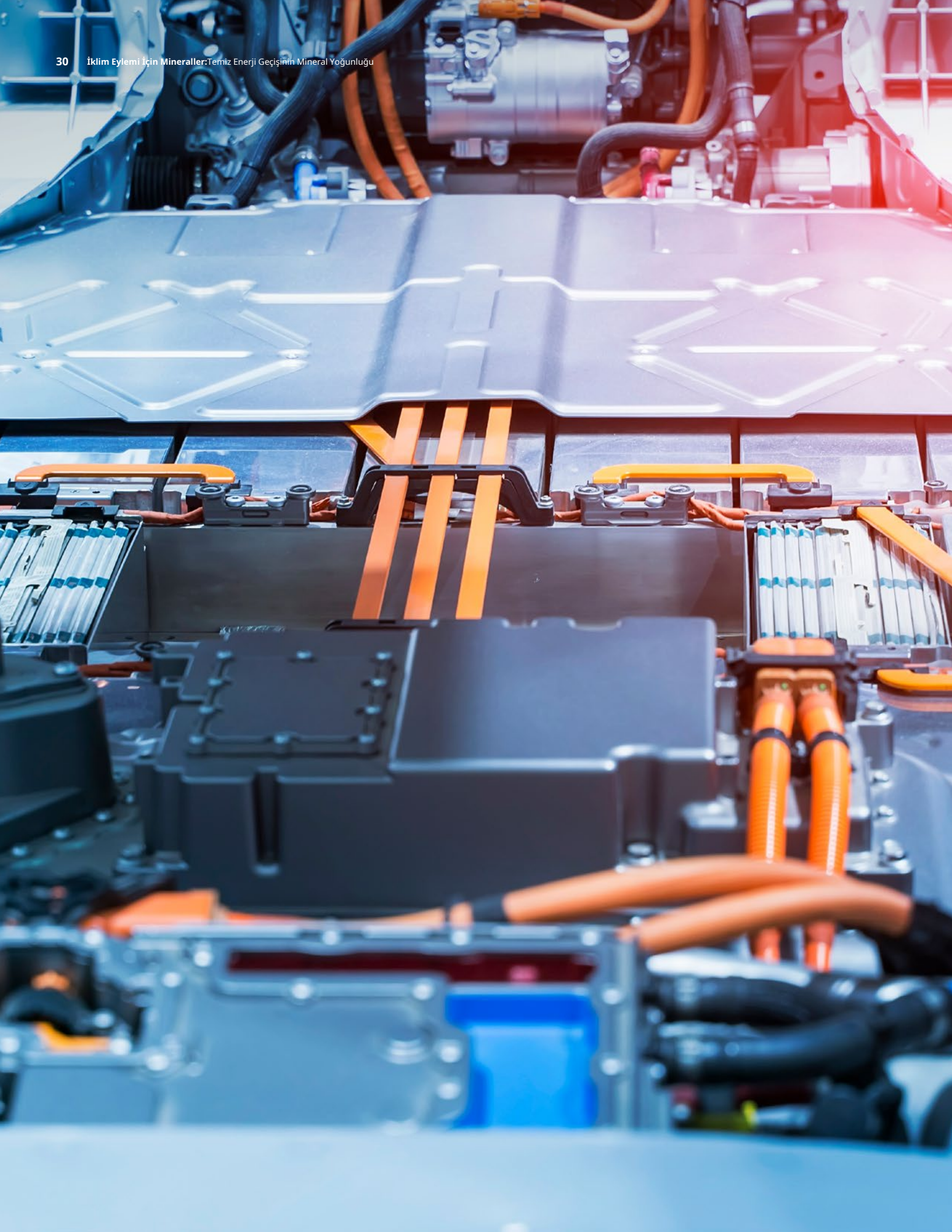
Ancak bu daha büyük hırsın içinde, aynı emisyon azaltım seviyesini karşılamak için bir dizi potansiyel teknoloji yolu bulunmaktadır. Karbon yakalama ve depolama ile fosil yakıt üretimine veya yenilenebilir enerji dağıtımına daha fazla odaklanılabilir. Bu ikinci seçenek içinde bile, daha fazla rüzgar dağıtımı veya daha fazla güneş fotovoltaik, daha yüksek jeotermal oranları veya yoğunlaştırılmış güneş enerjisi seçenekleri bulunmaktadır. Bu seçenekler, mineraller için genel talebin mutlaka daha yüksek veya daha düşük seviyelerde olduğu anlamına gelmez, ancak farklı minerallere olan talebi ima eder. Bu belirsizlik, iki farklı kaynaktan gelen senaryoların dahil edilmesiyle kısmen yakalanmıştır: IEA ve IRENA. IEA senaryoları karbon yakalama ve depolama için daha büyük bir rol görürken, IRENA senaryoları daha fazla yenilenebilir enerji dağıtımını görmektedir. Bu nedenle, bu farklı senaryo gruplarının sonuçlarını karşılaştırmak, bu belirsizliğin bir yönünü vurgular.

Yeni alt teknolojilerin ortaya çıkışıyla ilgili belirsizlik de modelde ele alınmamıştır. Bu unsurla ilgili belirsizliğin, özellikle katı hal Li-ion piller ve diğer akış pilleri (örneğin demir bazlı) gibi bir dizi yeni teknolojinin hızla ortaya çıktığı enerji depolama alanında, önümüzdeki on yıla kıyasla 2030 sonrasında çok daha büyük olması muhtemeldir ve termal elektrik ve mekanik depolamada yeni gelişmeler yaşanmaktadır. Bu teknolojilerin her biri farklı mineral bileşimlerine sahip olacaktır. Bu teknolojilerden hangisinin ortaya çıkacağını tahmin etmek imkansızdır ve bu da 2030 sonrasında hem depolama ölçeğinin hem de enerji depolamanın mineral bileşiminin oldukça belirsiz olduğu anlamına gelir. Bu, yalnızca mineral talebinin miktarı konusunda değil, aynı zamanda gerçek mineraller konusunda da belirsizlik yaratır

düşük karbon geçişi için ihtiyaç duyulacak olan kendileri. Bu farklı talep riskleri, raporda bir talep risk matrisi aracılığıyla ele alınmaktadır.

Bu yeni ortaya çıkan depolama teknolojilerinden bazılarını da içeren bir dizi yeni ortaya çıkan teknolojiye kaynaklanan mineral talebi üzerindeki potansiyel etkiler, Bölüm 3'teki Ortaya Çıkan Enerji Teknolojileri bölümünde tartışılmaktadır. Belirsizlik aralıkları hakkında ek bilgi için lütfen Ek B'ye bakın.





Minerallerin Rolü Temiz Enerji Geçişinde

Yenilenebilir enerjinin enerji sektörüne nüfuz etmesi, düşük karbonlu bir geleceğe ulaşmak için kritik önem taşıyacaktır. Enerji sektörü bugün dünya çapında karbon emisyonlarının %41'ini veya 13,6 GtCO₂'yi (IEA 2019a) oluşturmaktadır ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde küresel nüfus arttıkça ve bu yeni talep nedeniyle enerji tüketimi arttıkça daha da artması beklenmektedir.¹³ Güneş PV ve kara rüzgarı gibi temiz enerji teknolojilerinden yenilenebilir enerji maliyetleri 2018'de sırasıyla 0,08/kWh ve 0,05/kWh (IRENA 2019d) seviyesinde hızla düşerken, bu teknolojilerin elektrik üretiminin karbondan arındırılmasında önemli bir rol oynaması bekleniyor. Ancak, 2°C veya daha düşük bir yola ulaşmak için gereken bu düşük karbonlu teknolojilerin hızla devreye alınması, bu teknolojileri üretmek için gereken minerallere olan talebin de artacağı anlamına gelecektir.

Artan mineral talebinin etkileri birden fazla bakış açısıyla incelenebilir. Bir yandan, artan çıkarma ve işleme faaliyetleri *olabilir* ciddi çevresel ve sosyal etkileri vardır. Bu faaliyetler, yenilenebilir enerjinin artan dağıtımından kaynaklanan bu yeni talebi karşılamak için sorumlu bir şekilde yönetilmiyor. Bugün itibarıyla madencilik sektörü, toplam küresel enerji tüketiminin yaklaşık %2-11'ini oluşturuyor (Guilbaud 2016; CCSI 2018), en büyük altı madencilik şirketinin madencilik operasyonlarının %70'i ise su sıkıntısı çeken ülkelerde bulunuyor (IFC ve ICCM 2017). Öte yandan, bu "stratejik" minerallere olan yeni talep, kaynak açısından zengin gelişmekte olan ülkeler için de yeni fırsatlar sağlayabilir ve temiz enerji geçişine anlamlı bir şekilde katkıda bulunmalarını sağlayabilir.

İklim dostu madencilik (Dünya Bankası 2019) uygulamalarının benimsenmesi, madencilik sektörünün mevcut uygulamalarını, yenilik ve alt akış şirketleri ve sivil toplum örgütleriyle yeni ortaklıklar yoluyla, genel sektörün karbon ve çevresel ayak izlerini daha da azaltmak için dönüştürmesini sağlayacaktır. Uyum önlemlerinin sağlanması (örneğin, su verimliliği) ve tuzdan arındırmanın dahil edilmesi, topluluklarla ilişkileri iyileştirirken operasyonel bağımsızlığa katkıda bulunabilir (Campero ve Harris 2019). Örneğin, yenilenebilir enerjiyi madencilik operasyonlarına entegre etmek ve enerji verimliliği önlemlerini kullanmak, minerallerin ezilmesi ve öğütülmesinde toplam enerji kullanımının en az yüzde 40'ını azaltabilir (Avustralya 2018). Çeşitli mineraller için talep tahminleri sağlamak, çeşitli düşük karbon yollarının etkilerini gösterebilir ve elektrik üretiminin karbondan arındırılmasının sera gazı (GHG) emisyonlarını elektrik üretiminden yukarı akışa (çıkarma ve işleme) ve EOL (enerji teknolojilerinin bertarafı) faaliyetlerine kaydırmamasını sağlamak için bir çerçeve sağladığı için üstlenilmesi gereken önemli bir uygulamadır.

Bu analiz, politika yapıcılara, özel sektör kuruluşlarına ve sivil toplum örgütlerine bütünsel bir yaklaşımla düşük karbonlu geçişi desteklemek için mevcut en son bilgileri sağlamak üzere temiz enerji teknolojisi başına (alt teknolojileri dahil) ihtiyaç duyulabilecek mineral miktarını tahmin eder. Bu, IEA ve IRENA'dan altı teknoloji tabanlı azaltma senaryosu altında geri dönüşümün rolünü hesaba katarak potansiyel mineral talebini tahmin etmeyi içerir. *olabilir* Bu yeni mineral talebini karşılamada. Ne olacağını tahmin etmeyi amaçlamıyor, bunun yerine gelecekteki küresel enerji sistemini ve farklı politika seçimlerinin ve teknoloji iyileştirmelerinin 2050'ye kadar genel mineral talebini nasıl etkileyebileceğini keşfetmek için bir dizi senaryo sağlıyor. Malzeme kullanım yoğunluğu ve artan çevresel ve sosyal etkilerle ilişkisi konusundaki endişeleri ele almamak, bu teknolojilerden bazılarının geleneksel olanlara kıyasla uygunluğunu sorgulayacak bir tepkiye neden olabilir (Bloomberg 2019; Wade 2016).

13 Bu bağlamda enerji sektörü yalnızca elektrik ve ısı üretimini ifade eder. Bu kategori, IEA web sitesinde sektöre göre daha ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Yenilenebilir Enerji ve Depolama Tahmini

Yenilenebilir enerji, kurulu elektrik üretim kapasitesinin en hızlı büyüyen kaynaklarından biri olmuştur ve 2008'de 1.058 GW'tan 2018'de 2.179 GW'a çıkmıştır (IRENA 2018). Bu durum büyük ölçüde hükümet politikaları, düzenlemeler ve teşvikler tarafından enerji sektörünün karbondan arındırılması ve değişen iklimin olumsuz etkilerinin sınırlandırılması yoluyla yönlendirilmiştir. Talep tarafındaki müdahaleler, ölçek ekonomileri ve arz tarafındaki teknolojik gelişmeler, yenilenebilir enerjinin fosil yakıt bazlı teknolojilerle rekabet edebilmesini sağlamıştır. Örneğin, bazı ülkeler yenilenebilir enerji büyümesini desteklemek için destek programlarından (örneğin, besleme tarifeleri veya FIT'ler) uzun vadeli güç satın alma anlaşmaları için rekabetçi açık artırmalara geçiş yapmaya başlamıştır (IEA 2019d, 154).

Politika seçimleri, teknoloji iyileştirmeleri ve bu son fiyatlandırma eğilimleri bir araya geldiğinde, yenilenebilir enerjinin küresel elektrik karışımındaki büyümesinin kalıcı olduğunu ve yenilenebilir enerji ve depolama tahminlerinin bu raporun 2050'ye kadar mineral talebini tahmin etme analizinde merkezi bir nokta haline geldiğini gösteriyor. Elektrik üretimi ve pil depolama için IEA ve IRENA senaryoları, bu senaryolardaki alt teknoloji payları da dahil olmak üzere, modeldeki enerji teknolojisi kapsamını da vurguluyor ve minerallerin temiz enerji geçişindeki rolünü daha iyi anlamak için kullanılan temel girdileri açıklıyor.

Teknoloji Tabanlı Azaltma Senaryoları

Bu rapor büyük ölçüde IEA ve IRENA'ya dayandığından **teknoloji tabanlı azaltma senaryoları** 2050 yılına kadar tahmini mineral talebini türetmek için kullanılan her varsayım için bir referans noktası sağlamak amacıyla altı senaryo tekrar Tablo 2.1'de ele alınmıştır.

Tablo 2.1 IEA ve IRENA'dan Kısaltılmış Teknoloji Tabanlı Azaltma Senaryoları

Teknoloji tabanlı azaltma senaryoları			
Senaryo	Kaynak	Senaryo açıklaması	
1	4DS (Temel senaryo)	Uluslararası Enerji Ajansı	Temel senaryo Dünyanın mevcut yörüngede ilerlediği ve enerji sistemini fosil yakıt kaynaklarından uzaklaştırmada çok az ilerleme kaydettiği bir dönemde
2	RTS	Uluslararası Enerji Ajansı	Tüm ülkelerin Paris Anlaşması kapsamında NDC'lerini uygulayacağını ve bunun sonucunda ortalama sıcaklık artışının 2100 yılına kadar 2,7°C
3	2DS	Uluslararası Enerji Ajansı	Ortalama küresel sıcaklık artışını sınırlama olasılığının en az %50 olduğu senaryo 2100 yılına kadar 2°C
4	B2DS	Uluslararası Enerji Ajansı	Ortalama gelecekteki sıcaklık artışlarını %50 oranında sınırlama şansına sahip senaryo 2100 yılına kadar 1,75°C
5	Referans	IRENA	Mevcut/planlanan politikalar kapsamında yapılan eylemleri, taahhütleri, NDC'leri de dahil olmak üzere açıklar. Sıcaklıklardaki artış en azından 2100 yılına kadar 2,6°C
6	Yeniden haritalama	IRENA	Küresel sıcaklıktaki artışı "çok altında" sınırlayan iddialı senaryo 2100 yılına kadar sanayi öncesi seviyelerin 2°C üzerinde

Not: 2DS = 2 derece senaryosu, 4DS = 4 derece senaryosu, B2DS = 2 derecenin ötesinde senaryo, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı, IRENA = Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, NDC = Ulusal Olarak Belirlenen Katkı, Ref = referans senaryosu, REmap = yenilenebilir enerji yol haritası senaryosu.

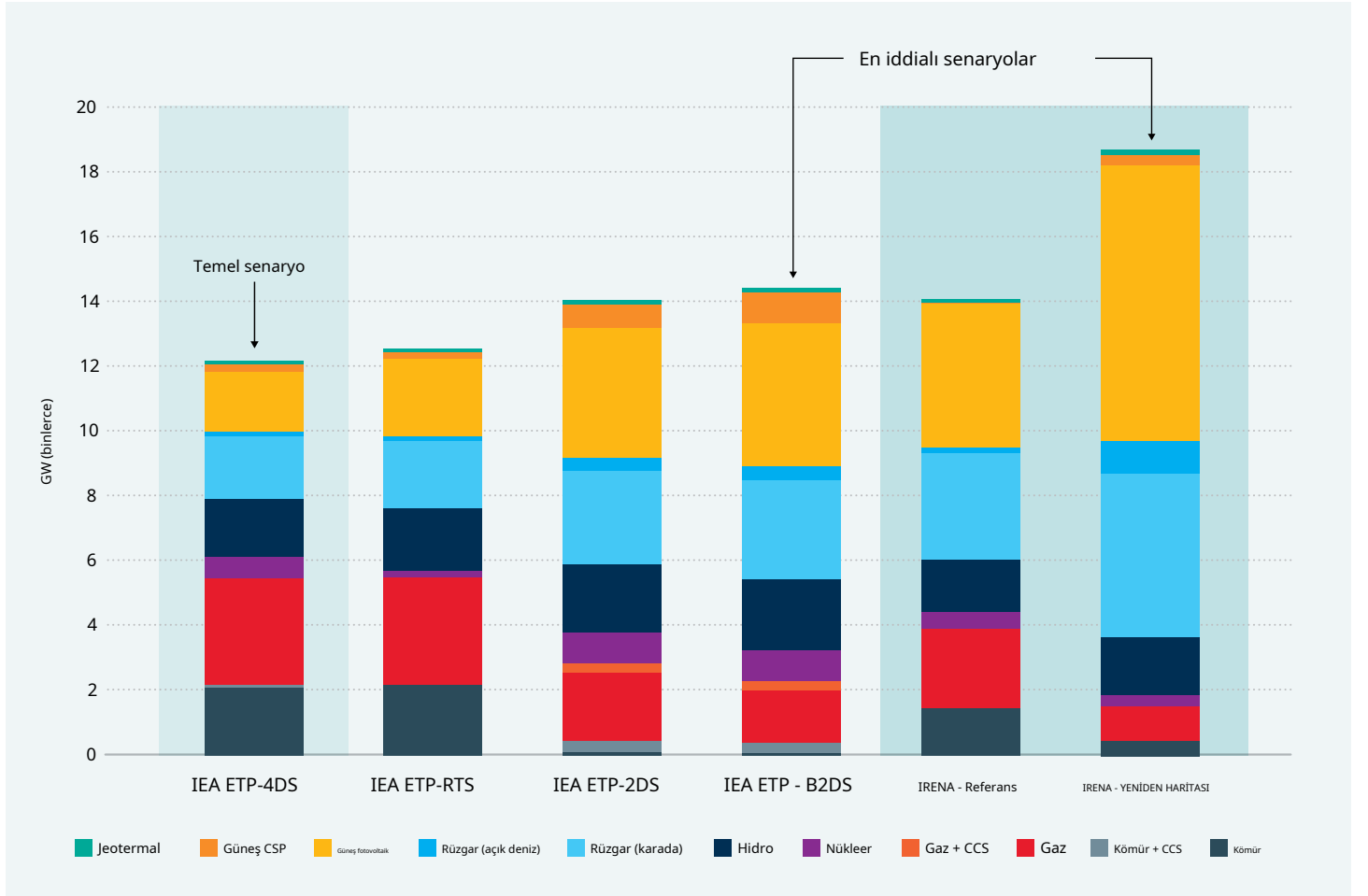
Elektrik Üretimi: 2050'de Kurulu Elektrik Kapasitesi

IEA ve IRENA, teknoloji tabanlı azaltma senaryolarında yenilenebilir enerji nüfuzuna ilişkin farklı varsayımlar kullanır. Örneğin, IRENA'nın 2050'ye kadar yenilenebilir elektrik nüfuzuna ilişkin REmap projeksiyonları, sırasıyla %64 ve %51 ile IEA'nın 2DS ve B2DS'sinden daha yüksektir. Bu farklılıklar, farklı küresel ekonomik büyüme varsayımları (IRENA yıllık %3,2'lik küresel GSYİH büyümesi varsayar; IEA %2,9 varsayar) ve farklı varsayımlar dahil olmak üzere bir dizi faktörden kaynaklanmaktadır.

Karbon yakalama ve depolama (CCS) gibi diğer düşük karbonlu teknolojilerin ortaya çıkışı hakkında.

Küresel enerji karışımında enerji teknolojisi penetrasyonunun türü, mineraller için önemlidir çünkü bunların ulaşım ve ulaşım ile ilgili olmayan enerji depolama ve yenilenebilir enerji teknolojilerini sağlaması gerekir. Şekil 2.1, gelecekte küresel elektrik üretiminde rol oynaması beklenen ilgili enerji teknolojilerine genel bir bakış sunar; ancak, mineral bileşimlerine ilişkin veri eksikliği nedeniyle üç teknoloji bu modelden hariç tutulmuştur: petrol, biyokütle ve gelgit.

Şekil 2.1 Teknoloji Tabanlı Azaltma Senaryolarında 2050'de Tahmini Kurulu Kapasite



Kaynak: IEA 2016, 2017; IRENA 2019a.

Not: 2DS = 2 derece senaryosu, 4DS = 4 derece senaryosu, B2DS = 2 derecenin ötesinde senaryo, CCS = karbon yakalama ve depolama, CSP = yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, ETP = Enerji Teknolojisi Perspektifleri, IRENA = Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, PV = fotovoltaik, Ref = referans senaryosu, REmap = yenilenebilir enerji yol haritası senaryosu.



Temel senaryoya (4DS) göre, kömür ve gaz, bazı CCS'lerle birlikte elektrik sektörüne hakim olurken, dünya iklim hedeflerinde giderek daha iddialı hale geldikçe geleneksel enerjinin payı giderek azalıyor. Temel senaryoda jeotermal diğer referans senaryolarına (RTS ve Ref) göre daha büyük bir rol oynadığı görülüyor, bunun başlıca nedeni diğer senaryolardan önce üretilmiş olması. Aradaki dönemde, güneş PV ve rüzgar gibi değişken yenilenebilir enerjinin maliyetleri ve bu teknolojileri şebekeye entegre etmenin maliyetleri, ikincisi kadar olmasa da, önemli ölçüde düştü. Bu, sonraki RTS ve Ref senaryolarında diğer yenilenebilir enerjilerin jeotermal enerjiden daha cazip hale geldiği anlamına geliyordu.

Temel senaryodan, model IEA'nın 2DS ve B2DS'sine doğru hareket ettiğinde ve RTS ve 4DS'den uzaklaştığında kömürde bir azalma gözlemleniyor. Kömür 2DS ve B2DS'de azalırken, gaz ve kömür için CCS'nin payı elektrik karışımında görünmeye başlıyor, çok küçük bir pay olsa da, IRENA senaryosunda bu teknolojilerin gerçekleşmesi beklenmiyor.

Yenilenebilir enerji kaynakları (özellikle güneş PV ve rüzgar) aynı IEA senaryoları altında önemli ölçüde artıyor, ancak yine IRENA modelleri, hidroelektrik ve nükleer enerji gibi diğer emisyonuz kaynaklardan gelen katkıların arttığını varsayan IEA modellerinden çok daha yüksek bir nüfuz oranı varsayıyor. IRENA Ref senaryosu, IEA 2DS ve B2DS'den daha yüksek rüzgar nüfuz oranlarına sahip. Önemli çıkarımlardan biri şu: senaryo ne kadar iddialıysa, hem IEA hem de IRENA senaryoları için yenilenebilir enerjinin elektrik karışımındaki nüfuz oranı o kadar yüksek.



Enerji Depolama Projeksiyonları

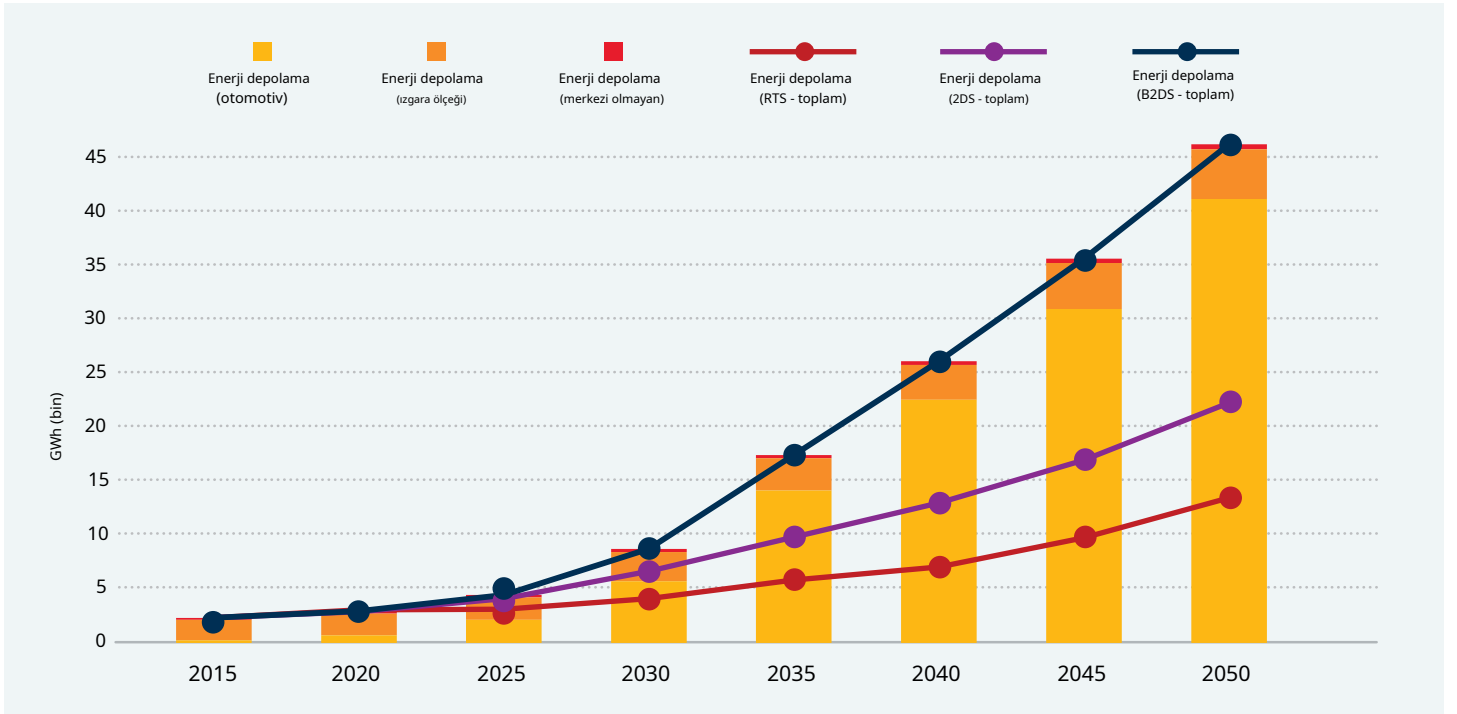
Elektrik üretiminin aksine, enerji depolama teknolojisi için mineral talebi tahminleri yalnızca IEA'dan türetilmiştir. IRENA senaryoları kapsamındaki enerji depolama verileri mevcut olmadığından. IEA 4DS (temel senaryo) ayrıca enerji depolamanın elektrik karışımına nüfuz etmesini içermez. 2050'ye kadar olan enerji depolama tahminleri, IEA tarafından 2040 ve 2060'a kadar otomotiv ve ulaşım ile ilgili olmayan enerji depolaması için sağlanan enerji depolama gereksinimlerine ilişkin verilerden ekstrapole edilmiştir. 2040 ve 2060'taki depolama gereksinimlerinin ortalaması alınarak 2050'de gereken depolamanın tahmini elde edilmiş ve ardından depolama sektörünün diğer temel yönlerine ilişkin çok çeşitli kaynaklardan alınan verilerle birleştirilmiştir.

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, üç IEA senaryosu da enerji depolamaya yönelik göreceli talebin, özellikle de

ulaşım için enerji depolamaya yönelik talebin 2050 yılına kadar önemli ölçüde artması bekleniyor. Örneğin 2DS'de depolama talebi 2025'te 4.108 gigawatt-saatten (GWh) 2050'de 22.270 GWh'ye çıkıyor. Enerji depolama teknolojisine olan talep, her senaryo iklim hedefinde artış gösterdikçe katlanarak artıyor ve 2050'de RTS'den (açık kırmızı) B2DS'ye (koyu mavi) 32.792 GWh fark oluşuyor.

Enerji depolama pazarının nüfuziyeti, ulaşım (elektrikli ve hibrit araçları kapsayan) ve ulaşım dışı (elektrik üretiminden depolamayı kapsayan) arasında bölünmüştür; ikincisi ise şebeke ölçeğinde (şebeke voltajının düzenlenmesi ve yenilenebilir enerji gibi aralıklı elektrik üretiminden depolama) ve merkezi olmayan (bireysel, küçük ölçekli yenilenebilir enerji tesislerinden depolama) arasında bölünmüştür. Redoxflow piller yalnızca şebeke ölçeğinde uygulamalarda kullanılır.

Şekil 2.2 2050'ye Kadar Enerji Depolamada Beklenen Büyüme



Kaynak: IEA ETP 2017'ye dayanmaktadır.

Not: 2DS = 2 derecelik senaryo, B2DS = 2 derecenin ötesindeki senaryo, GWh = gigawatt-saat, RTS = referans teknoloji senaryosu.



Mineral Yoğunluğu Temiz Enerji Teknolojileri

Temiz enerji geçişinin fosil yakıt bazlı elektrik üretiminden çok daha fazla mineral yoğun olması bekleniyor. Mineral talebinin yenilenebilir enerji ve depolama teknolojilerini tedarik etmek için küresel olarak ne ölçüde artacağını anlamak önemlidir. Tablo 3.1, bu analizde ele alınan minerallere ve teknoloji tabanlı azaltma senaryolarında tanımlanan her teknolojiyle olan alakalarına genel bir bakış sağlar.

Bakır, alüminyum, krom, manganez, molibden ve nikel, düşük karbonlu bir geleceğin gerçekleştirilmesi için kritik unsurlar haline gelen bir dizi düşük karbonlu teknoloji için gereklidir. Teknoloji tabanlı azaltma senaryolarında bulunan ilgili minerallerin enerji teknolojilerine eşlenmesi, yalnızca belirli elektrik üretimi ve enerji depolama teknolojilerine odaklandığı için hiçbir şekilde kapsamlı bir liste değildir ve bir dizi başka minerale de ihtiyaç duyulmaktadır, ancak veri kısıtlamaları nedeniyle modele dahil edilmemiştir.

Bu mineraller, doğrudan tahrikli rüzgar türbinleri için disprozyum; çeşitli tipteki güneş PV panelleri için kadmiyum, tellür, selenyum ve galyum; ve diğer enerji depolama formlarında (3. bölümdeki Ortaya Çıkan Enerji Teknolojileri bölümünde tartışılan yakıt hücreleri gibi) platin içerir, ancak bunlarla sınırlı değildir. Ancak bu minerallerin bu analizden hariç tutulması, bunların bireysel teknolojiler için kritik olmaması veya düşük karbon geçişi hakkında bir yorum olarak yorumlanmamalıdır. Bazı teknolojiler, rüzgar türbinlerinin motorlarında karbon fırçaların kullanımı gibi bileşenlerde az miktarda mineral de kullanabilir; ancak, bu tür bir kullanım hakkında hiçbir veri mevcut değildi ve bu nedenle bunlar modelden hariç tutuldu.

1. bölümde belirtildiği gibi, düşük karbonlu bir geçişi desteklemek için gereken yeni altyapı ele alınmadı ve platinin kilit rol oynayacağı hidrojen bazlı araçlar gibi diğer temiz enerji seçenekleri de ele alınmadı. Bugün elektrik erişimi olmayan yaklaşık 840 milyon insanı bağlama ve önümüzdeki 10 yıl içinde hizmete girmesi beklenen 135 milyon elektrikli aracı elektrikleştirmek için motor ve şasi inşa etme ihtiyacı

Ulaştırma sektörünün karbonunu azaltmak (IEA 2019b) bu analizde ele alınmamış yeni enerji altyapısı örnekleridir. Ek olarak, bu düşük karbonlu teknolojileri kurmak için gereken malzemeler, örneğin rüzgar türbinlerinin kurulumunu sabitlemek için kullanılan çimento, bu analizde ele alınmamıştır.

Tablo 3.1 İlgili Düşük Karbon Teknolojileriyle Minerallerin Haritalanması

	Rüzgâr	Güneş fotovoltaik	Konsantre güneş enerjisi	Hidro	Jeotermal	Enerji Depolama	Nükleer	Kömür	Gaz	Karbon yakalama ve depolama
Alüminyum	1	1				1	1	1	1	
Krom				1	1	1	1	1	1	1
Kobalt						1		1	1	1
Bakır	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Grafit						1				
İndiyum		1					1			
Ütü	1					1				
Yol göstermek		1		1		1	1			
Lityum						1				
Manganez	1			1	1	1		1	1	1
Molibden	1	1		1	1		1	1	1	1
Neodimyum	1									
Nikel	1	1		1	1	1	1	1	1	1
Gümüş		1	1				1			
Titanyum				1	1		1	1	1	1
Vanadyum						1	1	1	1	1
Çinko	1	1		1		1	1			
Toplam	10	8	2	8	6	11	11	9	8	6

Güneş Fotovoltaik

Güneş fotovoltaik (PV), 2018'de 485 GW'a ulaşan kurulu kapasiteyle (IRENA 2019b) küresel olarak en hızlı konuşlandırılan yenilenebilir enerji teknolojisi olmuştur ve 2017 ile 2018 arasında büyümede diğer tüm teknolojileri geride bırakarak %24 oranında büyümüştür. Yüksek öğrenme oranı, Güneş fotovoltaiklerinin (yüzde 22-40) maliyetlerde önemli düşüşler sağlanmış olup, küresel ağırlıklı ortalama dengelenmiş enerji maliyeti (LCOE) 2010 ile 2018 yılları arasında yüzde 77 oranında düşmüştür (IRENA 2019c) ve bu da onu dünya çapında yenilenebilir enerji yatırımcıları için en cazip teknolojilerden biri haline getirmiştir.

Bu eğilim, Afrika, Asya ve Avrupa'da 2050 yılına kadar güneş PV kurulu gücünün 8.519 GW'a (IRENA 2019c) ulaşmasının beklenmesiyle yansıtılabilir; bu ülkelerde teknolojinin fosil yakıt teknolojileriyle fiyat eşitliğine ulaşması bekleniyor. Örneğin, güneş PV'nin Afrika'daki göreceli büyümesinin IEA'nın *Dünya Enerji Görünümü 2019* Bölgedeki güneş PV dağıtımlarının 2018 ile 2040 yılları arasında yüzde 3.000'den fazla artacağı öngörülmüyor. 2050 yılına kadar güneş PV dağıtımlarının çoğunun OECD dışındaki ülkelerde, özellikle Çin ve Hindistan'da gerçekleşmesi bekleniyor.

Bu analizde yaygın olarak kullanılan dört güneş PV alt teknolojisi temsil edilmektedir:

- 1. Kristalin silisyum (kristal Si)** hücreler mevcut pazarın yaklaşık %85'ini oluşturur. Bunlar tek kristalli, polikristalin veya amorf silikon olarak üretilebilir.
- 2. Bakır indiyum galyum selenür (CIGS)** "ince film" güneş teknolojisidir. Kristal Si'den daha ince hücrelere dönüştürülebilir, bu da esnek hücrelere izin verirken malzeme ve üretim maliyetlerini azaltabilir.
- 3. Kadmiyum tellür (CdTe)** başka bir ince film teknolojisidir. Kristal Si ile maliyet açısından rekabet edebilir ve iyi bir verimliliğe sahiptir. Ancak, kadmiyumun toksisitesi ve tellüryumun gelecekteki arzı bu teknolojinin geleceğini belirsiz hale getirir.
- 4. Amorf silisyum (amorf Si)** güneş hücreleri son ince film teknolojisidir. Kristal Si'den daha düşük performansla sahiptirler ancak esnek malzemeler üzerine basılabilirler.

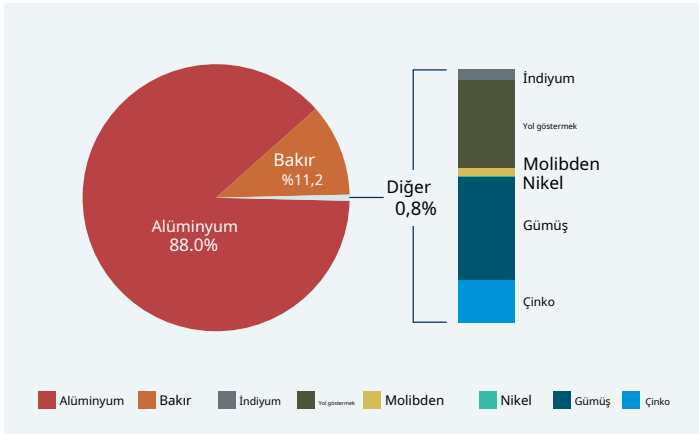






Güneş PV teknolojileri temel olarak alüminyum, bakır ve gümüşten oluşur - çeşitli mineraller de farklı teknolojilerin her birinde rol oynar, bunlardan bazıları bu analize dahil edilmiştir, örneğin CIGS'deki indiyum ve bazıları dahil edilmemiştir, örneğin CdTe için kadmiyum. Şekil 3.1, 2050'ye kadar güneş PV'yi sağlamak için kullanılan ana mineral talebini göstermektedir. Alüminyum, panellerin çerçeveleri için kullanılan çoğu güneş PV bileşeninin yüzde 85'inden fazlasını oluşturur ve bakır yaklaşık yüzde 11 ile onu takip eder. Gümüş, bir 2DS'de mineral bileşiminin daha küçük bir payını oluştururken, yüzde 0,05'ten az, dünya çapında güneş PV'nin hızla konuşlandırılması nedeniyle 2015'te toplam gümüş talebinin yaklaşık yüzde 7'sini oluşturuyordu (Sanderson 2016).

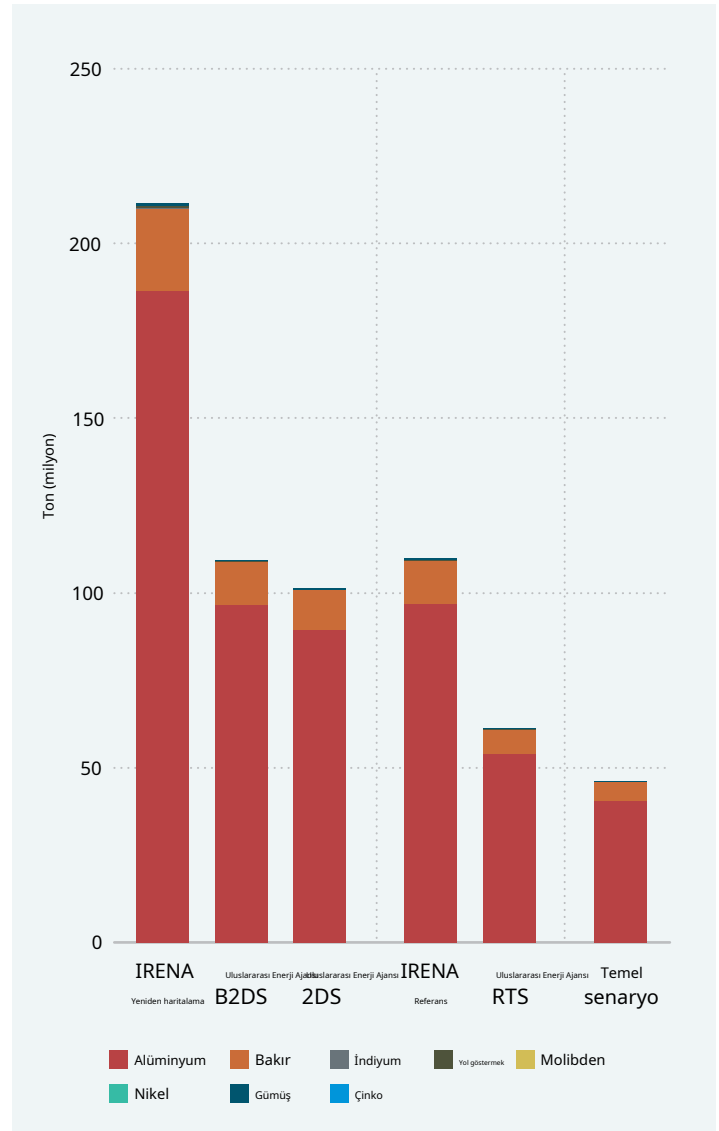
Şekil 3.1 IEA 2DS'ye Göre 2050'ye Kadar Güneş Fotovoltaiklerinden Kaynaklanan Mineral Talebinin Payı



Not: 2DS = 2 derece senaryosu, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı.

Senaryolar arasında, IRENA'nın REmap senaryosu, 2050 yılına kadar 160 milyon ton alüminyum ve 20 milyon ton bakır ihtiyacı nedeniyle, daha yüksek kurulu güneş PV kapasitesi nedeniyle açık ara en maddi olarak yoğun olanıdır (Şekil 3.2). Temel senaryoya karşılaştırıldığında, her iki minerale olan talep %350'den fazla artmaktadır.

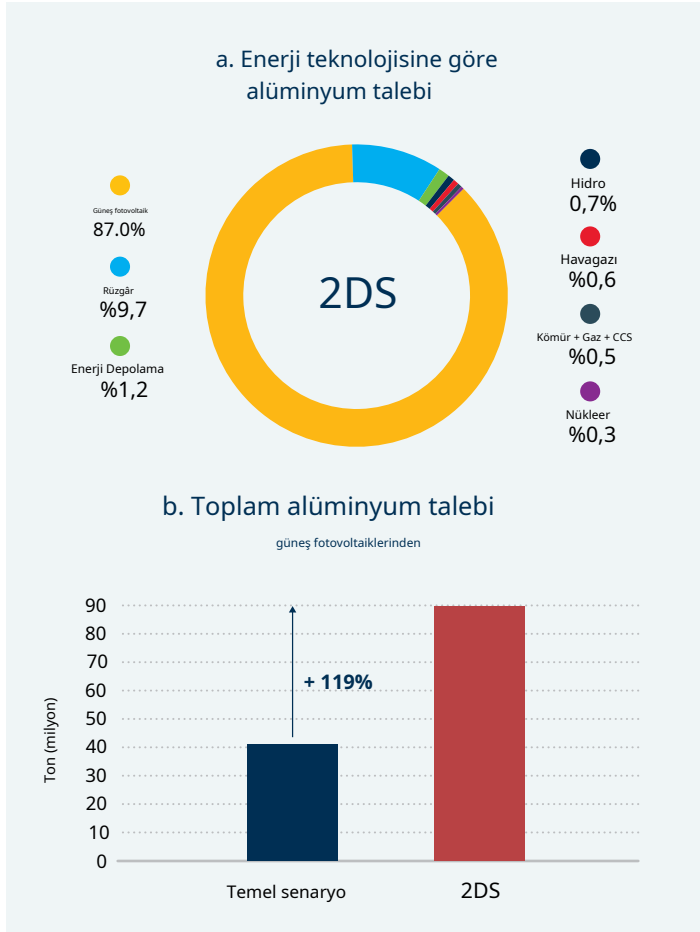
Şekil 3.2 2050'ye Kadar Güneş Fotovoltaikleri İçin Gerekli Minerallere Yönelik Toplam Talep



Not: 2DS = 2 derecelik senaryo, B2DS = 2 derecenin ötesinde senaryo, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı, IRENA = Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, Ref = referans senaryo, REmap = yenilenebilir enerji yol haritası senaryosu, RTS = referans teknoloji senaryosu.

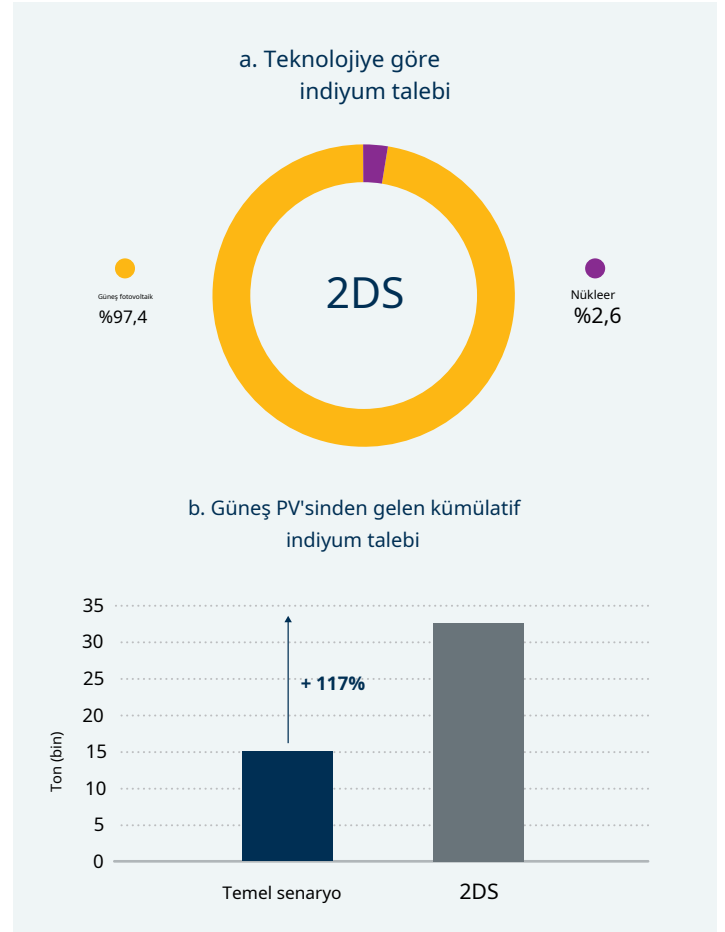
Alüminyum, güneş PV teknolojilerine önemli bir katkıda bulunurken, rüzgar, enerji depolama ve hidroelektrik gibi diğer düşük karbonlu teknolojilerin çoğunda da kullanılır. Şekil 3.3, alüminyuma olan talebin büyük çoğunluğunun hem hücrelerin kendisinde hem de çerçeve ve eklerde kullanılan güneş PV'sine bağlı olduğunu göstermektedir. En büyük kullanımı, 2050 yılına kadar güneş pazarının en büyük payını temsil ettiği varsayılan kristal-Si hücreleriyle dir. İklim değişikliğiyle mücadele konusunda daha büyük hırs, güneş PV'sinin daha fazla nüfuz etmesi ve dolayısıyla alüminyuma olan talebin artmasıyla ilişkilidir - 2DS'de alüminyuma olan kümülatif talep, temel senaryoya göre %119 daha fazladır.

Şekil 3.3 2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam Alüminyum Talebi (2DS, Temel Senaryo)



İndiyum, neredeyse yalnızca güneş PV için kullanılan bir diğer kritik elementtir. Şekil 3.4, teknolojiye göre indiyuma olan kümülatif talebi göstermektedir. İndiyumun büyük çoğunluğu (%97) güneş PV'de, ağırlıklı olarak CIGS güneş hücrelerinde kullanılırken, kalan %3 nükleer enerjide kullanılır. Güneş PV'deki göreceli pay küçüktür ancak önemli bir güneş PV alt teknolojisi türü olan ince film için kritiktir. Mevcut literatür bu alt teknolojinin büyümesini beklemektedir ve modelde, üç ince film alt teknolojisinin (CIGS, CdTe ve amorf silikon) güneş panellerinin %20'sinden %50'sine çıkacağı varsayılmaktadır.

Şekil 3.4 2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam İndiyum Talebi (2DS, Temel Senaryo)



Güneş PV Alt Teknolojilerindeki Karşılıklı Tavizler

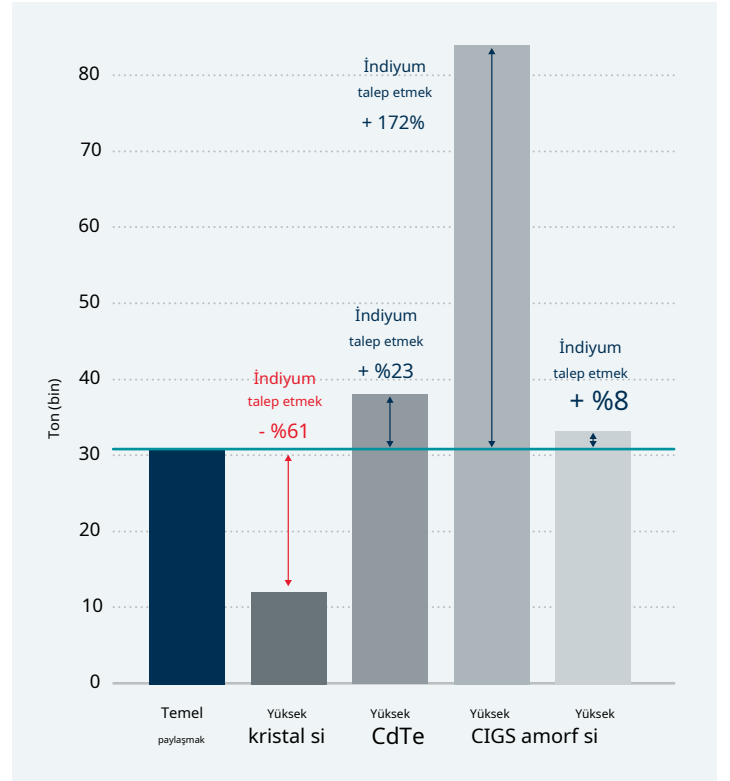
2050 yılına kadar hangi alt teknolojilerin en çok kullanılacağına bağlı olarak güneş PV teknolojilerinden kaynaklanan mineral talebinde bazı tavizler vardır. Güneş PV hücreleri inşa etmek için kullanılan her teknolojinin kendine özgü avantajları ve dezavantajlarının yanı sıra farklı mineral içerikleri de vardır.

İndiyum, alt teknolojilerdeki güneş PV pazar payındaki potansiyel değişikliklerden en çok etkilenen olduğundan, Şekil 3.5, çeşitli sonuçlara bağlı olarak indiyum talebinin nasıl artabileceğini veya azalabileceğini göstermektedir. Tablo 3.2, indiyum talebinin nasıl değişeceğini göstermek için farklı alt teknolojilerin taban payına göre penetrasyonunu parçalara ayırmaktadır.

Temel paylaşım senaryosunda, kristal Si'nin payı kullanımda azalırken diğer üç yeni ortaya çıkan teknolojiye gelen payda kademeli artışlar olur. Yüksek kristal Si senaryosu, alt teknolojinin payını 2017 seviyelerinde tutarken, diğer üç alt teknoloji için statik paylar vardır. Yüksek CdTe, CIGS ve amorf Si senaryolarında, ilgili teknolojiler 2050 yılına kadar pazarın yarısına ulaşırken, kristal Si'nin önemi azalır ve diğer iki alt teknoloji için küçük artışlar olur.

İndiyum, güneş PV'deki alt teknoloji pazar payındaki değişikliklerden etkilenen temel mineraldir; silisyum, galyum ve tellür gibi mineraller de etkilenecektir, ancak bunlar modele dahil edilmemiştir. İndiyum talebi, Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, yüksek CIGS senaryosunda en yüksek ve yüksek kristal Si senaryosunda en düşüktür. Bu değişiklikler potansiyel olarak önemlidir, CIGS penetrasyonu en yüksek olduğunda, indiyum talebi temel paya kıyasla %170'ten fazla artar. Buna karşılık, kristal Si baskın alt teknoloji olmaya devam ederse, indiyum talebi temel pay senaryosuna göre %60'tan fazla daha düşük olacaktır.

Şekil 3.5 2050'ye Kadar 2DS Altında Güneş PV Alt Teknolojilerinden İndiyuma Yönelik Toplam Talep, Temel Pay ile Karşılaştırıldığında



Not: 2DS = 2 derece senaryo, amorf Si = amorf silisyum, CdTe = kadmiyum tellür, CIGS = bakır indiyum galyum selenid, kristal Si = kristalin silisyum, PV = fotovoltaik.

Tablo 3.2 2DS Altında Güneş PV Pazarında Alt Teknoloji Penetrasyonunun Payı, Baz Paya Göre

2050 paylaşımı	Kristal Si	CdTe	SİGARALAR	Amorf Si
Temel pay (2DS)	%50	16,7%	16,7%	16,7%
Yüksek pay: Kristal Si	%80	%6,7	%6,7	%6,7
Yüksek pay: CdTe	16,7%	%50	16,7%	16,7%
Yüksek pay: SİGARALAR	16,7%	16,7%	%50	16,7%
Yüksek pay: Amorf Si	16,7%	16,7%	16,7%	%50

Not: 2DS = 2 derece senaryo, amorf Si = amorf silisyum, CdTe = kadmiyum tellür, CIGS = bakır indiyum galyum selenid, kristal Si = kristalin silisyum, PV = fotovoltaik.





Rüzgâr

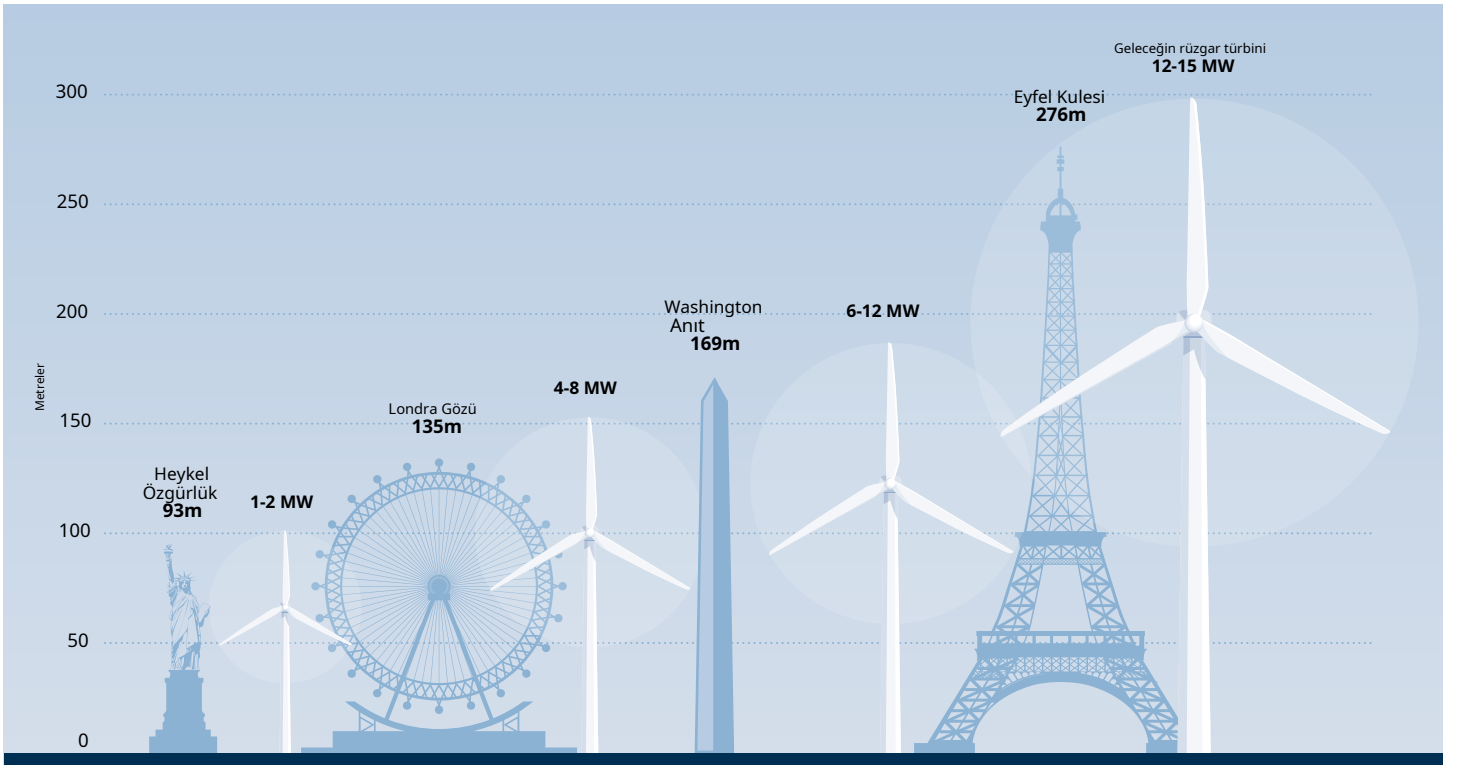
Güneş fotovoltaiklerine benzer şekilde, rüzgâr enerjisi de en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olmuştur ve kurulu kapasitesi 2018 yılında 566 GW'a ulaşmıştır (IEA 2019c). Rüzgâr türbini boyutundaki artışlar, daha yüksek verimlilik, daha düşük sermaye maliyeti ve ölçek ekonomileri, rüzgâr elektriği üretim fiyatlarını birçok alanda fosil yakıt üretimiyle rekabet edebilecek noktaya düşürmüştür ve Citibank'a göre "İtalya, İspanya, Birleşik Krallık ve Çin dahil olmak üzere birçok büyük pazardaki ortalama toptan elektrik fiyatına yaklaşmaktadır ve Brezilya'da zaten eşitliği yakalamış ve geçmiştir" (Savantidou vd. 2013). Karadaki rüzgâr maliyetleri gelişmiş pazarlarda sıklıkla megavat-saat başına 40 doların altındadır. Açık deniz rüzgârında daha da çarpıcı maliyet düşüşleri görülmüş ve 2015'te megavat-saat başına 150-200 dolar aralığından 2019 sonlarında Birleşik Krallık'ta megavat-saat başına 50 doların altına düşmüştür (ESMAP 2019).

IEA ve IRENA senaryolarına göre, kara rüzgârı büyümesinin büyük kısmının güçlü rüzgâr kaynakları ve tutarlı politika desteği olan gelişmekte olan pazarlarda gerçekleşmesi bekleniyor. Açık deniz rüzgârının önümüzdeki birkaç yıl içinde gelişmekte olan pazarlara geçmeden önce Avrupa ve Çin'deki mevcut ayak izini genişletmesi bekleniyor.

Dünya Bankası'nın yakın zamanda yaptığı bir araştırmaya göre, sadece sekiz gelişmekte olan pazarda 3,1 teravattan fazla açık deniz rüzgârı teknik potansiyeli tespit edildi.

Basitçe söylemek gerekirse, rüzgâr türbinleri rüzgârın kinetik enerjisini elektriğe dönüştürür. En büyük kara rüzgâr türbinleri artık 6 MW'lık tepe üretim kapasitesini aşıyor ve bu da Amerika Birleşik Devletleri'ndeki 5.000'den fazla eve güç sağlamaya yetiyor. En büyük açık deniz rüzgâr türbinleri bunun iki katı büyüklüğünde (12 MW) ve 107 metre uzunluğunda kanatlara sahip (aslında, bunlar insanların icat ettiği en büyük dönen makine parçalarıdır). Yeni nesil rüzgâr türbinlerinin yakında 15 MW'a veya hatta 20 MW'a kadar üretim kapasitesine ulaşması bekleniyor (AIP 2019).

Şekil 3.6 Rüzgâr Türbininin Evrimi



Çeşitli kaynaklardan uyarılan çizim (örneğin, https://www.researchgate.net/figure/Evolution-of-wind-turbine-size-and-output-Liebreich-2017_fig3_331249559; Power Technology, <https://www.power-technology.com/features/haliade-x-look-ges-supersized-new-wind-turbine/attachment/ge-infographic-1-haliade-x/>).

Kara ve deniz rüzgar türbinleri birçok ortak özelliğe sahiptir, ancak aynı zamanda hem türbinlerin kendisinde hem de tesisin dengesinde tasarım, teknoloji ve gerekli malzemeler açısından önemli farklılıklara sahiptirler. Deniz rüzgar türbinleri, karadaki benzerlerinden daha zorlu koşullarla karşılaşır ve bu nedenle korozyona, daha yüksek rüzgarlara ve aşırı hava koşullarına karşı daha dayanıklı olmaları gerekir.

Açık deniz rüzgar çiftlikleri ayrıca temellerinde (çoğunlukla çelik) ve elektriği karaya iletmek için gereken kablolamada (örneğin bakır) daha fazla malzeme girdisi gerektirir. Ancak açık deniz rüzgar çiftlikleri, karadaki benzerlerine göre daha fazla kapasite faktörü sunar (ESMAP 2019).

Modern kamusal ölçekli rüzgar türbinleri iki kategoriye ayrılabilir: dişli veya doğrudan tahrikli.

1. Dişli türbinler küresel kurulu kapasitenin yaklaşık %80'ini oluşturur.

Bu "Danimarka tasarımı" makineler, türbin rotorunun nispeten düşük dönüş hızını (12-18 rpm) bir jeneratöre giriş için çok daha yüksek bir hıza (1.500 rpm) dönüştürmek için bir dişli kutusu kullanır. Bu jeneratörlerin büyük çoğunluğu, önemli miktarda bakır ve demir kullanan çift beslemeli endüksiyon jeneratörleridir. Dişli türbinler, doğrudan tahrikli muadillerine kıyasla daha fazla sayıda hareketli parçaya sahip olmaları nedeniyle genellikle daha sık bakım gerektirmelerine rağmen, yüksek düzeyde güvenilirlikle çok düşük bir maliyet elde etmişlerdir.

2. Doğrudan tahrikli rüzgar türbinleri doğrudan rotora sabitlenmiş ve bu nedenle aynı hızda dönen jeneratörler içerir. Bazı modeller (örneğin, Goldwind tarafından üretilenler) neodimyum ve disprozyum gibi nadir toprak minerallerinden oluşan kalıcı mıknatıslı bir jeneratör kullanır. Diğer modeller (örneğin, Enercon tarafından üretilenler) önemli miktarda bakır kullanan elektrikle uyarılmış bir rotor kullanır. Doğrudan tahrikli türbinler başlangıçta megavat başına daha pahalı olma eğilimindedir, ancak bu, türbinin çalışması sırasında daha düşük bakımla telafi edilebilir.

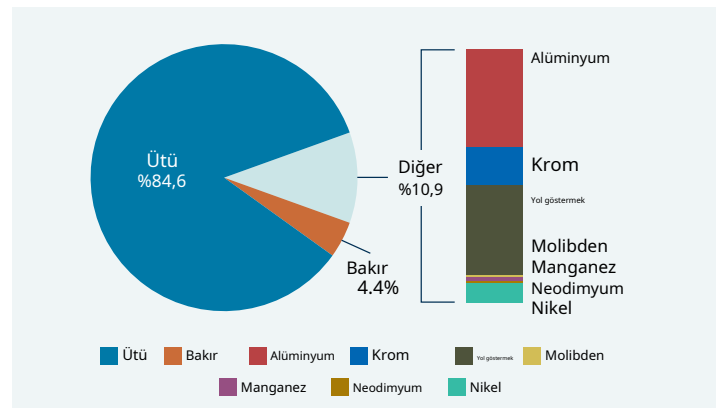
Genel olarak, dişli türbinler bakımın nispeten basit olduğu kara tesislerine hakim olma eğilimindedir. Tersine, doğrudan tahrikli türbinler bakımın çok daha zor olduğu açık deniz rüzgarı uygulamalarında tercih edilir. Bu alt teknolojilerin nasıl dağıtıldığı arasındaki fark

Kara ve deniz rüzgarının, modelin rüzgar teknolojilerinden mineral talebini nasıl tırettiği konusunda etkileri vardır.

Türbinlerin ana bileşenleri (kuleler, dökümler, nacelle, şaftlar vb.) öncelikli olarak çelikten oluşur. Kanatlar fiberglas, reçineler, balsa ağacı ve yapıstırıcıların bir bileşimidir (bazıları karbon fiber kullanır, ancak bu maliyeti önemli ölçüde artırır). Modern rüzgar türbinlerinin yüksekliği, tabanından kanat ucuna kadar 150 ila 250 metre arasında olabilir, neredeyse Eifel Kulesi'nin yüksekliğine eşittir. Çelik rakamları, olası çift sayım sorunları nedeniyle analizden hariç tutulmuştur ve analizde rüzgar türbinleri için gereken çelikte kullanılan krom gibi mineraller de dahil edilmiştir. Çelik, öncelikli olarak demir cevheri, karbon ve diğer elementlerin bir karışımı kullanılarak üretilir. Endüstriyel uygulamalar için gereken çeliğin türüne ve kalitesine bağlı olarak nikel, molibden, titanyum, manganez, vanadyum veya kobalt dahil olmak üzere diğer elementler de çelik üretiminde kullanılabilir.

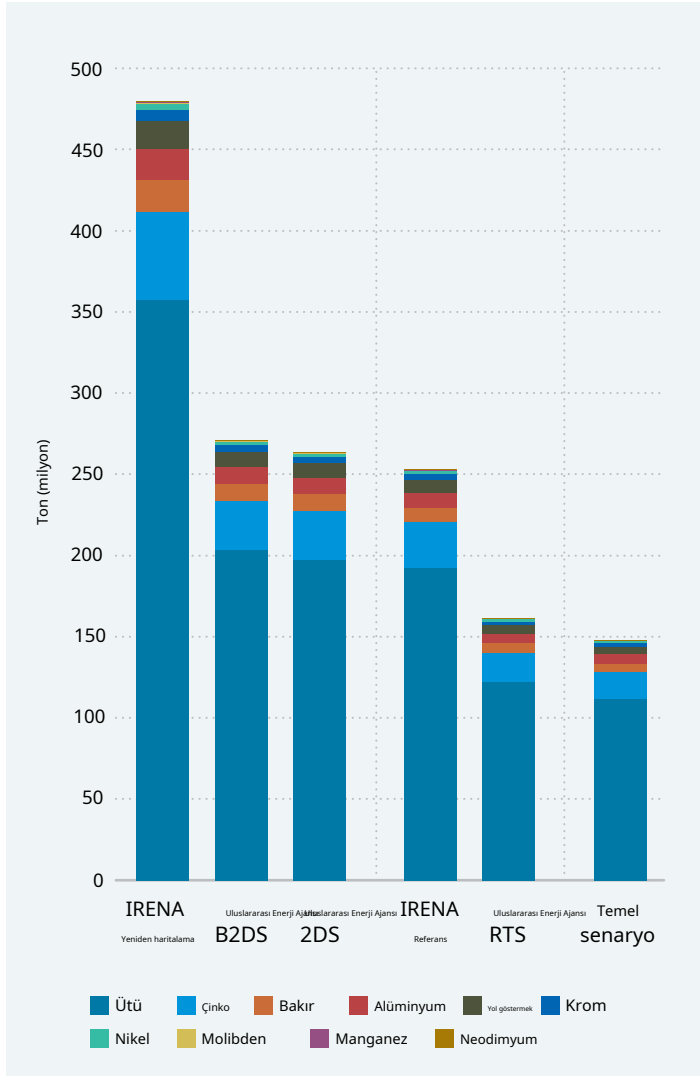
Şekil 3.7, 2050'ye kadar rüzgar tesislerini beslemek için kullanılan başlıca mineralleri göstermektedir; demir talebin %84,6'sını, bakır ise %4,4'ünü oluşturmaktadır. Burada bildirilen demirin, jeneratör çekirdeğinde, ana gövdede veya rotor göbeklerinde doğrudan türbinde kullanılan demir olduğunu unutmayın; çelik bileşenler için gereken demiri içermez. Diğer tüm mineraller bir araya geldiğinde, öncelikli olarak kalıcı mıknatıslar (neodimyum), dişli kutuları (nikel) veya kablolama (alüminyum) için talebin yaklaşık %11'ini temsil eder. Bu analize dahil olmayan mineraller arasında, kalıcı mıknatıslı doğrudan tahrikli türbinlerde kullanılan disprozyum bulunur.

Şekil 3.7 2050'ye Kadar IEA 2DS Kapsamında Rüzgardan Kaynaklanan Mineral Talebinin Payı



Not: 2DS = 2 derece senaryosu, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı.

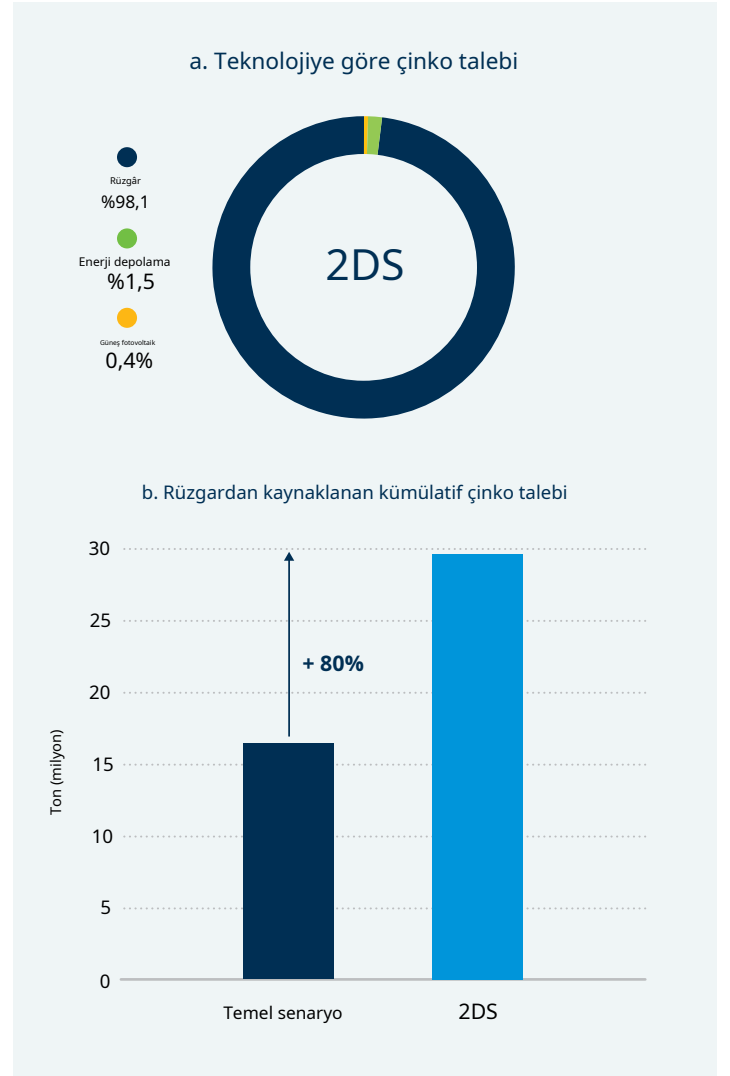
Şekil 3.8 2050'ye Kadar Rüzgar İçin Gerekli Minerallere Yönelik Toplam Talep



Not: 2DS = 2 derecelik senaryo, B2DS = 2 derecenin ötesinde senaryo, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı, IRENA = Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, Ref = referans senaryo, REmap = yenilenebilir enerji yol haritası senaryosu, RTS = referans teknoloji senaryosu.

Şekil 3.8'de görüldüğü gibi, bu minerallere yönelik en güçlü talep, IEA B2DS'den %78'lik bir artışı temsil eden IRENA REmap senaryosundan geliyor, çünkü IEA senaryolarına kıyasla daha yüksek bir kurulu rüzgar kapasitesi var. Teknoloji tabanlı azaltma senaryolarındaki mineraller arasındaki küçük farklılıklar, farklı mineral bileşimlerine sahip açık deniz ve kara rüzgarının biraz farklı karışımlarından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3.9 2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam Çinko Talebi (2DS, Temel Senaryo)



Not: 2DS = 2 derece senaryo, PV = fotovoltaik.

Çinko hariç, rüzgar türbinleri inşa etmek için kullanılan tüm mineraller diğer temiz enerji teknolojilerini inşa etmek için de gereklidir. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, enerji teknolojilerinden çinko talebinin %98,1'i rüzgar endüstrisinden gelmektedir, çünkü mineral ağırlıklı olarak rüzgar türbinlerini korozyondan korumak için kullanılmaktadır.

Rüzgar Alt Teknolojilerindeki Karşılıklı Tavizler

Güneş PV'ye benzer şekilde, hangi alt teknolojinin -dişli veya doğrudan tahrikli- en yaygın olarak konuşlandırıldığına bağlı olarak rüzgar için mineral talebinde de takaslar vardır. Şu anda, en yaygın olarak konuşlandırılan rüzgar teknolojisi, genellikle kara rüzgarı uygulamaları için kullanıldığı için dişlidir; doğrudan tahrik, daha düşük bakım gereksinimleri göz önüne alındığında, öncelikle açık deniz rüzgarının konuşlandırılması için hedeflenmiştir. Kara rüzgarı, tüm senaryolarda rüzgar enerjisi konuşlandırmasının çoğunluğunu oluştururken, açık deniz rüzgarının payının teknoloji iyileştirmeleri ve beklenen düşen maliyetlerle (LCOE) artması bekleniyor.

Sadece kalıcı mıknatıslı doğrudan tahrikli türbinlerde kullanılan neodim, bu teknolojiler arasındaki denge tarafından etkilenen önemli bir mineraldir. Dişli ve doğrudan tahrikli türbinler arasındaki dengedeki değişimlerin neodim talebini nasıl etkileyebileceğini vurgulamak için iki alternatif senaryo oluşturulmuştur.

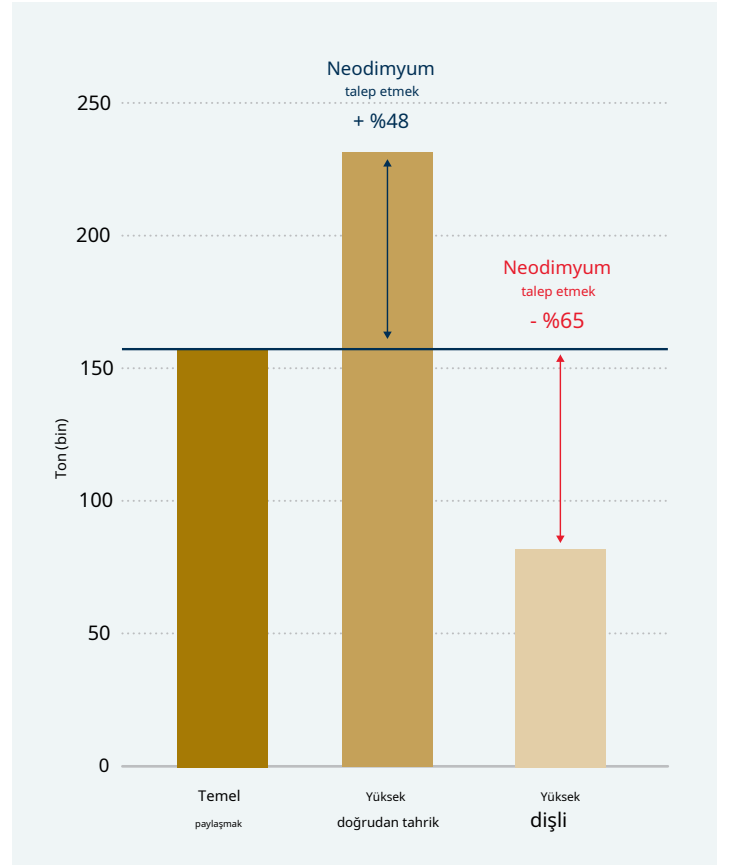
İlk senaryoda doğrudan tahrikli türbinlerin payı daha yüksektir.¹⁶ 2050 yılına kadar kara türbinlerinin %40'ına ve açık deniz türbinlerinin %90'ına yükselecek, bu oran karışık temel senaryoda %25 ve %75'ti. İkinci senaryoda dişli türbinlerin daha yüksek payı var, kara türbinlerinin %90'ını ve açık deniz türbinlerinin %40'ını oluşturuyor (tablo 3.3).

Neodimyum için en büyük talep, kümülatif talebin temel pay senaryosundan neredeyse yüzde 50 daha yüksek olduğu yüksek paylı doğrudan tahrik senaryosunda (bkz. şekil 3.10) gelir. Buna karşılık, yüksek paylı dişli senaryosunda neodimyum talebi temel pay senaryosundan yüzde 65 daha düşüktür.

Tablo 3.3 Rüzgar Pazarında Alt Teknoloji Penetrasyonunun Payı, Temel Paya Göre Karşılaştırıldı

2050 paylaşmak	Karada Dişli	Karada Doğrudan tahrik	Açık deniz Greared	Açık deniz Doğrudan tahrik
Temel pay (2DS)	%75	%25	%25	%75
Yüksek pay: Dişli	%90	%10	%40	%60
Yüksek pay: Doğrudan tahrik	%60	%40	%10	%90

Şekil 3.10 2050'ye Kadar 2DS Altında Temel Pay ile Karşılaştırıldığında Rüzgar Alt Teknolojilerinden Neodimyum Yönelik Toplam Talep



Not: 2DS = 2 derece senaryo.

16 Tüm doğrudan tahrikli türbinlerin kalıcı mıknatıslar kullanmadığı ve dolayısıyla neodimyum talep etmediği unutulmamalıdır. Doğrudan tahrikli türbinlerdeki neodimyum konsantrasyonuna ilişkin veriler literatürdeki çeşitli kaynaklardan alınmıştır ve merkezi bir nokta kullanılmıştır. Farklı doğrudan tahrikli türbinler arasındaki ikame, modelin kapsamının ötesinde bir çözünürlük ölçeğidir.

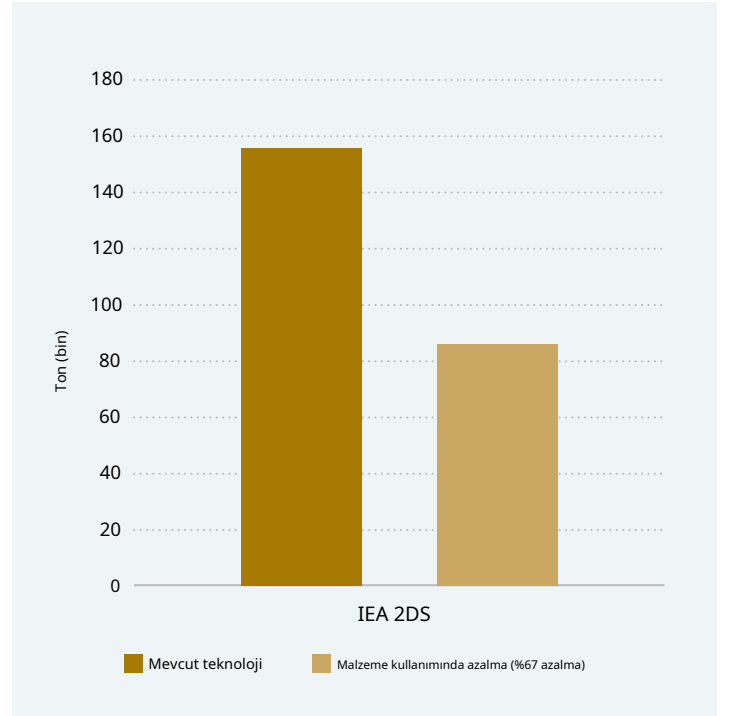


Rüzgar Türbinlerinde Malzeme Kullanımı İyileştirmeleri

Doğrudan tahrikli kara ve deniz rüzgar türbinlerindeki malzeme iyileştirmeleri, türbinlerde neodimyum kullanımında potansiyel verimlilik kazanımlarına yol açabilir. Bu tür iyileştirmeler şunları içerebilir: (1) alternatif tasarımlar (örneğin, hava çekirdekli eksenel akı) yoluyla kalıcı mıknatısların kullanımının azaltılması ve/veya (2) orta hızlı dişli kutusu ve kalıcı mıknatıs jeneratörü kullanan hibrit türbinlerin kullanımının artırılması.

Rüzgar türbinlerindeki malzemelerin azaltılmasından elde edilen verimlilik kazanımlarını tahmin etmek için, literatürdeki doğrudan tahrikli türbinlerde neodimyum kullanımı için en düşük rakamdan türetilen bir rakam olan 2DS kapsamında 2050'ye kadar %67 mineral azaltımı varsayılmıştır. Şekil 3.11'de belirtildiği gibi, eğer malzeme iyileştirmeleri yapılacaksa, neodimyumun kümülatif talebi, mevcut rüzgar teknolojisinin mevcut mineral bileşimine kıyasla %45 düşecektir.

Şekil 3.11 2050'ye Kadar 2DS Kapsamında Mevcut Teknoloji ve Malzeme Kullanım Azaltma Altında Rüzgar Teknolojilerinden Neodimyuma Yönelik Toplam Talep



Not: 2DS = 2 derece senaryosu, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı.



Jeotermal

Jeotermal enerji şu anda küresel elektrik üretim kapasitesinin yüzde 1'inden daha azını oluşturuyor (IEA 2019c) ve 20'den fazla ülkede aktif olarak kullanılıyor;¹⁷ ABD, 2018'de yaklaşık 2,5 GW ile dünyanın en büyük üreticisi konumunda.¹⁸ Jeotermal enerji, elektrik üretimi, doğrudan veya dolaylı kullanım veya eş üretim için kullanılabilir. Jeotermal enerjinin kullanımında sınırlamalar vardır çünkü elektrik yalnızca yüksek veya orta sıcaklıklara sahip yerlerde, genellikle tektonik olarak aktif bölgelere yakın yerlerde üretilebilir.¹⁹ Endonezya, İzlanda, Filipinler ve Yeni Zelanda gibi tektonik olarak aktif bölgelerdeki ülkeler, elektrik ihtiyaçlarını karşılamak için aktif olarak jeotermal kullanıyorlar. Endonezya, büyüyen enerji talebini karşılamak için bu kaynaktaki karşılaştırmalı avantajı göz önüne alındığında, yakın zamanda 2025 yılına kadar 7,2 GW jeotermal inşa etme planını duyurdu.²⁰

Jeotermal, sıvı, hapsolmuş buhar veya kaya olsun, yeryüzünün altında bulunan termal enerjiden elektrik üretir. Bu nedenle, jeotermal, elektrik üretimi için buhar ve sıcak su rezervuarlarını taşıyabilmek için çok yüksek kalitede çelik gerektirir. Örneğin, jeotermal santrallerde korozyona dayanıklı alaşımlar gereklidir ve titanyum ve molibden gibi mineraller gerekir. Bu minerallere olan talep, belirli jeotermal santrallerden, termal enerjiye erişmek için gereken kuyu sayısına ve derinliğine bağlı olarak konumdan konuma değişecektir.²¹

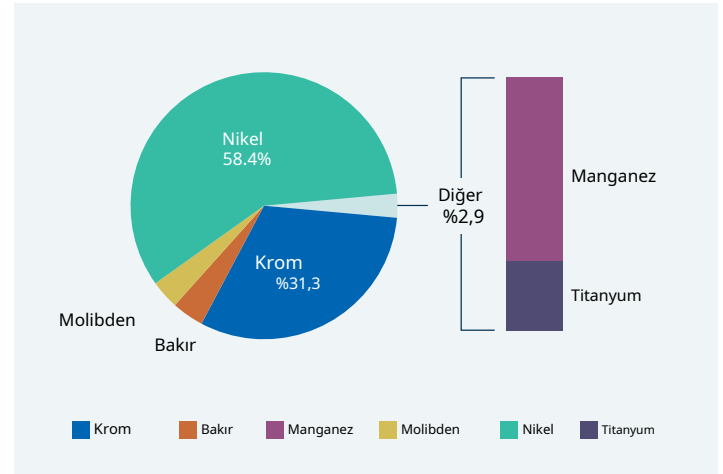
Jeotermal, rüzgardan nispeten daha fazla çelik kullanır, megavat kapasite başına yaklaşık 6-10 kat daha fazla. Rüzgarın aksine -ki bu da esas olarak nikel ve demir cevheri karışımından üretilen büyük miktarda çelik gerektirir- jeotermal, jeotermal güç üretimindeki yüksek ısı ve basınçla başa çıkmak için büyük miktarda titanyum içeren çelik alaşımları gerektirir. Jeotermal üretimle ilgili literatür, rüzgar ve güneş PV'ye göre daha sınırlıdır ve mineral talebinin büyük bir kısmının

Teknoloji, çeliğin çeşitli alaşımlarını oluşturmak için elementlerin kullanımından kaynaklanmaktadır, çelik, çift sayımı önlemek için bu analizden tekrar hariç tutulmuştur.

Şekil 3.12, 2050 yılına kadar jeotermal tedarik için gereken başlıca mineralleri göstermektedir. Rüzgârda kullanılmasının yanı sıra krom, jeotermal teknolojiler için önemli bir mineral olup, tüm enerji teknolojilerinden gelen talebin yüzde 36'sı jeotermale gitmektedir.

Jeotermalin en yüksek kapasitesi REmap ve B2DS senaryolarında bulunmakta olup, ilgili minerallerin genel mineral talebi Ref ve RTS senaryolarına göre sırasıyla %78 ve %71 oranında artmaktadır (Şekil 3.13).

Şekil 3.12 2050'ye Kadar 2DS Kapsamında Jeotermalden Kaynaklanan Mineral Talebinin Payı



Not: 2DS = 2 derece senaryo.

17 "Jeotermal Enerji", National Geographic, <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/geothermal-energy/>.

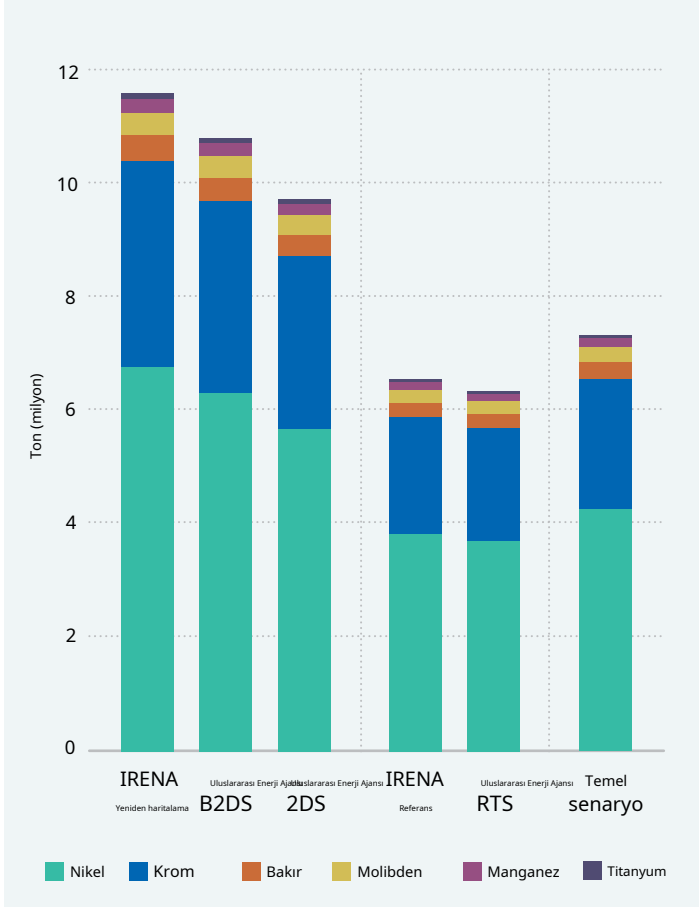
18 "Jeotermal Enerji", Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, <https://www.irena.org/geothermal> . Aynı yerde .

19

20 "Endonezya'nın 2025'e Kadar Jeotermal Hedefine Ulaşmak İçin 15 Milyar Dolarlık Yatırıma İhtiyacı Var", Reuters, 13 Ağustos 2019, <https://www.reuters.com/article/us-indonesia-geothermal/indonesia-needs-15-billion-investment-to-meet-geothermal-target-by-2025-idUSKCN1V30R0> .

21 Modelde kullanılan veriler üç santralin ortalamasıdır: 5 kilometre derinlikte 25 kuyuya sahip 50 MW'lık bir tesis; 1,5 kilometre derinlikte 5 kuyuya sahip 10 MW'lık bir tesis ve 2,5 kilometre derinlikte 22 kuyuya sahip 48,4 MW'lık bir tesis. Veriler hem santral tesislerini hem de kuyu borularını kapsamaktadır (Moss vd. 2013).

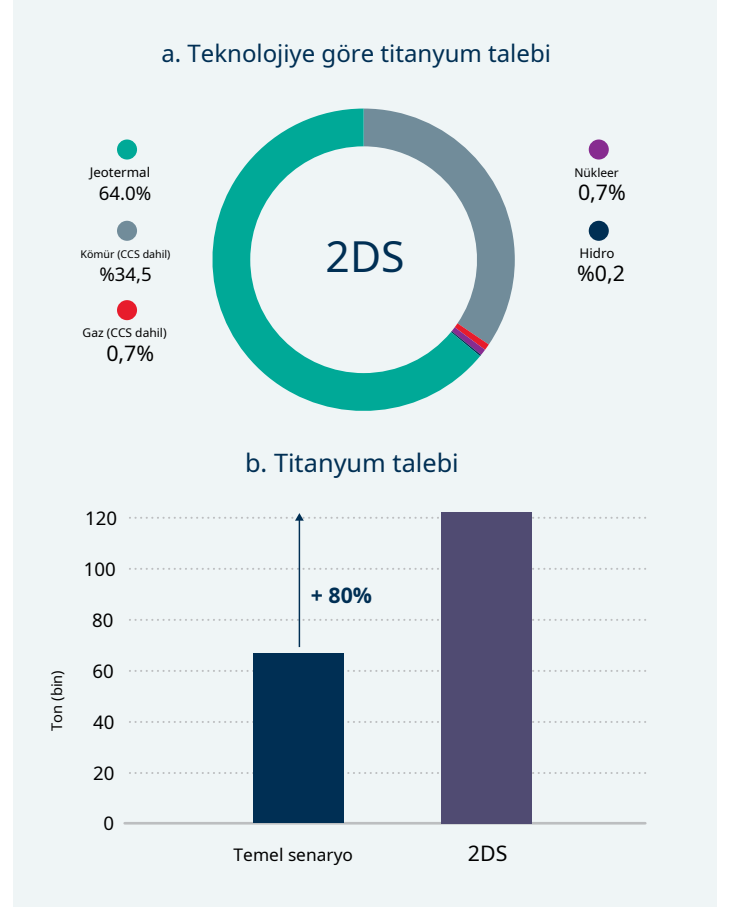
Şekil 3.13 2050'ye Kadar Jeotermal İçin Gerekli Minerallere Yönelik Toplam Talep



Not: 2DS = 2 derecelik senaryo, B2DS = 2 derecenin ötesinde senaryo, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı, IRENA = Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, Ref = referans senaryo, REmap = yenilenebilir enerji yol haritası senaryosu, RTS = referans teknoloji senaryosu.

Güneş PV ve rüzgar mineral talebi eğilimlerinin aksine, Şekil 3.13, temel senaryoda jeotermal minerallere yönelik genel talebin, 2050'ye kadar jeotermal dağıtım konusunda farklı varsayımlar nedeniyle hem RTS hem de Ref senaryolarından biraz daha yüksek olduğunu göstermektedir. Temel senaryoda, daha yüksek bir jeotermal kapasite payı beklenmektedir. Bu, diğer yenilenebilir teknolojilere kıyasla jeotermal enerjinin tahmini maliyetleri hakkındaki varsayımlardaki değişiklikleri yansıtmaktadır. Güneş PV ve rüzgarın maliyetleri son yıllarda düştüğü için, bu teknolojiler artık diğer yenilenebilir teknolojilere göre daha cazip görülmektedir. Bu nedenle, IRENA'nın en güncel projeksiyonları

Şekil 3.14 2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam Titanyum Talebi (2DS, Temel Senaryo)



Not: 2DS = 2 derece senaryosu, CCS = karbon yakalama ve depolama.

ve IEA artık temel senaryonun çıkarıldığı biraz daha eski IEA verilerinden daha düşük seviyelerde jeotermal kapasite öngörüyor.

Titanyum, hem jeotermal hem de kömür ve CCS dağıtımı etrafındaki varsayımlardan etkilenen ilgili minerallerden biridir. Şekil 3.14'te görüldüğü gibi, 2DS altında jeotermal titanyum talebinin %64'ünü oluştururken, kömür ve CCS %34,5'ini oluşturur. Titanyum her iki teknolojiye de yoğun olarak kullanıldığından, dünya daha fazla fosil yakıt yoğun veya daha düşük karbonlu bir enerji yoluna doğru hareket etse de, talebi artacaktır.





Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP), suyu ısıtmak ve buhar türbinlerini çalıştırmak için aynalar kullanarak güneşin ısısını yoğunlaştırarak elektrik üretir. 1 MW ile 400 MW arasında değişen çeşitli CSP santral boyutları mevcuttur. CSP'nin güneş PV ile karşılaştırıldığında başlıca avantajlarından biri, ısıyı depolamak için erimiş tuzlarla donatılabilmesi ve bunun daha sonra akışmaları serbest bırakılabilmesidir, bu da onu büyük ölçekli uygulamalar için ideal bir yenilenebilir enerji kaynağı yapar. Avantajlarına rağmen, CSP 2018'de küresel olarak yalnızca 5,5 GW kurulu kapasiteye sahipti, güneş PV'nin 480 GW'ına kıyasla,²² Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla yüksek maliyetleri ve coğrafi kısıtlamaları nedeniyle. CSP yalnızca mükemmel doğrudan normal ışınım olan yerlerde kullanılabilir, bu da tipik olarak çöl bölgelerinde bulunur, bu nedenle şu anda CSP en çok Şili, İspanya ve Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkelerde bulunur.

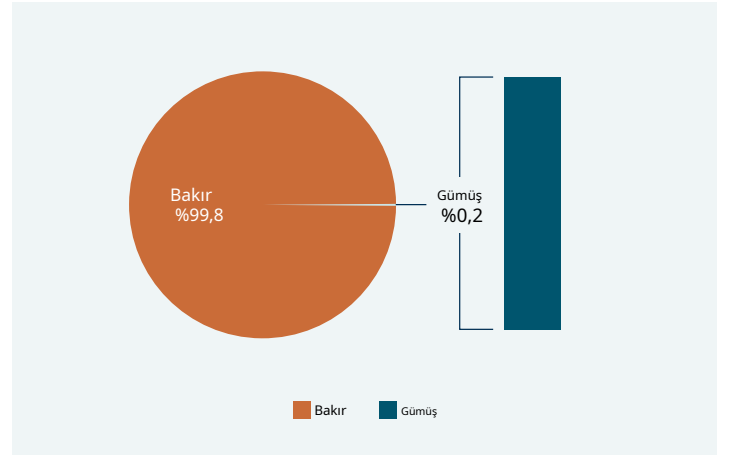
Kuzey Afrika ve Orta Doğu gibi bölgelerin, CSP kapasitelerini geliştirmede öncülük etmesi bekleniyor, ancak CSP dağıtımı güneş PV ve rüzgara kıyasla küçük kalacak. Devam eden düşen fiyatlar ve teknolojik gelişmeler göz önüne alındığında teknolojinin daha da ölçeklendirilmesi için potansiyel var. Büyüme oranları hala büyük olabilir; IEA'nın *Dünya Enerji Görünümü 2019* Afrika'da konuşlandırılmış CSP'de 2040 yılına kadar %900'ün üzerinde büyüme öngörülüyor. Bu büyümenin gelişmekte olan ülkelerde gerçekleşmesi daha olasıdır; IEA, 2DS kapsamında, tüm CSP kurulu kapasitesinin yaklaşık %80'inin 2050 yılına kadar OECD dışı ülkelerde olacağını öngörüyor. CSP'nin depolama kapasitesi, yüksek doğrudan normal ışınım ile donatılmış gelişmekte olan ülkeler için onu cazip bir yenilenebilir kaynak haline getiriyor.

Teknolojinin niş yönü göz önüne alındığında, CSP sistemleri için gereken malzeme girdileri hakkında önemli ölçüde daha az çalışma vardır. Aynalar için destek yapıları için cam, çelik ve alüminyum gibi toplu malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır, ancak literatürde bu malzemeler için veri bulunmamaktadır veya tanımlanan mineraller modelin dışındadır. Ancak, bakır (kablolar, pompalar, elektrik motorları ve jeneratör için) ve gümüş (aynalar için cam kaplamada kullanılır) kullanımı için veri mevcuttur. Parabolik oluk sistemleri de dahil olmak üzere çeşitli tipte CSP tesisleri ortaya çıkmaktadır.

doğrusal fresnel sistemleri ve merkezi alıcılar—her biri farklı miktarlarda gümüş kullanıyor. Bu türleri ayrı ayrı modellemek için hem kurulu kapasite hem de malzeme bileşimi hakkında yeterli veri yoktu, ancak model çeşitli türlerden gelen gümüş talebindeki değişimleri yakalıyor.

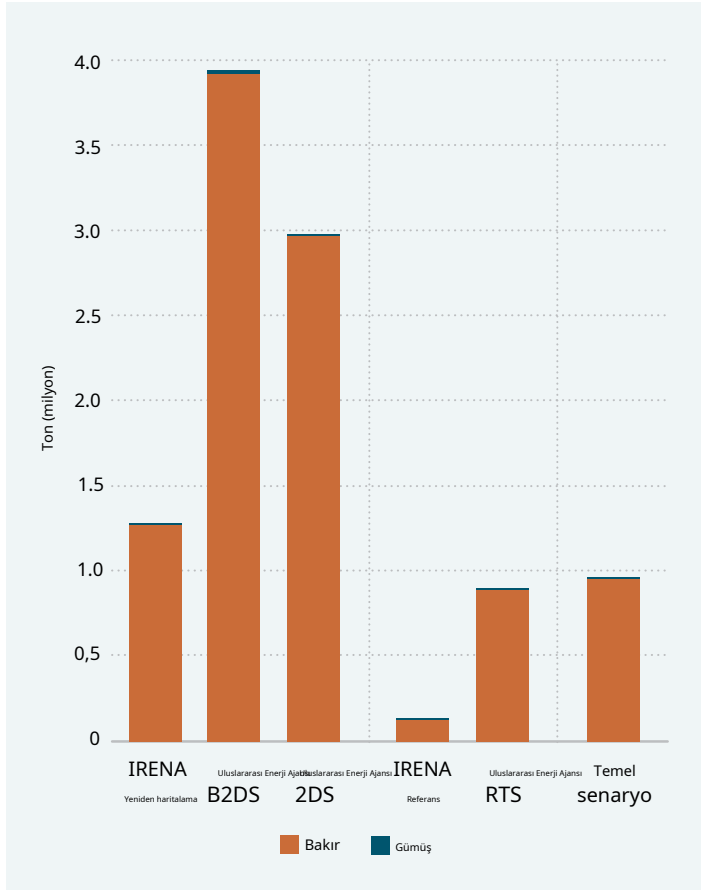
Şekil 3.15, 2DS kapsamında verilerinin mevcut olduğu bakır ve gümüş arasındaki dengeyi göstermektedir; bakır, CSP tesislerinde daha yaygın kullanımı nedeniyle modellenmiş talebin çok daha büyük bir payını temsil etmektedir.

Şekil 3.15 IEA 2DS'ye Göre 2050'ye Kadar Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisinden Kaynaklanan Mineral Talebinin Payı



Not: 2DS = 2 derece senaryosu, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı.

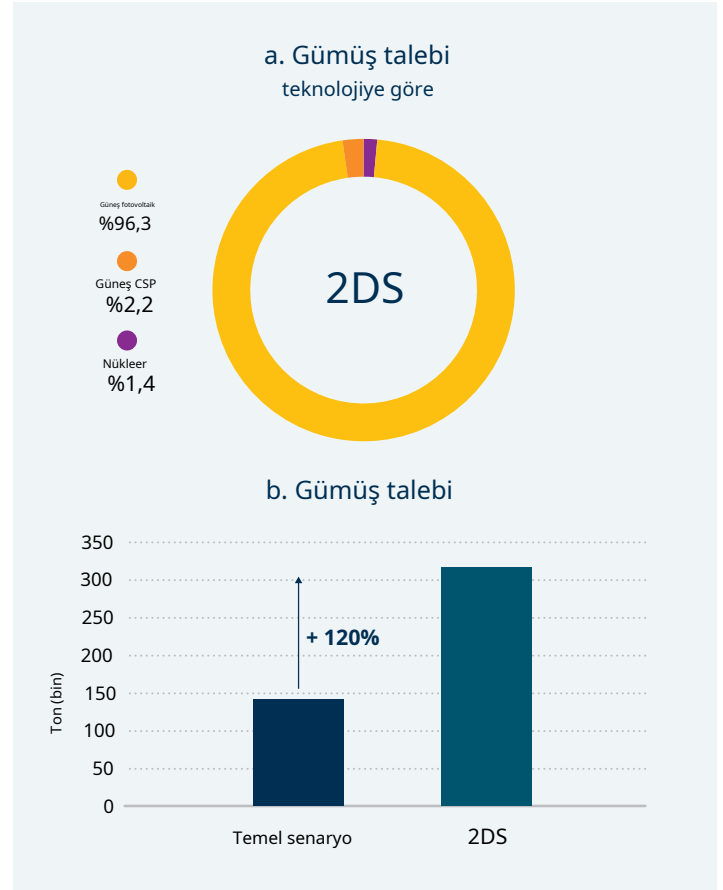
Şekil 3.16 2050'ye Kadar Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi İçin Gerekli Minerallere Yönelik Toplam Talep



Not: 2DS = 2 derecelik senaryo, B2DS = 2 derecenin ötesinde senaryo, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı, IRENA = Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, Ref = referans senaryo, REmap = yenilenebilir enerji yol haritası senaryosu, RTS = referans teknoloji senaryosu.

Şekil 3.16'da görüldüğü gibi, mineral talebi B2DS'de en güçlüdür ve burada CSP kapasitesinin en yüksek olması beklenmektedir. IRENA senaryolarının her ikisi de, Ref ve REmap, 2050'ye kadar CSP'nin küresel elektrik karışımındaki payı konusunda düşüşe işaret ediyor ve bu da bakır ve gümüşe olan daha düşük talebi açıklıyor. Bu, güneş PV gibi diğer yenilenebilir teknolojilere kıyasla teknolojinin öngörülen maliyetlerine ilişkin farklı varsayımları yansıtır. Temel senaryo ayrıca, CSP'nin daha sonraki RTS senaryosundan daha yüksek bir payını öngörüyor ve CSP ile güneş PV arasındaki dengeye ilişkin değişen inançları yansıtır ve ikincisindeki maliyet düşüşleri, daha yakın tarihli IEA projeksiyonlarında CSP'ye kıyasla yenilenebilir kapasitenin daha da büyük bir payı olarak öngörülmesine neden oluyor.

Şekil 3.17 2050'ye Kadar Teknolojiye Göre Toplam Gümüş Talebi (2DS, Temel Senaryo)



Not: 2DS = 2 derecelik senaryo, CSP = yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, PV = fotovoltaik.

Hem bakır hem de gümüş için öngörülen rakamlar daha iddialı senaryolarda önemli ölçüde artmış gibi görünse de, minerallerin güneş PV'deki kullanımına kıyasla sönük kalmaktadır. Örneğin, Şekil 3.17, 2DS kapsamında 2050 yılına kadar teknolojiye göre gümüş talebini göstermektedir. Gümüş talebinin büyük çoğunluğu, %96,3 ile, güneş PV büyümesine bağlıdır ve bu da ağırlıklı olarak güneş PV'nin alt teknolojisi olan kristal Si'den kaynaklanmaktadır; gümüş talebinin yalnızca %2,2'si CSP'ye ve %1,4'ü nükleere bağlıdır. 2DS kapsamında, gümüş talebinin iki katına çıkması ve 2017'deki 1,4 bin tondan 2050'de yaklaşık 3,2 bin tona çıkması beklenmektedir.





Enerji Depolama

Enerji depolama teknolojisi, elektrik üretildiğinde depolanır ve daha sonra ihtiyaç duyulduğunda dağıtılabilir.²³ Yenilenebilir enerji için, özellikle de güneş PV ve rüzgar gibi değişken olanlar için çok önemli bir teknolojidir. Bunlar dağıtılamaz çünkü elektrik yalnızca güneş parladığında veya rüzgar estiğinde üretilir. Enerji depolama, elektriği bir bataryada depolayarak ve daha sonra genellikle akşamları yoğun saatlerde serbest bırakarak bu belirli teknolojiler için bir çözüm sağlayabilir ve yardımcı bir hizmet görevi görebilir. Bu yüksek potansiyel göz önüne alındığında, Dünya Bankası geliştirmekte olan ülkelerde 2025 yılına kadar 17,5 GWh batarya depolamayı ölçeklendirmek için Enerji Depolama Programı'nı başlattı.²⁴

Enerji depolama, şebekeyi değişken yenilenebilir enerjiden stabilize etmede önemli bir rol oynayabilirken, maliyetleri daha yaygın olarak kullanılması için hala çok yüksektir. Ortalama LCOE'si 0,05/kWh olan güneş PV ve rüzgar teknolojilerine kıyasla, pil depolamanın LCOE maliyetleri ortalama 250/kWh'dir ve bu da onu günümüzdeki çoğu uygulama için çok pahalı hale getirir. Yüksek maliyetlere rağmen, elektrikli araçlarda pillerin artan kullanımı, pil maliyetlerinin 2016'daki 288/kWh'den bugün 157/kWh'ye hızla düşmesinin temel nedeni olmuştur ve bu da fiyatlarda %46'lık bir düşüşü temsil etmektedir.

Enerji depolama, düşük karbon geçişi için iki ana nedenden ötürü kritik öneme sahiptir: (1) Elektrikli araçlara güç sağlamak için kullanılır ve (2) şebeke ve merkezi olmayan operasyonlar dahil olmak üzere güneş PV ve rüzgar çiftliklerinden gelen aralıklı elektrik üretiminden gelen gücü depolamak için gereklidir. Enerji depolamanın her iki uygulaması da IEA'nın teknoloji tabanlı azaltma senaryolarından modele dahil edilmiştir, çünkü enerji depolamayla ilgili veriler IRENA ve temel senaryolar için mevcut değildi. Pil elektrikli araçlarının IEA senaryolarındaki dağıtımların yaklaşık %90'ını oluşturması, sabit ve merkezi olmayan uygulamaların ise diğer %10'unu oluşturması bekleniyor; mineral talebi bu sektörel bölünmeyi takip ediyor.

Mobil Enerji Depolama

Otomobiller (ve otobüsler, minibüsler ve kamyonlar dahil diğer tekerlekli kara taşıtları) için enerji depolama alanı çok hızlı bir şekilde değişiyor. Günümüzdeki tüm araçlarda, motoru çalıştırmaya ve araç elektroniğine güç sağlamaya yardımcı olmak için neredeyse her zaman kurşun asitli bir akü olmak üzere bir miktar akü enerjisi depolaması bulunur. Otomotiv sektöründe kullanılan ve bu analizde ele alınan iki ana akü vardır:

- **Kurşun-asit piller** olgun bir teknoloji olmaları ve ucuz olmaları nedeniyle elektrikli araç operasyonunun erken aşamalarına hakim oldular, ancak ağırlıkları ve menzilleri nedeniyle sınırlıdır. Bunlar, başlangıçta dizüstü bilgisayarlar ve diğer elektronik cihazlarda kullanılmak üzere geliştirilen Li-ion pillerle kademeli olarak değiştiriliyor.
- **Li-ion piller** önceki nesil pillerden çok daha yüksek bir enerji yoğunluğu sunarlar, bu da pilin ağırlığına göre daha fazla enerji depolanabileceği anlamına gelir. Ayrıca daha az bakım gerektirirler ve çeşitli minerallerle üretilebildikleri ve farklı işlevler için uyarlanabildikleri için bir dizi esneklik sunarlar. Ancak, daha yüksek bir maliyete sahiptirler, koruyucu devreler gerektirirler ve potansiyel bir yangın riski oluştururlar.

Model, başlangıçta elektrikli araçlarda kurşun-asit ve Li-ion pillerin bir karışımının kullanılacağını ve Li-ion'un kısa sürede tüm pazarı ele geçireceğini varsayıyor.

Sabit Enerji Depolama

Sabit enerji depolaması, elektrikli araçlarda pil kullanımından farklı istenen özelliklere sahiptir. Örneğin, ağırlık daha az endişe vericidir ve sabit depolamanın farklı uygulamaları farklı ihtiyaçlara sahiptir. Bazı pillerin kısa süreler için depolanması için çok fazla güce ihtiyacı vardır, diğerleri ise daha az güce ancak daha uzun depolama süresine ihtiyaç duyar. Bu nedenle farklı piller mineral talebinde rol oynayabilir:

- **Li-ion piller** Sabit enerji depolamasında şu anda baskın teknoloji olmasına rağmen, kurşun-asit piller bazı uygulamalarda hala küçük bir rol oynamaktadır.

23 Bu bölümde enerji depolama, pompalı hidroelektrik veya termal depolama (CSP'de kullanılan erimiş tuzlar gibi) gibi diğer enerji depolama biçimlerini değil, özellikle pil teknolojilerini ifade eder. Piller ayrıca elektrikli araçların önemli bir bileşenidir ve bu araçların motorlarını çalıştırmak için gereken elektriği depolamak ve taşımak için hayati önem taşır.

24 Daha fazla bilgi için Dünya Bankası Enerji Sektörü Yönetim Yardım Programı'nın "Enerji Depolama Programı" web sayfasına bakın: <https://www.esmap.org/energystorage>.

- **Redoks akış pilleri** sabit enerji depolamada ortaya çıkan bir teknolojidir. Ağır ve büyüktürler ve bu nedenle araçlar için uygun değildirler, ancak aşırı büyük kapasitelerle (Li-ion için 100 MW'a kıyasla 200 MW'a kadar) üretilebilirler ve uzun bir ömre sahiptirler.

Modelde, Li-ion piller en büyük sabit depolama miktarını sağlarken, kurşun-asit pillerin rolü azalırken vanadyum bazlı redoks akış pillerinin rolü artmaktadır.

2030 Sonrası Pil Teknolojisi

Pil alanı hızla ortaya çıkıyor ve birçok yeni seçenek geliştiriliyor. Bu belirsizlik, sektörde gerçekleşen büyük ölçekli inovasyon ve deneyler nedeniyle 2030 sonrasında çok daha büyük. Li-ion pillerin önümüzdeki on yıl boyunca hem mobil hem de sabit pazara hakim olacağı varsayımı muhafazakardır. 2030 sonrasında, her iki pazarda da çok çeşitli seçeneklerle belirsizlik ölçeği çok daha büyüktür.

Mobil depolamada, katı hal Li-ion piller gibi seçenekler pazara girebilir. Ancak, otomotiv pazarının kendisi, hidrojen yakıt hücreli araçların pazara büyük ölçekte girmesiyle birlikte dönüşebilir. Sabit alanda, daha uzun süreli pillere olan talep artacaktır. Bu talebin bir kısmı vanadyum redoks akış pilleri tarafından karşılanabilir, ancak demir bazlı akış pilleri, enerjiji erimiş tuzlardan (CSP'de enerji depolamak için de kullanılır) veya kayalardan çeşitli farklı ortamlarda ısı olarak depolamayı içeren termal-elektrik seçenekleri gibi diğer seçenekler de hızla ortaya çıkıyor. Enerjiji mekanik enerji olarak depolayan ve ağırlıkları düşürerek boşaltan beton ve mekanik depolama bile var.²⁵

Bunlardan hangisinin ticari ölçekte ortaya çıkacağını tahmin etmek imkansızdır, ancak her biri genel olarak minerallere olan talebi ve özellikle modelde varsayılan sabit depolama türlerinde yoğun olarak kullanılan lityum, kobalt, nikel, manganez ve vanadyum gibi mineralleri etkileyebilir. Bu teknolojilerden bazılarının etkileri bu bölümün ilerleyen kısımlarında Ortaya Çıkan Enerji Teknolojileri bölümünde ele alınmaktadır.

Pil Kompozisyonu

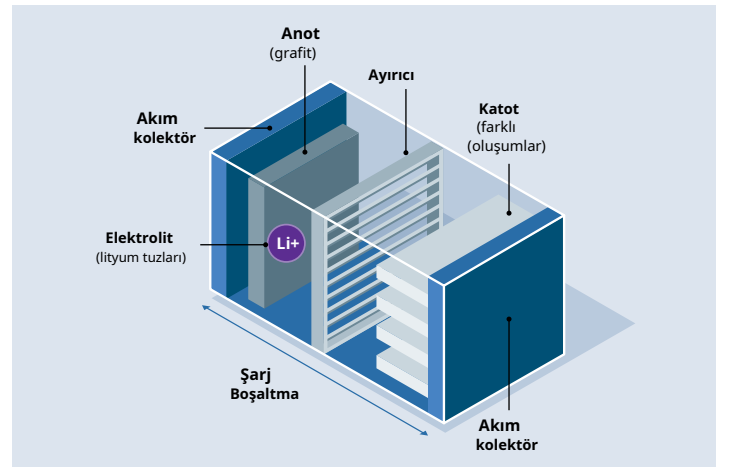
Piller genellikle üç ana elemana sahiptir: bir katot, bir anot ve iki malzeme arasında bulunan ve elektriğin farklı zamanlarda toplanıp boşaltılmasını sağlayan bir elektrolit. Bu elemanlar için kullanılan mineraller pil teknolojileri arasında ve içinde farklılık gösterir.

Redoks akışlı piller, pozitif ve negatif elektrotlardan oluşan ve bir zarla ayrılmış bir çekirdekten sıvı bir elektrolitin (genellikle sülfürik asit, vanadyum redoks akışlı pillerde vanadyum tuzlarıyla karıştırılır) pompalanmasıyla çalışması bakımından farklılık gösterir.²⁶

Modelde ele alınan farklı pil tiplerine ait örnekler Tablo 3.4'te verilmiştir.

İklim senaryoları daha iddialı hale geldikçe, bu analizdeki 17 mineralden 12'si, özellikle Li-ion pillerde kullanılan mineraller olmak üzere, enerji depolamada kullanımları nedeniyle talepte çok daha büyük artışlar gösteriyor (Şekil 3.19). Kurşun, vanadyum ve demir daha küçük artışlar gösteriyor: Bunlar Li-ion pillerde değil, 2DS ve B2DS'de dağıtımları önemli ölçüde değişmeyen kurşun-asit veya redoks akış pillerinde kullanılıyor.

Şekil 3.18 Li-ion Pil



İllüstrasyon, Dünya Bankası'nın İklim Eylemi için Mineraller İnfografiğinden uyarlanmıştır, <https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2019/02/26/climate-smart-mining>.

25 Mekanik depolamanın bir örneği, terk edilmiş maden kuyularını kullanan bir teknolojiyi içerir. Enerji, ağırlıkları kuyunun tepesine kaldırarak depolanır ve ağırlıkları kuyunun dibine bırakarak boşaltılır. Birçok farklı kimya mümkündür, ancak vanadyum kullanan piller en uygun olanlardır ve bu nedenle modele dahil edilen ana redoks akış pilli türüdür.

Tablo 3.4 Ref, 2DS ve B2DS'de Kapsanan Piller ve Alt Teknolojileri

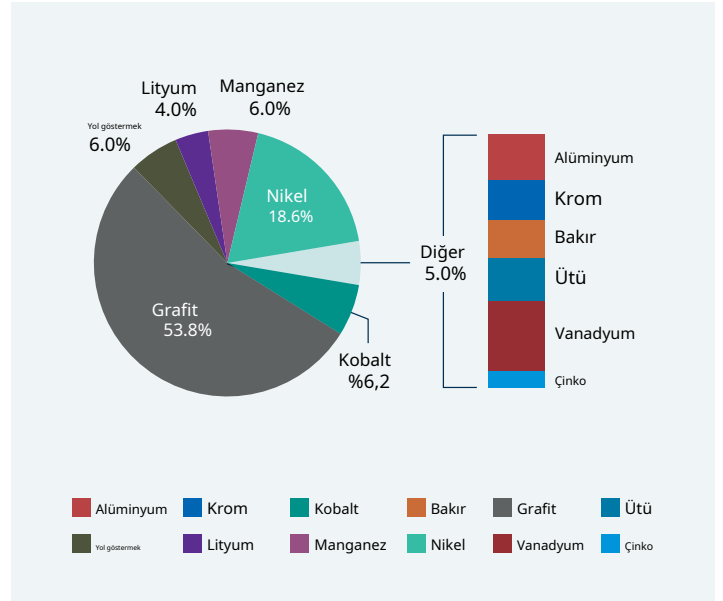
	Katot	Anot	Elektrolit	Kullanımlar
Lityum iyon	Çeşitli: <ul style="list-style-type: none"> • Nikel manganez kobalt((NMC)oksit • Nikel manganez kobalt((NMC)oksit • Nikel kobalt alüminyum((NCA'da)oksit • Lityum kobalt oksit((Düşük Maliyetli) • Lityum manganez oksit((LMO) • Lityum demir fosfat(İşgücüne Katılma (İGK) 	Grafit	Lityum tuzu	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrikli araçlar, sabit depolama, tıbbi cihazlar, e-bisikletler • Elektrikli araçlar, sabit depolama, tıbbi cihazlar, e-bisikletler • Taşınabilir elektronik cihazlar • Elektrikli el aletleri, tıbbi cihazlar • Elektrikli araçlar, elektrikli otobüsler, sabit depolama
Kurşun-asit	Kurşun dioksit	Yol göstermek	Sülfürik asit	Araçlar, yedek güç sistemleri, sabit depolama
Redoks akışı	evet	evet	Vanadyum bazlı	Sabit depolama

Not: 2DS = 2 derece senaryo, B2DS = 2 derecenin ötesinde senaryo, na = uygulanamaz, Ref = referans senaryo.

Kobalt ve lityum muhtemelen enerji depolamada kullanılmalarıyla bilinirken, piller genellikle katot için şekil 3.19'da ele alındığı gibi alüminyum, kurşun ve manganez dahil olmak üzere çok çeşitli mineraller kullanır. Anot için kullanılan grafit, mineral talebinin yaklaşık %53,8'ini oluşturur. NMC (nikel manganez kobalt oksit) ve NCA (nikel kobalt alüminyum oksit) pillerinde katot üretimi için ihtiyaç duyulan nikel, %18,6 ile ikinci en yüksek talep seviyesini oluşturur. Başka bir pil minerali olan kobaltın, 2DS kapsamında 2050'ye kadar toplam talebin %6,2'sini oluşturması bekleniyor. Toplam talebin %4'ünü oluşturan lityum, katot bileşiminden bağımsız olarak tüm Li-ion pillerde kullanılır.

Bu analizin düşük karbonlu bir geleceğe ulaşmak için mineral tedarikinin etkilerini değil, özellikle enerji depolama minerallerine olan talebi hesaba kattığı belirtilmelidir. Bazı pil minerallerinin, yani kobalt ve grafitin, esas olarak (yüzde 50'den fazla) aynı ülkede üretilmemesi nedeniyle tedarik asgari düzeyde vurgulanmıştır.²⁷

Şekil 3.19 2050'ye Kadar IEA 2DS Kapsamında Enerji Depolamadan Kaynaklanan Mineral Talebinin Payı



Not: 2DS = 2 derece senaryosu, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı.

27 Çin, dünyadaki doğal grafitin yaklaşık yüzde 70'ini üretirken, Demokratik Kongo Cumhuriyeti dünyadaki kobaltın yüzde 60'ından fazlasını üretiyor (EC 2018)

IEA RTS ile karşılaştırıldığında, B2DS'de mineral talebi, akülü elektrikli araçların büyük ölçekli dağıtımı nedeniyle %107 oranında artmaktadır (Şekil 3.20). Pil depolama dağıtımına ilişkin belirsizlik yüksektir, özellikle de pil depolama teknolojilerinin 2030'dan sonra en fazla talep görmesi beklendiğinden. Yine de, hikaye enerji üretim teknolojilerindekiyle aynıdır: Daha büyük iklim hırsı, daha büyük genel mineral talebine yol açar. Ancak, talep seviyeleri arttıkça, farklı mineral gereksinimleri olan yeni pil teknolojilerinin pazara girmesi için daha fazla alan mevcut olduğundan, bu talebi karşılayabilecek teknoloji türleri belirsiz hale gelir.

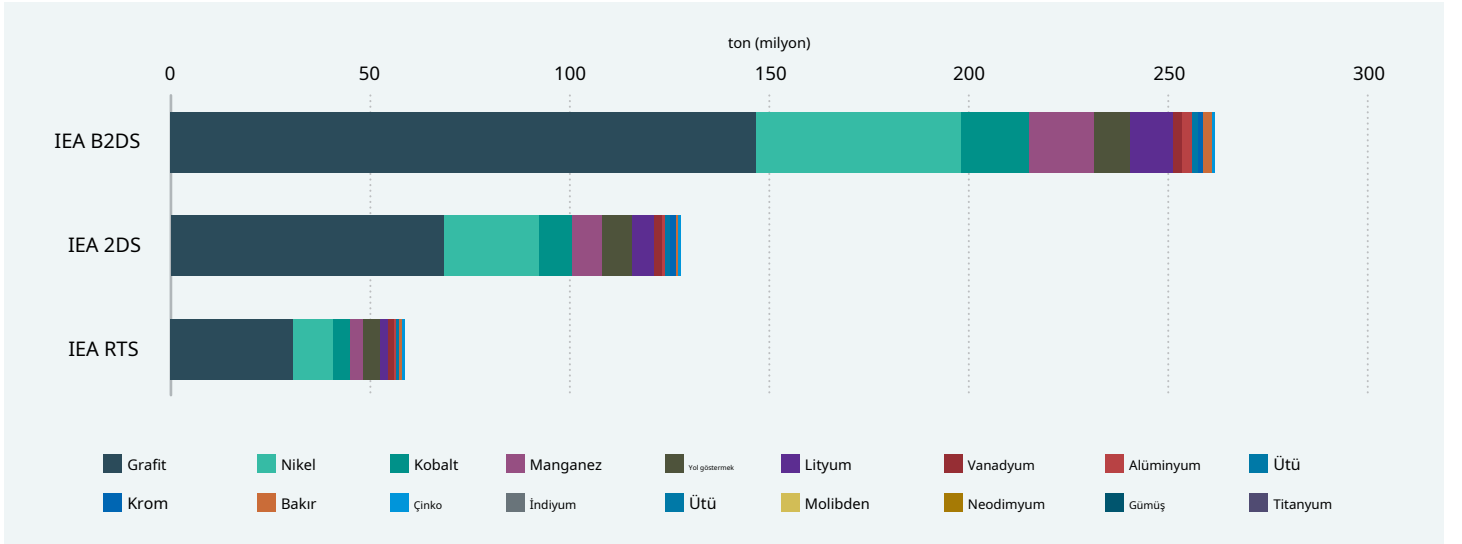
Modelde yer alan enerji teknolojilerinde grafit ve lityumun tek kullanımı, sırasıyla anot ve elektrolit için Li-ion pillerde enerji depolama ile bağlantılıdır.²⁸Bu iki mineral diğer enerji teknolojilerinde kullanılmadığından, toplam talepleri diğer teknolojilerle kıyaslanamaz.

Pil Alt Teknolojilerindeki Karşılıklı Tavizler

Bazı pil teknolojilerinde, bileşen mineraller arasında takaslar vardır ve bu nedenle alt teknoloji veya hatta belirli alt teknoloji türlerinin seçimi, yalnızca bir minerale değil, bir mineral grubuna olan talep üzerinde etkilere sahip olabilir. Pil üreticilerinin mineral tedarik zincirleri, özellikle de kobalt konusunda endişe duymasıyla, pil endüstrisi pil teknolojisindeki verimlilik seviyesini korurken, pillerde ihtiyaç duyulan kobalt miktarını azaltma, tedarik zinciri risklerini azaltma çabalarına öncülük ediyor. Kobalt çıkarmayı çevreleyen emek ve çevre sorunları hakkında haber yapan ana akım medya ve hükümet dışı kuruluşlar, alt akış şirketlerine pil teknolojileri için kobaltı nereden ve nasıl temin ettikleri konusunda daha sorumlu olmaları yönünde baskı yapıyor.

Pil sektörü tüm teknolojiler arasında en hızlı değişen sektör olduğundan, 2050'ye kadar hangi alt teknolojinin en çok kullanılacağını tahmin edebilmek neredeyse imkansızdır. Örneğin, Li-ion pazarındaki farklı pil kimyalarının farklı payları hakkında hem şimdi hem de gelecekte mevcut verilerin kıtlığı

Şekil 3.20 2050'ye Kadar Enerji Depolama İçin Gerekli Minerallere Yönelik Toplam Talep



Not: 4DS senaryosundaki talep sunulmamıştır çünkü bu senaryoda enerji depolama modellenmemiştir. 2DS = 2 derece senaryosu, B2DS = 2 derecenin ötesinde senaryo, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı, RTS = referans teknoloji senaryosu.

²⁸ Grafitin diğer enerji teknolojilerinde, örneğin rüzgar türbinlerinin motorlarında karbon fırçaların kullanımı gibi bazı niş kullanımları vardır; ancak bu kullanımlara ilişkin veri bulunmamaktadır ve bunların ölçeğinin, grafitin pil teknolojilerinde kullanımına kıyasla çok küçük olması muhtemeldir.

gelecekte, bir zorluk olmuştur. Modelde, çeşitli kimyalardan veriler alınmış ve yukarıda açıklanan metodoloji kullanılarak "ortalama" Li-ion pil modellenmiştir. Ancak, gelecekteki pazara hakim olabilecek Li-ion pil türlerindeki değişikliklerin mineral talebini nasıl etkileyebileceğini göstermek için iki örnek senaryo geliştirilmiştir.

Pil sektöründe, Li-ion pil bileşimleri mineral içerik oranlarına göre tanımlanır. Örneğin bir NMC811 tasarımında, 8, 1 ve 1 sırasıyla katotta kullanılan nikel (%80), manganez (%10) ve kobaltı (%10) temsil ederken, NMC111 tasarımında nikel, manganez ve kobalt eşit oranlarda kullanılır. İkincisi, bugüne kadar NMC pillerinde kullanılan ana kimya olmuştur, ancak potansiyel olarak daha ucuz, daha hafif olan ve elektrikli araçlara daha uzun menzil sunan ve gereken kobalt miktarını azaltan yeni NMC811 tasarımına olan ilgi artmaktadır.

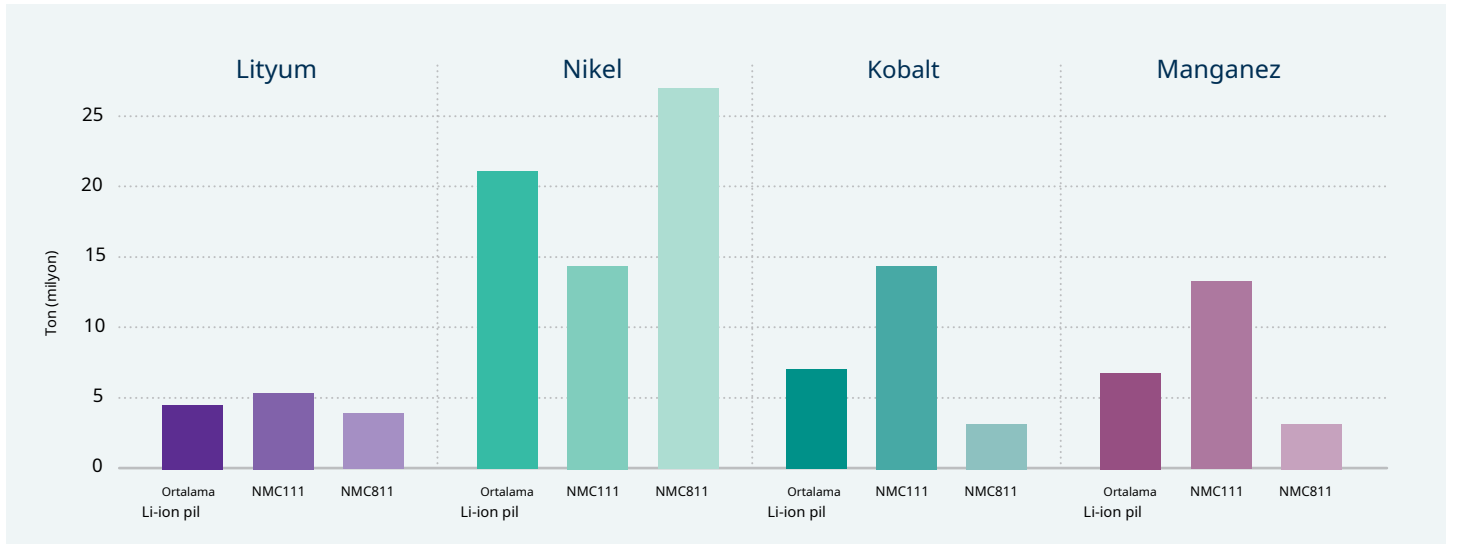
Li-ion pil pazarındaki talep değişimlerinin etkisini göstermek için, modelde temel alınan "ortalama" Li-ion pil ile iki alternatif senaryo karşılaştırılır

(bkz. şekil 3.21). İlk senaryoda, her Li-ion pilin bir NMC811 olduğu varsayılırken, ikinci senaryoda tüm pillerin bir NMC111 olduğu varsayılır.²⁹

Lityum talebi, pil seçimine bağlı olarak taban payından yaklaşık %20 oranında değişir. Şekil 3.21, NMC111 ile daha yüksek lityum talebi seviyelerinin, taban payından yaklaşık %100 daha fazla olan çok daha yüksek kobalt ve manganez talebi seviyeleriyle de ilişkili olduğunu göstermektedir. Ancak, NMC111 ile nikel talebi çok daha düşüktür, %35'ten fazla daha düşüktür.

Nikel, kobalt ve manganez (ve daha az ölçüde lityum) arasında, hangi pil alt teknolojisinin ortaya çıktığına bağlı olarak net bir takas vardır. Kobalt gibi minerallerin kıtlığı (ve dolayısıyla daha yüksek fiyatlar), farklı Li-ion pil tiplerine (NMC811 veya lityum-demir fosfat gibi kobalt olmayan tipler) geçişleri teşvik edebilir. Öte yandan, lityumdaki kıtlıklar pil tiplerini NMC811'e kaydırabilir ve nikel talebini artırabilir.

Şekil 3.21 2050'ye Kadar 2DS Altında Li-ion Pil Senaryolarından Minerallere Yönelik Toplam Talep



Not: 2DS = 2 derece senaryo, Li-ion = lityum-iyon.

Li-ion Pillerde Malzeme Kullanımı İyileştirmeleri

Düşük karbonlu bir gelecek için ihtiyaç duyulan teknolojilerin çoğu hızla devreye alınırken maliyetlerde de düşüş yaşanıyor.³⁰ Bu maliyet düşüşleri, kobalt gibi minerallerin konsantrasyonunun azaltılması da dahil olmak üzere birçok kaynaktan kaynaklanmaktadır. 2018'de, katot ve anot (pil hücresi) oluşturmak için gereken mineraller, bir pilin toplam maliyetinin yaklaşık %70'ini oluşturuyordu (Goldie-Scot 2019).

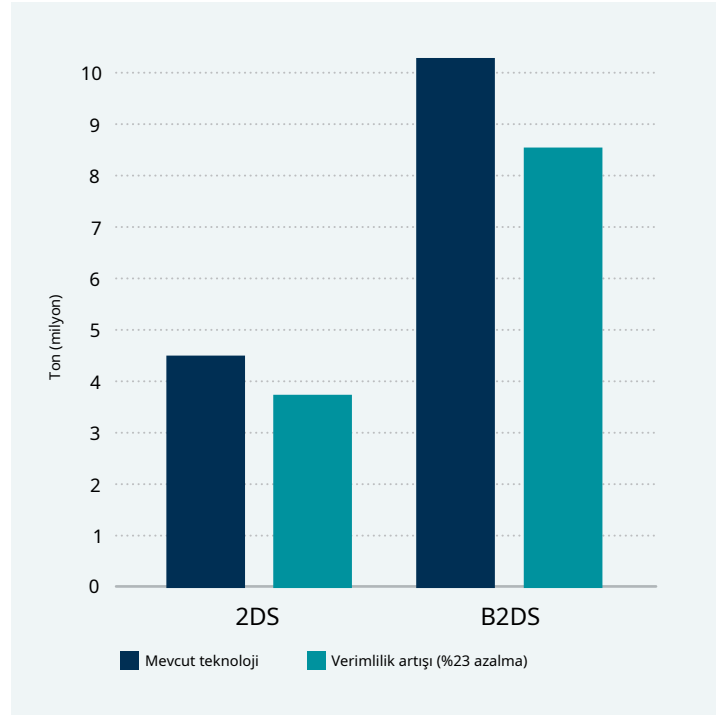
Her ne kadar tüm teknolojiler belirgin bir azalma örüntüsü göstermese de (alt teknoloji seçiminin nasıl gerçekleştiği varsayıldığına bağlı olarak), değişim örüntüleri vardır. Örneğin, literatürdeki çeşitli kaynaklar, son yıllarda Li-ion pillerdeki lityumun tahmini bileşiminde bir azalma olduğunu göstermektedir.³¹ 2016 yılında Teske ve diğerleri bir Li-ion (NCA) pil için megawatt-saat başına 0,24 tonluk bir bileşim tahmin etti. 2018 yılına gelindiğinde IEA benzer bir pil için megawatt-saat başına 0,1 tonluk bir bileşim tahmin etti (IEA 2018).

Bu etkiyi yakalamak için, model tüm Li-ion pillerin lityum kullanımını geliştirmeye devam edeceği ve tüm pillerin bugün literatürde görülen en verimli türe geçeceği varsayımı kullanılarak genişletildi. Bu değişim, 2050 yılına kadar Li-ion pillerde lityum kullanımında %23'lük bir azalmaya yol açtı. Şekil 3.22, Li-ion pillerdeki bu malzeme iyileştirmelerinin 2DS ve B2DS altında lityum talebi üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu sonucun etkisi, lityum talebini %16 ila %17 arasında azaltacaktır ve en büyük mutlak fark B2DS altında görülecektir.

Li-ion pillerin enerji yoğunluğundaki iyileştirmeler, örneğin pillerin kilogram başına depolayabileceği enerji miktarı ve pilin kapasitesinin orijinal kapasitesinin %80'inin altına düşmeden önce kaç kez şarj edilip boşaltılabileceği gibi döngü ömürleri, lityum, grafit ve kobalt gibi minerallere olan talep için de önemli sonuçlar doğuracaktır. Yoğunluk ve döngü ömrü keskin bir şekilde artarsa, yeni pillere ve ihtiyaç duydukları minerallere olan talep düşecektir.



Şekil 3.22 Mevcut Teknoloji ve 2DS, B2DS Altında 2050'ye Kadar Malzeme Kullanımının Azaltılması Altında Enerji Depolamasından Lityum İçin Toplam Talep



Not: 2DS = 2 derecelik senaryo, B2DS = 2 derecenin ötesindeki senaryo.

30 Örneğin, IEA'nın 2018 raporunun 5.1 numaralı şekline bakın *Küresel Elektrikli Araç Görünümü*.
31 Örneğin, Teske ve diğerlerine (2016) ve IEA'ya (2018) bakın.

Ortaya Çıkan Enerji Teknolojileri

Bu bölüm, küresel olarak enerji sisteminin dönüşümünde potansiyel oyun değiştiriciler olarak kabul edilen çeşitli yeni teknolojileri ele almaktadır. Karbon yakalama ve depolamanın dışında, bu belirli teknolojiler modelde analiz edilen 17 mineral genelinde talebi tahmin etmek için modele dahil edilmemiştir, ancak yakın vadede potansiyel ticarileşmelerinin genel mineral talebi üzerinde etkileri olabileceği için buraya dahil edilmiştir. Bu analiz, düşük karbonlu bir geleceğe ulaşmak için hangi enerji teknolojisinin daha belirgin hale gelebileceği konusunda teknolojiden bağımsız kalmaktadır, ancak yeni teknolojiler mineral yoğun olduğundan raporda ele alınmaktadır.

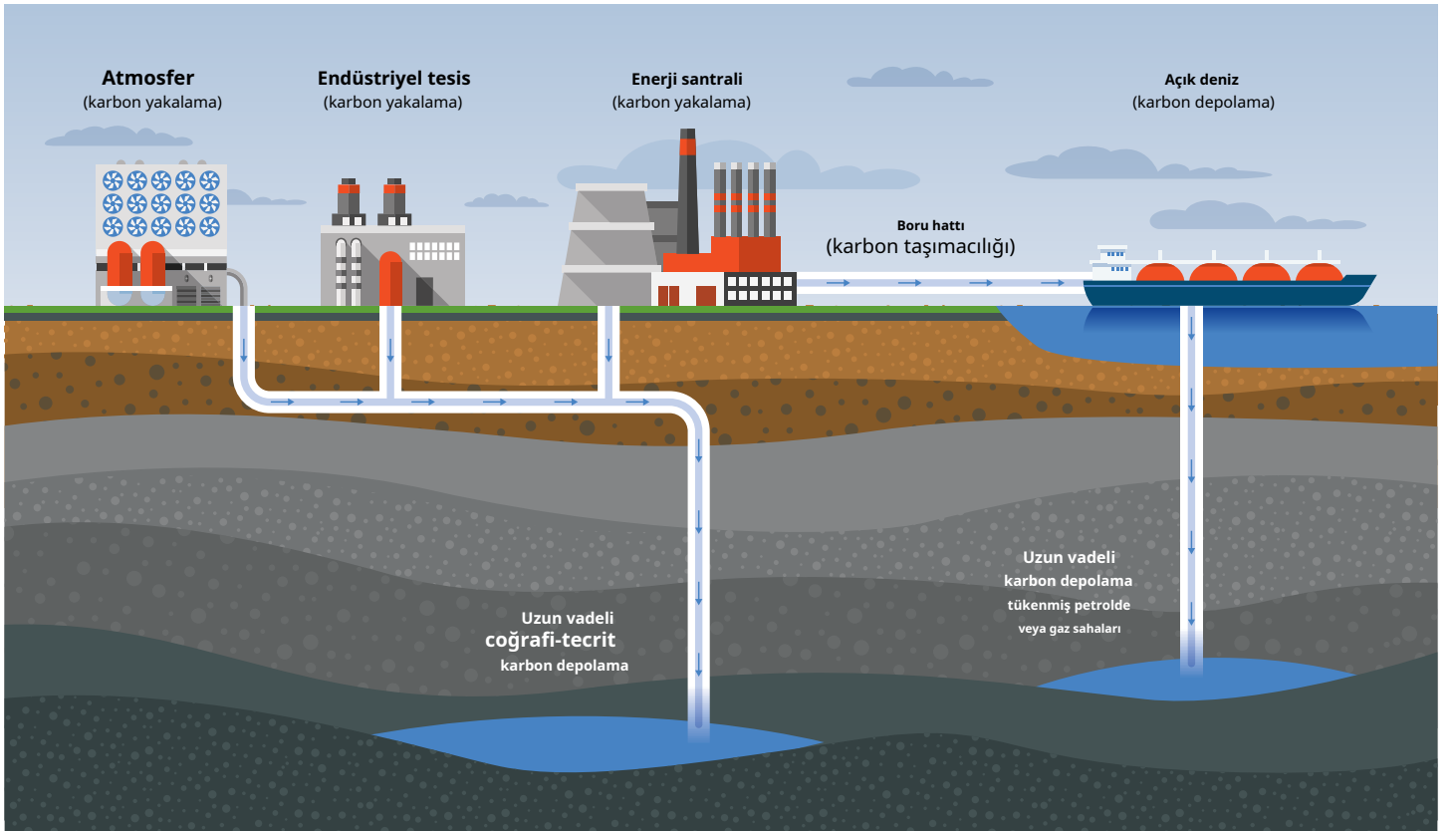
Karbon Yakalama Depolama

Karbon yakalama ve depolama (CCS), IEA senaryoları altında büyük belirsizliklerle de olsa kullanılması beklenen temel teknolojilerden biridir ve modelde kısmen ele alınmıştır. Ancak, güneş PV, rüzgar, jeotermal, CSP ve enerji depolama ile karşılaştırıldığında teknoloji hala nispeten erken geliştirme aşamasında olduğundan Ortaya Çıkan Enerji Teknolojileri bölümüne dahil edilmiştir.

CCS, CO'nun yakalanmasını içerir üç kaynaktan:

- Kömür ve gazın yanması
- CO'nun taşınmasız kaynak siteden uzun vadeli depolamaya
- CO'nun uzun süreli depolanması

Şekil 3.23 Karbon Yakalama Depolama



Çeşitli kaynaklardan uyarlanan çizim (örneğin, Shell Sürdürülebilirlik Raporu 2016, <https://reports.shell.com/sustainability-report/2016/energy-transition/our-work-to-address-climate-change/carbon-capture-and-storage.html>; Karbon Yakalama ve Depolama Derneği, <http://www.ccsassociation.org/what-is-ccs/>).

Yaygın ticari ölçekli CCS henüz ortaya çıkmadı ve gelecekte ne kadar büyük bir rol oynayacağı konusunda büyük bir belirsizlik var. CCS'nin teknoloji tabanlı azaltma senaryolarındaki rolü büyük ölçüde değişiyor. IEA, 2DS ve B2DS senaryolarında teknoloji için artan bir rol görüyor; 2DS kapsamında CCS'ye bağlı 350 GW kömür santralinin faaliyette olacağını ve bunun tüm kömür tesislerinin %74'ünü temsil edeceğini öngörüyor. Öte yandan IRENA teknolojiyi farklı görüyor ve senaryolarına CCS'yi dahil etmiyor.

CCS'nin hangi ölçekte uygulanabileceği açısından kritik öneme sahip olan unsurlar arasında, CCS'nin ticari olarak uygulanabilir olmasını sağlamak için hayati önem taşıyan karbon fiyatının büyüklüğü de dahil olmak üzere maliyetler; karbonun depolanmasına ilişkin düzenleyici ve yasal faktörler ve bu süreçten kaynaklanabilecek yükümlülükler; ve CO₂'yi yeraltında depolamak için uygun jeolojik oluşumların mevcudiyeti yer almaktadır.

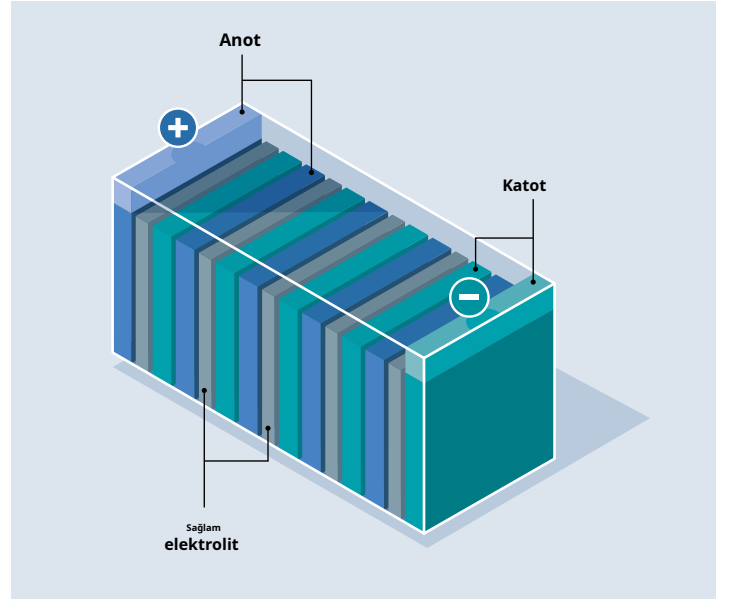
Bu faktörler CCS'nin yaygın olarak benimsenmesini sınırladı ve bunun sonucunda yavaş kabul gördü. 2018'de, 20'si ticari olarak faaliyet gösteren 43 büyük ölçekli tesis çeşitli operasyon aşamalarında (GCCSI 2019). Ancak teknolojinin kendisi tamamen yeni değil; CO'yu yakalamak ve geri kazanımı iyileştirmek için petrol kuyularına enjekte etmek 45 yıldan uzun süredir devam ediyor. Elektrik santrallerinden ve demir-çelik tesislerinden CO yakalamayı içeren projeler ortaya çıkıyor.

Büyük ölçekli faaliyet gösteren CCS tesislerinin seyrekliği, gelecekte teknolojinin mineral bileşimini tahmin etmeyi zorlaştırıyor. Bu alandaki çalışmalar, teknolojide yer alan temel mineraller olarak krom, kobalt, bakır, manganez, molibden ve nikel tanımladı. Bu mineraller, CCS'de çeşitli şekillerde kullanılır, ya CO'yu yakalamak için (manganez ve nikel gibi) ya da CCS tesisi için gereken çelik alaşımlarında, taşıma borularında ve üretim tesisi için gereken diğer değişikliklerde. Kritik bir faktör, CO'yu depolama alanlarına taşımak için gereken boru hatlarının uzunluğudur; bu, tesisler arasında değişecek ve teknolojiden kaynaklanan minerallere yönelik genel talep ölçeğini değiştirecektir.

Piller: Yeni Nesil

Birçok pil uzmanının görüşüne göre, Li-ion piller önümüzdeki on yılda pil sektörüne hakim olacak.³²Bu analizde kullanılan model altında yapılan projeksiyonlara benzer. Ancak, hızla ortaya çıkan bir dizi yeni pil teknolojisi, Li-ion pillerin önerilen gelecekteki hakimiyetine meydan okuyabilir. Bu yeni pillerin ne zaman veya yaygın pazar dağıtımına ulaşip ulaşmayacağı konusunda büyük bir belirsizlik var. Ancak, bu yeni teknolojilerin çoğu, uygulanabilir hale gelmeleri durumunda Li-ion pillere göre önemli avantajlar sunuyor; bu nedenle, 2030 sonrasında hem mobil hem de sabit enerji depolama seçenekleri sağlamada büyük bir rol oynayabilirler. Bu teknolojilerin iki grubu, katı hal Li-ion piller ve çinko-hava pilleri, bu tür çığır açan teknolojilerin minerallere olan talep üzerindeki potansiyel etkisine ilişkin anlayış sağlamak için inceleniyor.

Şekil 3.24 Katı Hal Pil



Çeşitli kaynaklardan uyarılan çizim (örneğin, Electronics-Lab.com, <https://www.electronics-lab.com/solid-state-li-ion-batteries-high-energy-dense-batteries-closer/>).

Katı Hal Pilleri

Katı hal pilleri, geleneksel Li-ion pillerdeki sıvı elektrolitin polimer veya seramik gibi katı bir alternatifle değiştirilmesiyle daha yaygın sıvı muadillerinden farklıdır. Bu yapı, mühendislerin grafit anodu lityum mineral anotla değiştirmesini sağlar ve bu da pilin depolama potansiyelini büyük ölçüde artırır. Katı hal pilleri, teorik olarak, yanmaz seramik elektrotlar kullandıkları için daha fazla depolama, daha hızlı şarj, gelişmiş güvenlik ve azaltılmış yangın riski sunar. Bu yapı ayrıca soğutma sistemlerine olan ihtiyacı da azaltarak elektrikli araçlar gibi uygulamalarda daha büyük piller için alan sağlar. Ancak piller, maliyetler, tasarım güvenliği ve üretim teknikleri tarafından engellenmektedir. Elektrikli araçlarda (özellikle hızlı şarj olmaları, daha yüksek depolama kapasiteleri ve azaltılmış yangın riskleri nedeniyle) ve sabit depolama uygulamalarında kullanımları önerilmiştir. Ancak projeksiyonlar, bunların pazara sunulmasının 5 ila 10 yıl uzağında olduğunu göstermektedir.³³

Katı hal pilleri 2030'dan itibaren önemli bir rol oynarsa, enerji depolama uygulamalarında kullanılan bazı minerallerin talebi için sonuçlar doğabilir. Lityum talebi muhtemelen güçlü kalacaktır, çünkü mineral hala anot için gerekli olacaktır. Grafit anot lityumla değiştirildiğinde grafit talebi düşebilir.³⁴ En büyük belirsizlik katı elektrolitin bileşiminde yatmaktadır; önerilen çok çeşitli farklı seçenekler kalay, alüminyum, gümüş ve bor gibi bir dizi ek mineral kullanmaktadır (Varzi vd. 2016). Bu nedenle, yalnızca katı hal pillerinin gelecekteki pazar dağıtımının potansiyel ölçeğinde değil, aynı zamanda bu dağıtımın minerallere olan talep üzerindeki etkileri konusunda da büyük belirsizlik vardır.

Çinko-Hava Pilleri

Çinko-hava pilleri, Li-ion piller gibi diğer depolama seçeneklerine kıyasla yüksek özgül enerji yoğunlukları nedeniyle ortaya çıkan depolama sektöründe daha belirgin hale gelmiştir. Çinko-hava pilleri, güvenli, çevre dostu ve potansiyel olarak ucuz ve basit oldukları için önde gelen mineral-hava pil türü olarak ortaya çıkmıştır. Teknolojinin potansiyel avantajları, farklı pil teknolojilerinin pratik enerji yoğunluğunun karşılaştırılmasında görülebilir. Lityum-hava pilleri mümkündür ve daha yüksek enerji yoğunluklarına sahiptir, ancak çinko, güvenlik, geri dönüştürülebilirlik kolaylığı ve daha fazla küresel bulunabilirlik dahil olmak üzere bir dizi nedenden dolayı daha çekicidir. Çinko-hava pilleri potansiyel olarak hem elektrikli araçlarda (tek başına veya potansiyel olarak daha pratik olarak, bir Li-ion pil ile birlikte bir menzil genişletici olarak) hem de sabit depolamada kullanılabilir (Sherman vd. 2018). Örneğin, New York Urban Electric Power, talep yanıtı ve tepe tıraşı için 1 MWh şebekeye bağlı bir çinko-hava pili dağıtmak için bir dizi kamu sektörü ortağıyla birlikte çalışmaktadır.

Çinko-hava pilleri elektrikli araçlarda veya sabit depolamada büyük ölçekli dağıtıma ulaşırsa, Li-ion pillerde kullanılan minerallere (örneğin, lityum, grafit, nikel, mangan ve kobalt) olan talebi azaltabilirler. Talep daha sonra nikel, mangan ve çinkonun kendisine kayabilir, ancak potansiyel olarak lantan veya gümüş de kayabilir. Ancak büyük ölçekli dağıtımın ancak 2030 sonrasında olması muhtemeldir ve pillerin zamanlaması, ölçeği ve bileşimi oldukça belirsizdir.

33 Örneğin bkz. Meeus (2018).

34 Kurşun-asit aküler 40 watt-saat (Wh)/kg; Li-ion aküler 160 Wh/kg; ve çinko-hava aküler yaklaşık 350 Wh/kg sunmaktadır (Caramia ve Bozzini 2014).

Yüzen Açık Deniz Rüzgarı

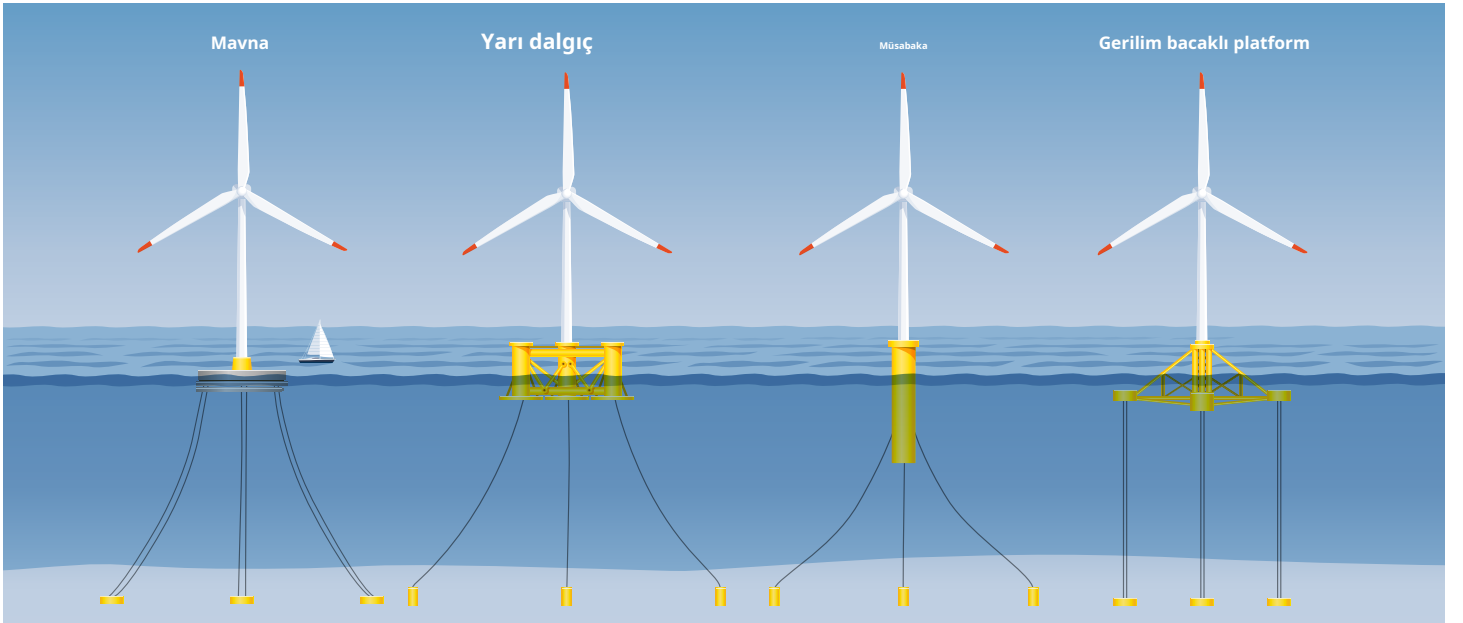
Son yıllarda açık deniz rüzgarı, özellikle Kuzey Denizi ve Çin'de hızlı bir büyüme yaşadı. Projelerin büyük çoğunluğu 60 metreden daha az derinlikteki sularda sabit temeller (genellikle monopiles) üzerine kuruludur. Daha derin sular için (1.000 metreye kadar) yüzen temeller kullanılabilir. Yüzen rüzgar teknolojisi hala emekleme aşamasında olsa da, açık deniz rüzgarının ölçeğini ve coğrafi kapsamını hızla artırmak için büyük bir gelecek potansiyeli sunmaktadır. Aynı zamanda, yüzen platformlar sabit muadillerinden çok daha ağır olma eğiliminde olduğundan, çelik için mineral talebini de artırabilir. ESMAP'ın Ekim 2019 tarihli bir raporuna göre, sekiz gelişmekte olan ülke (Brezilya, Hindistan, Fas, Filipinler, Güney Afrika, Sri Lanka, Türkiye ve Vietnam) 3.000 GW'den fazla açık deniz rüzgarı için teknik potansiyele sahiptir ve bunun üçte ikisi yüzen türbinler gerektirecektir (ESMAP 2019).

Yüzen türbinler ticarileşmeye yeni başlıyor. 30 MW'lık bir gösteri projesi olan Hywind, faaliyete geçti

Birleşik Krallık'ta 2017'den beri. Ve başka yerlerde bir dizi pilot proje başladı ve spar-buoy, spar-submersible ve tension-leg platform gibi farklı yüzen temel modelleri ortaya çıktı. Bu modellerin çoğu açık deniz petrol endüstrisindeki mevcut yüzen temel uygulamalarından yararlanıyor. Her modelin farklı avantajları ve dezavantajları ve mineral talebi için değişen etkileri var. Maliyetler de hızla düşüyor ve 2009'dan beri %86 oranında düşüş gösteriyor (ESMAP 2019).

Çelikten öte, yüzen açık deniz rüzgar türbinlerinden gelen diğer minerallere olan talep diğer rüzgar seçeneklerine benzer veya farklı olabilir. Mineral talebindeki en büyük fark, gereken iletim kablolarının uzunluğuyla ilgilidir. Yüzen açık deniz türbinlerinin nereye yerleştirileceği yalnızca kıyıdan uzaklığa değil, aynı zamanda deniz tabanına olan derinliğe de bağlıdır. Yüzen türbinlerin kıyıdan nispeten kısa bir mesafede yerleştirildiği alanlarda, kablolama mutlaka daha uzun olmayacaktır ve bakır talebi daha fazla olmayabilir. Ancak, yüzen açık deniz türbinleri daha büyük mesafelerde yerleştirilirse, bakır talebi artabilir.³⁵

Şekil 3.25 Yüzen Açık Deniz Rüzgarı

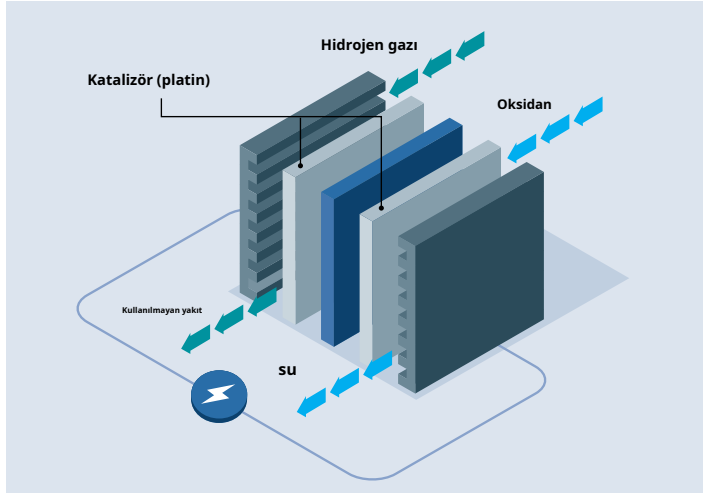


İllüstrasyon ESMAP (2019) ve diğer çeşitli kaynaklardan uyarlanmıştır.

Yakıt Hücreleri ve Hidrojen

Bu analizde yer almayan önemli bir potansiyel düşük karbon teknolojisi, temiz enerji geçişinde yakıt hücrelerinin ve hidrojenin kullanımı, alan ısıtması sağlamak ve çeşitli endüstriyel süreçlerin yanı sıra ulaşımı güçlendirmek için kullanılmasıdır. Düşük karbonlu ulaşım için bir güç kaynağı sağlamak üzere yakıt hücrelerinin ve hidrojenin kullanımı, karbon emisyonlarını düşürme potansiyeli (yeşil hidrojen kullanıldığı varsayılarak) ve hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olarak kullanılma potansiyeli nedeniyle bir süredir araştırılmaktadır. Bu vaade rağmen, hidrojen dağıtımı, yakıt hücrelerini ve bu hücelere güç sağlamak için gereken hidrojeni sağlamadaki yüksek maliyet engelleri ve altyapı kısıtlamaları nedeniyle sınırlandırılmıştır.

Şekil 3.26 Hidrojen Yakıt Hücresi



Çeşitli kaynaklardan uyarlanan çizim (örneğin, Setra, <https://www.setra.com/blog/whats-a-hydrogen-fuel-cell-and-how-does-it-work>).

Yakıt hücresi taşımacılığı, piller ve diğer düşük karbonlu teknolojilere kıyasla ona karşılaştırmalı bir avantaj sağlayan belirli özelliklere sahiptir. Yakıt hücreleri, pillerden daha yüksek ağırlık başına enerji yoğunluğu sunarak otobüsler ve ağır yük gibi araçlarda daha uzun mesafeli seyahat ve gelişmiş performans sağlar. Bu ulaşım biçiminin noktadan noktaya doğası, tüm elektrikli araçların şanzımanla elektrikleştirilmesi ihtiyacıyla ilişkili altyapı kısıtlamalarının bir kısmının üstesinden gelmeye de yardımcı olur

Altyapı. Tüm bu özellikler bir araya geldiğinde yakıt hücrelerinin neden ağırlıklı olarak otobüslerde ve orta ila ağır yük taşımacılığında ortaya çıktığını açıklıyor.

Yakıt hücrelerinin, platin veya rutenyumdan yapılmış bir katalizör kullananlar da dahil olmak üzere çeşitli alt teknolojileri vardır, ancak iki ana alt teknoloji vardır:

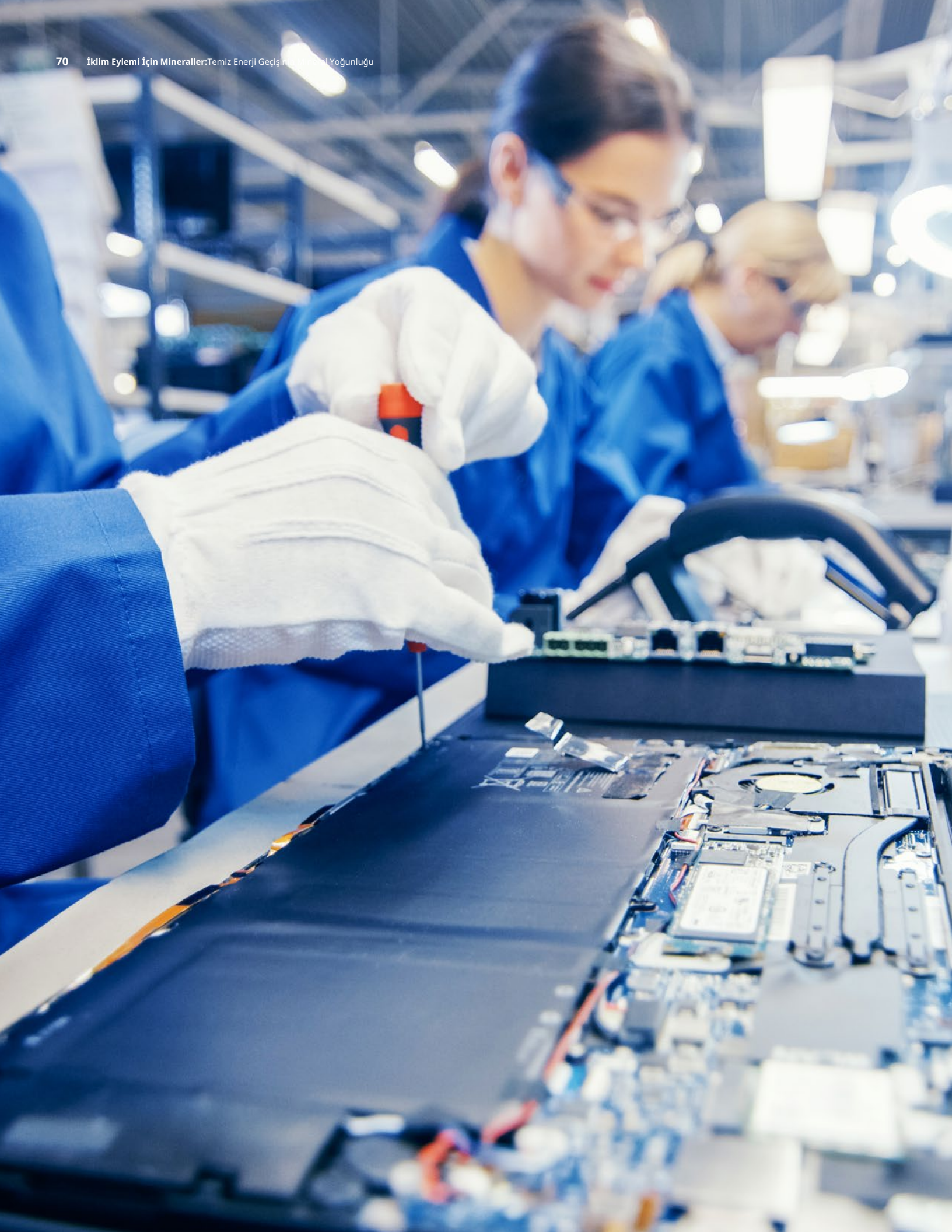
- **Proton değişim membranlı yakıt hücreleri** düşük ağırlıkları nedeniyle en yaygın kullanılan hidrojen alt teknolojisidir. Bu yakıt hücreleri düşük sıcaklıklarda çalışır ve hidrojen ve oksijen moleküllerini ayırmak için genellikle platinden yapılmış bir katalizör gerektirir. Bu alt teknoloji ayrıca %18 krom ve %8 nikelten oluşan krom çeliğini kullanır.³⁶
- **Katı oksit yakıt hücreleri** katalizör gerektirmez. Bu yakıt hücreleri çok yüksek sıcaklıklarda çalışır ve bu nedenle taşıma için uygun değildir; çoğunlukla sabit güç üretimi için kullanılırlar. Katı oksit yakıt hücresi katalizör olarak platine ihtiyaç duymasa da anotlarda, katotlarda ve elektrolitlerde itriyum, zirkonyum, lantan ve samaryum gibi diğer mineralleri kullanır.

Platin piyasası bir bütün olarak 2018'de, kısmen katalitik konvertörde platin kullanılan dizel otomobillerin tüketimindeki düşüğe atfedilebilen bir fazlalık gösterdi (Johnson Matthey 2019). Bu eğilimin devam etmesi muhtemeldir ve bunun yakıt hücrelerinden gelen yeterli taleple telafi edilip edilmeyeceği, dağıtım hızlarına ve ölçeklerine bağlıdır. Platin, yalnızca yakıt hücrelerinin değil aynı zamanda hidrojenin elektroliz üretiminde de önemli bir bileşen olduğu için gelecekteki enerji sistemlerinde daha fazla rol oynayabilir. Hidrojen, yakıt hücrelerinin ötesinde, örneğin uzay ısıtması gibi kullanımlar için bir enerji taşıyıcısı olarak büyürse, platin talebi güçlü bir şekilde artabilir.

Geri dönüşüm, hidrojenden gelen platin talebinde de önemli bir rol oynayacaktır. Platin grubu mineralleri yüksek oranda geri dönüştürülebilir ve %95'lik olası geri kazanım oranlarına sahiptir (Hagelüken 2012). Platin grubu minerallerinin yakıt hücresi uygulamalarından, özellikle ulaşımda, ne ölçüde geri dönüştürülebileceği henüz belli değil, ancak birincil platine yönelik genel talep üzerinde büyük bir etkisi olabilir.³⁷

36 Tahminler, potansiyel gelecekteki verimlilik artışlarının, 2008'deki 0,1 kg/KW'dan 2025'e kadar 0,02 kg/KW'a düşecek şekilde çeliğin payının azaltılacağını vurgulamaktadır (Moss vd. 2013).

37 İnce kimyasal üretiminde katalizör olarak altı platin grubu metalin mevcut kullanımını %80-90 geri dönüşüm oranları göstermektedir. Otomotiv uygulamalarındaki geri dönüşüm oranları daha düşüktür, ancak yine de %50-60 civarındadır. Elektrik uygulamalarından geri dönüşüm, %10'un altındaki oranlarla daha zor olduğu kanıtlanmıştır.



Genel Mineral Talebi

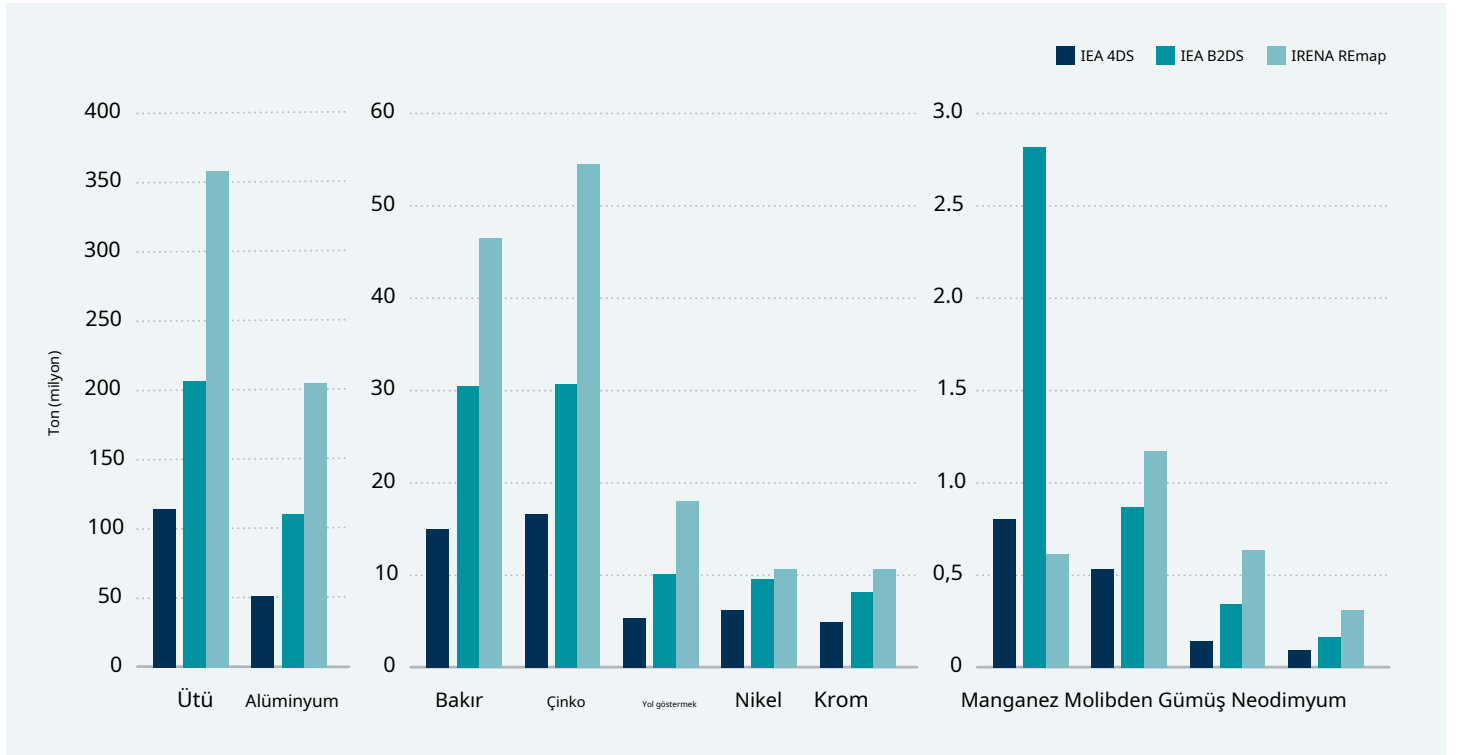
2050'ye kadar

Bu bölüm, altı teknoloji tabanlı azaltma senaryosundan tüm 17 mineraldeki genel talebi, temiz enerji geçişinin mineraller üzerindeki etkisini temel senaryoyla karşılaştırmak için göstermektedir. Şekil 4.1, 2050'ye kadar mineraller için toplam kümülatif talebi göstermektedir. **elektrik üretimi** yalnızca IRENA'nın REmap ve IEA'nın temel senaryosu (4DS) ve B2DS kapsamındaki teknolojiler (tekrar belirtelim, enerji depolama rakamları sağlanmamıştır çünkü temel ve IRENA senaryoları için veriler mevcut değildir).

Rakamlar, çeşitli enerji teknolojilerinde kullanılan 11 minerale kadar genel bir talep artışı olduğunu gösteriyor; demir ve alüminyum en yüksek mutlak artışı gösterirken, bakır ve çinko bunu takip ediyor. Bu eğilimler, her teknoloji tabanlı azaltma senaryosunun göreceli iddiasıyla mineral talebinde göreceli bir artış olduğunu gösteriyor. Bu, önceki bulguların kritik sonuçlarından birini doğruluyor: Düşük karbonlu enerji dönüşümü yalnızca maddi olarak yoğun olmakla kalmıyor, aynı zamanda bu yoğunluk karbonsuzlaştırma seviyesiyle artıyor.

Çoğu mineral, IRENA senaryosu altında, IEA muadilleriyle karşılaştırıldığında, IRENA senaryosunun rüzgar ve güneş PV teknolojilerine daha fazla bağımlı olması nedeniyle en yüksek talep seviyelerini göstermektedir. Temel istisna, CCS'de kullanımı nedeniyle 4DS ve B2DS senaryoları altında çok daha yüksek talep seviyeleri gösteren manganezdır; IEA bunu IRENA'dan daha olası görmektedir.

Şekil 4.1 Sadece 4DS, B2DS ve REmap Altında 2050'ye Kadar Enerji Teknolojileri İçin Minerallere Yönelik Toplam Talep (Depolama Olmadan)



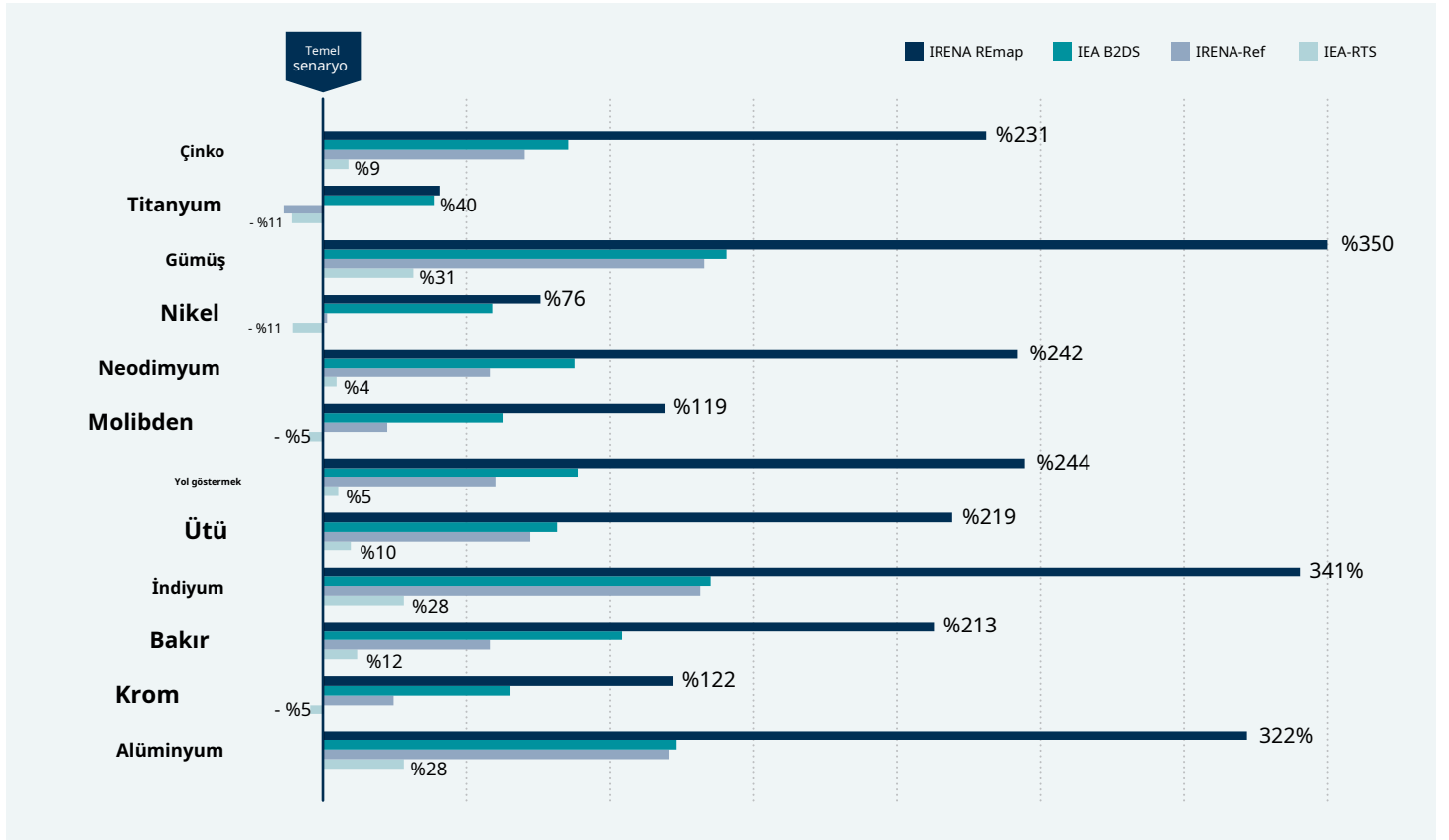
Not: Temel senaryo = 4 derece senaryosu, B2DS = 2 derece ötesi senaryosu, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı, IRENA = Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, REmap = yenilenebilir enerji yol haritası senaryosu.

Şekil 4.2, mineral talebi için senaryolara ve çıkarımlara bakmanın başka bir yolunu sunar: yalnızca elektrik üretim teknolojilerinin tedarikinde temel senaryodan beklenen değişim yüzdesi. REmap senaryosunda, alüminyum, indiyum ve gümüşe olan talebin temel senaryodan 2050'ye kadar %300'den fazla artması beklenirken, bakır, demir, kurşun, neodimyum ve çinkoya olan talebin %200'den fazla artması bekleniyor. Buna karşılık, IEA'nın en iddialı senaryosunda (B2DS), beşten fazla minerale olan talebin temel senaryodan 2050'ye kadar iki katına çıkması bekleniyor.

Yıllık Talep

Bugüne kadar sunulan sonuçlar, düşük karbonlu geçişin zorluğunu karşılamak için gereken minerallerin kümülatif ölçeğini vurguladı. Ancak, bu kümülatif ölçeği karşılamak için gereken yıllık yolu not etmek önemlidir. Bu, düşük karbonlu geçiş için gereken mineral stoklarına yapılan tek seferlik bir yatırım değildir. Bunun yerine, gelecekte öngörülen daha yüksek elektrik talebini karşılamak için gereken, sürekli artan yıllık bir gereksinimdir. Bu evrim, yıllık talep oranlarının 2050'ye kadar arttığını vurgulayan Şekil ES.1'de görülebilir. Artış oranı 2050'ye kadar yavaş yavaş azalıyor, ancak yine de 2050'deki yıllık talebin 2020'dekinden çok daha fazla olduğu bir tablo ortaya koyuyor.

Şekil 4.2 RTS, Ref, B2DS ve REmap'te 2050'ye Kadar Enerji Teknolojilerinden (Depolama Olmadan) Minerallere Yönelik Talepteki Göreceli Değişim, Temel Senaryoya Göre

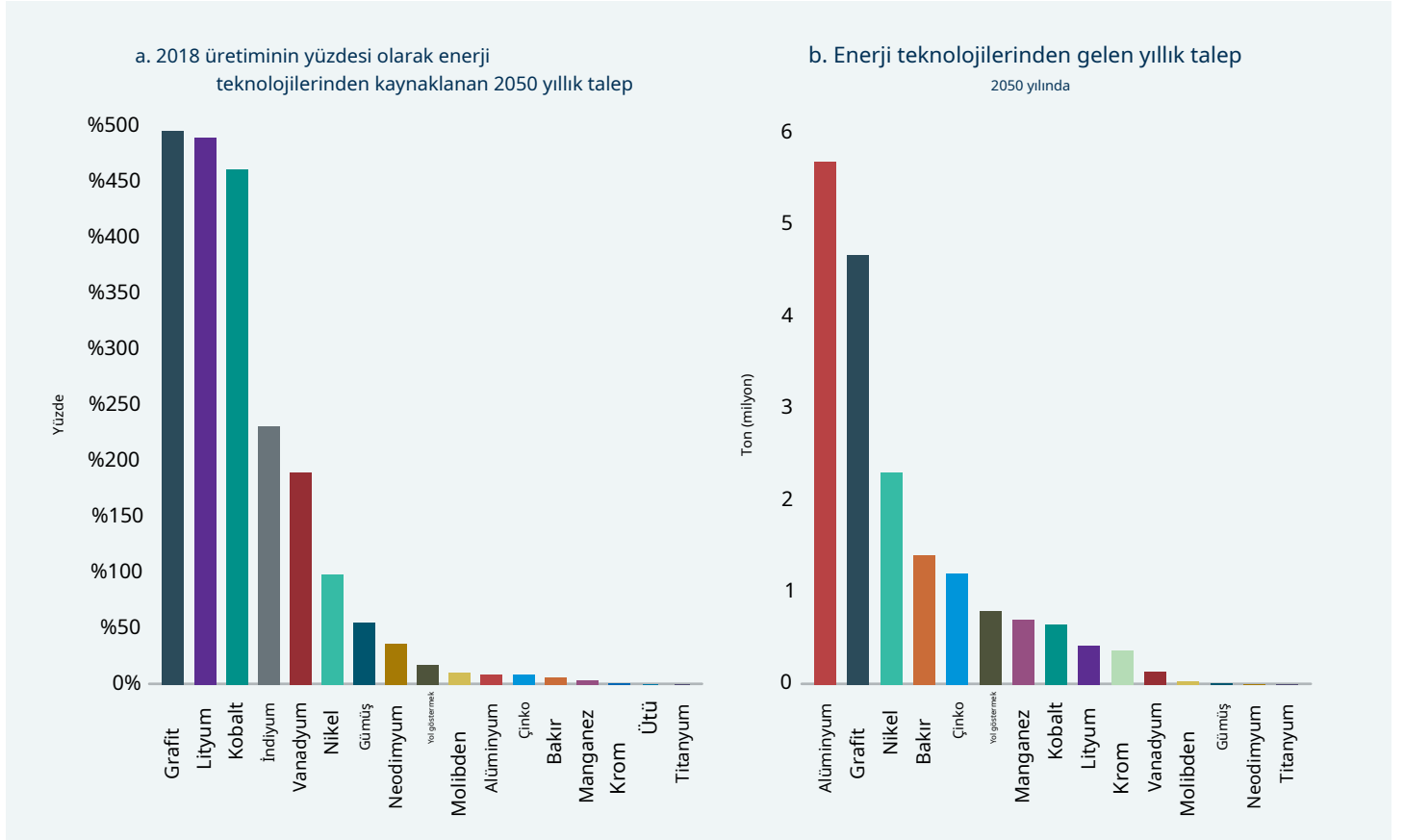


Not: Temel senaryo = 4 derece senaryosu, B2DS = 2 derece ötesi senaryosu, IEA = Uluslararası Enerji Ajansı, IRENA = Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı, Ref = referans senaryosu, REmap = yenilenebilir enerji yol haritası senaryosu; RTS = referans teknoloji senaryosu.

Modelde ele alınan 17 mineralin hepsi enerji sektörü dışındaki farklı uygulamalar için kullanıldığından, bu analiz 2DS kapsamındaki 10 enerji teknolojisinden gelen mineral talebini karşılaştırır ve 2018 üretim rakamlarıyla karşılaştırır. Şekil 4.3, panel a, talebin çoğunluğunun grafit, lityum ve kobalt olmak üzere pil minerallerinden geldiği 2018 üretim rakamlarına dayalı mineral talebindeki yüzdelik artışı sağlar. Bu minerallere, mevcut üretim seviyelerinin önemli ölçüde ötesinde, beş katına kadar ölçeklerde ihtiyaç duyulacaktır. Şekil 4.3, panel b, 2050'ye kadar mineral üretimindeki yıllık mutlak artışı gösterir ve üretim rakamları alüminyum, grafit ve nikel için en yüksek seviyededir.

Grafit talebi, en yaygın olarak kullanılan otomotiv, şebeke ve merkezi olmayan pillerde bulunan anotları oluşturmak için grafitte ihtiyaç duyulduğundan hem mutlak hem de yüzde olarak artmaktadır. 2050 yılına kadar yıllık yaklaşık 4,5 milyon ton grafit üretilmesi gerekirken, toplamda 68 milyon ton grafitte ihtiyaç duyulmaktadır; grafit talebi ise 2018 üretim rakamlarına göre neredeyse %500 oranında artarak, grafitin temiz enerji geçişinde oynadığı kritik rolü göstermektedir ve en yaygın olarak kullanılan pil teknolojisi olan Li-ion pillerde kullanılmaktadır.

Şekil 4.3 2050'de Sadece Enerji Teknolojilerinden 2DS Altında Tahmini Yıllık Mineral Talebi, 2018 Üretim Seviyeleriyle Karşılaştırıldığında



Not: 2DS = 2 derece senaryo.

Piyasa Dinamikleri ve Mineral Talebi

Bu analizde üretilen talep tahminleri, arzın bu talebi karşılamak için tam olarak ayarlanabileceği ve hiçbir ikame veya verimlilik iyileştirmesinin olmayacağı varsayıldığında ortaya çıkacak taleptir. Daha yüksek talep seviyeleri daha yüksek fiyatlara yol açacak, arzda artışlara neden olacak ancak teknik olarak mümkün olduğunda diğer minerallerin ikamesine ve verimlilik iyileştirmelerinde yeniliğe yol açacaktır. Bu bölümde sunulan görünüm, düşük karbonlu bir geçişin mineral piyasaları üzerindeki tam etkisinin anlaşılmasında ilk sütun olarak görülmelidir. Bu sonuçlar, arz yönleri ve ikame ve teknik verimlilik olasılıkları hakkında daha fazla araştırma ile birleştirilmelidir.

Enerji teknolojilerinden kaynaklanan gelecekteki talep mevcut üretimi aşmasa bile, enerji teknolojilerinden kaynaklanan talebin bu minerallerin neredeyse tamamına yönelik toplam talep içindeki payının artması muhtemeldir; bu da önümüzdeki birkaç on yıl içinde bu minerallere olan göreceli erişilebilirlik açısından sonuçlar doğurmaktadır.³⁸ Örneğin, alüminyumun yüzdelik payı nispeten küçük görünüyor, ancak mineralin mutlak sayıları lityumdan çok daha büyük (en yüksek yüzdelik artış) - 2050'de yaklaşık 5,6 milyon ton, aynı yıl lityum için 0,4 milyon tonla karşılaştırıldığında. Mutlak talep o kadar yüksek olabilir ki, alüminyum endüstrisinin düşük karbonlu geleceğe hizmet etmede beklenen talebi karşılama kapasitesi üzerinde baskı yaratabilir.

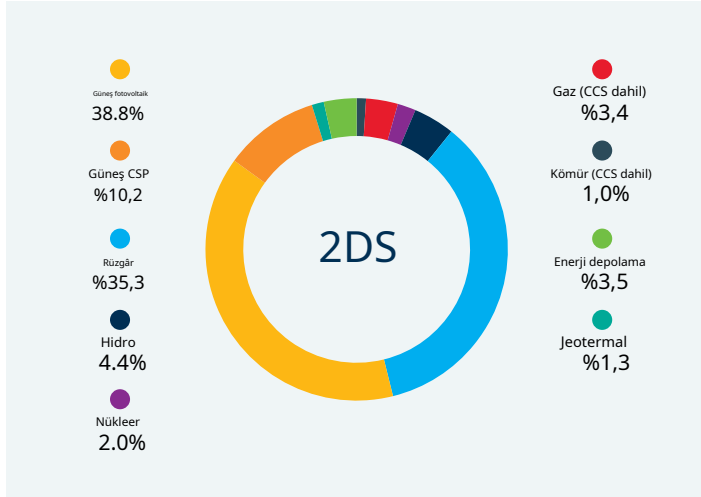
Kesişen Mineraller

Çapraz kesen mineraller, çok çeşitli enerji üretim ve depolama teknolojilerinde kullanılan mineralleri ifade eder. Bu raporun önceki kısımlarında, lityum, grafit, gümüş ve alüminyum gibi minerallere olan talebin 2050'ye kadar bir veya iki belirli enerji teknolojisinde yoğunlaşacağı belirtilmişti. Bu bölüm ayrıca, her teknoloji tabanlı azaltma senaryosunda hangi teknolojinin veya alt teknolojinin en çok kullanıldığına bakılmaksızın minerallerin genel talebi üzerinde etkileri olduğu için, daha geniş bir enerji teknolojileri yelpazesinde kullanılan minerallere de odaklanmaktadır.

Bakır, krom ve molibden, sekiz veya daha fazla teknolojide kullanılan minerallere örnektir ve bakır, modelde ele alınan tüm enerji üretim ve depolama teknolojilerinde kullanılır. Talebin etkilenmesi için belirli bir enerji teknolojisinin dağıtımına bağlı olmayan minerallerin bir alt kümesi oldukları için çapraz kesim minerallerine dikkat etmek önemlidir. Başka bir deyişle, teknolojiye veya alt teknoloji dağıtımındaki değişiklikler, çapraz kesim minerallerinin genel talebi üzerinde büyük olasılıkla asgari bir etkiye sahip olacaktır.



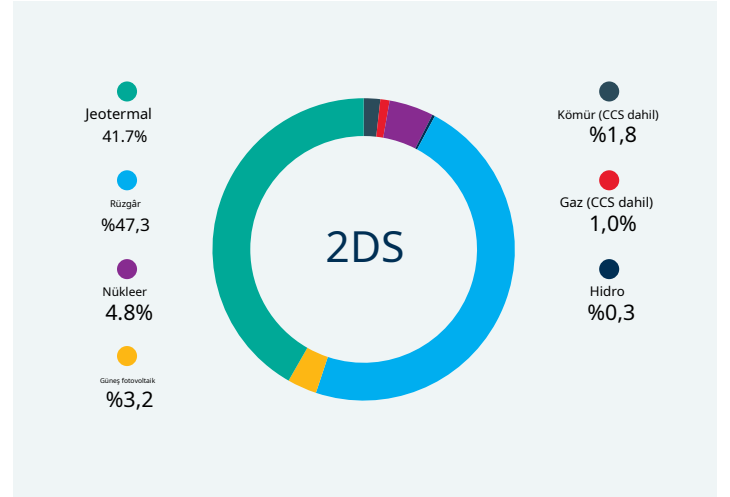
Şekil 4.4 2DS Altında 2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam Bakır Talebi



Not: 2DS = 2 derece senaryosu, CCS = karbon yakalama ve depolama, CSP = yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, PV = fotovoltaik.

Şekil 4.4, 2050 yılına kadar elektrik üretimi ve enerji depolama teknolojilerinden gelen toplam kümülatif bakır talebini göstermektedir. Talebin en büyük payı güneş PV (%39) ve rüzgardan (%35) gelmektedir, özellikle açık deniz rüzgarı için. Güneş PV ve rüzgar birlikte, 2DS'deki toplam bakır talebinin %74'ünü temsil etmektedir. Bu, iletim sistemleri gibi altyapı gereksinimlerini içermediği için temiz enerji geleceğine hizmet etmede bakır talebinin önemli ölçüde hafife alınmasıdır. Uluslararası Bakır Birliği, rafine bakırın %60'tan fazlasının elektrik ve ısıtma sistemlerini desteklemek için kullanıldığını tahmin etmektedir.³⁹

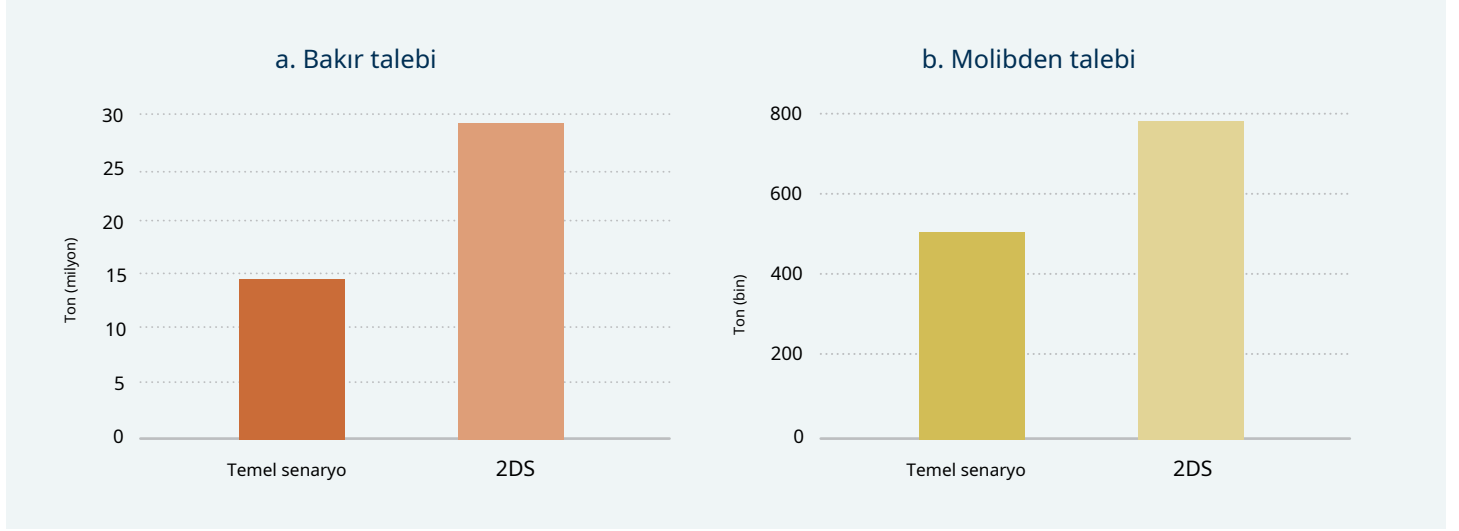
Şekil 4.5 2DS Altında 2050'ye Kadar Enerji Teknolojisine Göre Toplam Molibden Talebi



Not: 2DS = 2 derece senaryosu, CCS = karbon yakalama ve depolama, CSP = yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, PV = fotovoltaik.

Molibden, özellikle rüzgar ve jeotermal olmak üzere çeşitli düşük karbonlu teknolojiler için gerekli olan bir diğer kritik mineraldir. Elektrik üretimi ve enerji depolama teknolojilerinden molibdene olan talebin en büyük payı rüzgardan (%47,3) ve jeotermalden (%41,7) gelirken, diğer tüm üretim ve enerji depolama teknolojileri birlikte yalnızca küçük bir paya (%11) sahiptir (Şekil 4.5). Bu, molibdenin tipik olarak bir rüzgar türbininin mineral bileşiminin yalnızca %0,15'ini oluşturmasına rağmen böyledir. Rüzgar ve jeotermal birlikte, 2DS kapsamındaki molibden talebinin %89'unu oluşturmaktadır. Hangi rüzgar alt teknolojisine en büyük talebi karşıladığının belirlenmesine olanak tanıyan net veriler eksiktir.

Şekil 4.6 2050'ye Kadar Toplam Bakır ve Molibden Talebi (2DS, Temel Senaryo)



Not: 2DS = 2 derece senaryo.

Bakır ve molibden her ikisi de kesişen mineraller olsa da, ikisi arasında önemli bir fark vardır: Bakır, çok çeşitli endüstrilerde kullanılan bir temel metaldir.⁴⁰ Molibden ise genellikle bakırın yan ürünü veya yardımcı ürünü olarak geri kazanılan bir niş mineral olarak kabul edilir (Şekil 4.6).⁴¹ Fark üretim rakamlarında da görülebilir. 2018'de 21 milyon ton bakır üretilirken, sadece 0,3 milyon ton molibden çıkarıldı; bu iki mineral arasında 20,7 milyon ton fark demektir. Başka bir deyişle, her iki mineral de çok çeşitli enerji teknolojilerinde kullanılmasına ve güneş PV, rüzgar ve jeotermal teknolojilerindeki önemleri göz önüne alındığında düşük karbonlu bir gelecek yoluna katkıda bulunacak olmasına rağmen, 2018'de molibden'e göre %7.000 daha fazla bakır üretildi.

Daha önce de belirtildiği gibi, bakır rakamları büyük olasılıkla büyük ölçüde hafife alınmıştır; bakır talebinin, yeni ulaşım altyapısı ve enerji sistemleri için ihtiyaç duyulan yeni iletim altyapısı ve artan küresel nüfus nedeniyle önemli ölçüde artması muhtemeldir.

40 Bu durumda, bakır yaygın olarak kullanıldığı ve ucuz olduğu için bir temel metal olarak anılır. Gümüş veya altın gibi değerli bir metal olarak kabul edilmez. Ancak, tutarlılık için, bu rapordaki tüm mineraller ve metaller mineral olarak anılır.

41 "Molibden", Mineraller Veritabanı, Mineraller Eğitim Koalisyonu, 2019'da erişildi, <https://mineralseducationcoalition.org/minerals-database/molybdenum/>.

Talep Risk Matrisi

Bu analiz temel bir unsur, genel mineral talebinin her bir mineralin teknoloji konsantrasyonundan veya mevcut üretim rakamlarına kıyasla enerji teknolojilerinden gelen büyümedeki artıştan nasıl etkilenebileceğini anlamaktır. Mineral talebinin göreceli önemi, *çapraz kesim* Bu, alakalı olmak için belirli bir veya iki teknolojinin dağıtımına bağlı olmadıkları anlamına gelir.

Atalep risk matrisi 2DS altında, 2018 üretim rakamlarına (mutlak ve yüzdelik rakamlar) göre her mineral için teknoloji konsantrasyon seviyelerine dayalı bu eğilimlerin genel bir görünümünü sağlamak için geliştirilmiştir. Matrisi oluşturan iki endeks, mineraller arasındaki karşılaştırmaları kolaylaştırmak için oluşturulmuştur:

- **Ağırlıklı kapsam-konsantrasyon endeksi**(teknoloji konsantrasyon endeksi): Bu endeks, minerallerin modeldeki birkaç teknolojiye ne kadar kesişen veya yoğunlaşan olduğunu yakalar. En kesişen mineral, yani bakır için 1 değeri verilir ve diğer tüm minerallerin puanları bakıra göre dir. Endeks, iki öğenin eşit ağırlıklandırılmasıyla hesaplanır: (1) bir mineral gerektiren teknolojilerin sayısı ve (2) tek bir teknolojiden gelen minerallere olan talebin payı. Varsayımlar, ek B'de daha ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

- **2018-2050 üretim-talep endeksi**(talep endeksi): Bu endeks, enerji teknolojilerinden gelen talebi karşılamak için üretimin ölçeklendirilmesi gereken ölçeği yakalar. Endeks iki bölümden oluşur:
 - *Göreceli talep* 2050 yılında enerji teknolojilerinden kaynaklanan talebin, 2018 yılındaki toplam mineral üretimiyle karşılaştırılmasıyla elde edilmiştir. Daha sonra 0 ile 1 arasında bir endeks hesaplanır ve en yüksek göreceli talebe sahip mineral olan grafitte 1 puan verilir ve diğer her minerale grafitte göre bir puan verilir.
 - *Mutlak talep* 2050'de her mineral için enerji teknolojilerinden gelen mutlak talep seviyesi ile yakalanır. En yüksek seviyeye sahip minerale (alüminyum) 1 puan verilir ve diğer tüm minerallere alüminyuma göre 0 ile 1 arasında bir puan verilir.

Endeksin iki bölümüne, genel bir üretim-talep endeksi hesaplamak için eşit ağırlık verilir. Daha sonra iki endeks birlikte çizilerek dört kategori veya kadran elde edilir. Kadranların bir dökümü ve mineral talebinin olası yorumu **enerji teknolojileri** Aşağıda Şekil 4.7 ve Ek B'de görüldüğü gibi;



Şekil 4.7 2DS Altında Talep Risk Matrisi



1. Kadran Orta Etkili Mineraller:

1. kadranda yer alan mineraller, talepten en az etkilenen minerallerdir. Bu mineraller yalnızca küçük bir enerji teknolojisi yelpazesinde yer alır ve talepteki beklenen artışlar 2018 üretim seviyelerinin küçük bir yüzdesidir. Bu matrisin yalnızca enerji teknolojilerinden gelen mineral talebini karşıladığını ve arz risklerini veya enerji sektörü dışındaki diğer endüstrilerden gelen talebi dikkate almadığını vurgulamak önemlidir.

- Bu, bu minerallerin belirli alt teknolojilerin dağıtımı için önemli olmadığı anlamına gelmez. Neodimyum, açık deniz rüzgarının dağıtımı için kritik öneme sahip nadir bir topraktır.

2. Kadran Yüksek Etkili Mineraller:

2. kadranda yer alan mineraller önemlidir çünkü yalnızca az sayıda teknolojide yer alsalar da, gelecekteki talep düzeyleri 2018 üretim düzeylerinden çok daha yüksektir. Kullanılan teknolojilerde veya alt teknolojilerde yapılan değişiklikler, genel talep düzeyleri üzerinde büyük etkilere sahip olabilir. Bunlar ağırlıklı olarak (ancak yalnızca değil) enerji depolama teknolojilerinde kullanılan minerallerdir.

- Bu analize göre sadece enerji depolamada kullanılan lityumun, 2DS'e göre 2050 talebini karşılamak için 2018 üretim seviyelerinin yüzde 488'ine ihtiyaç duyması bekleniyor.⁴²

3. Kadran Yüksek Etkili, Kesitsel Mineraller:

3. kadranda yer alan mineraller kritik öneme sahip çünkü 2018 üretim seviyelerinden gelen talep önemli ölçüde artıyor, ancak aynı zamanda çeşitli teknolojilerde kullanımı yaygın.

- Alüminyum, hem enerji üretimi hem de depolama teknolojileri için yaygın olarak kullanılır. Bu nedenle, hangi teknoloji tabanlı azaltma senaryosunun elde edileceğinden bağımsız olarak alüminyuma olan talebin kritik olması beklenmektedir. Alüminyumun enerji teknolojilerinden gelen genel talep seviyesi, 2018 üretim seviyelerinin yüzde 10'undan az olsa da, diğer 16 mineralle karşılaştırıldığında en yüksek üretim seviyelerine sahiptir ve kümülatif üretim, öncelikle güneş PV'sini ve ardından diğer enerji teknolojilerini tedarik etmek için 2050 yılına kadar 102 milyon tona ulaşacaktır.

4. Kadran Kesişen Mineraller:

4. kadradaki mineraller önemlidir çünkü enerji teknolojilerinden üretime göre genel talepleri (yüzde olarak) 2. veya 3. kadradaki mineraller kadar dramatik olmasa da, çok çeşitli teknolojilerde kullanılırlar ve belirli bir teknolojiye bağlı değildirler. Bu nedenle, hangi teknolojiler veya alt teknolojiler kullanılırsa kullanılsın, bu minerallere olan talep var olacaktır.

- Örneğin, 1 endeksi ile gösterilen bakır, modelde kapsanan 10 enerji teknolojisinin hepsinde kullanılmaktadır ve bu nedenle teknoloji tabanlı azaltma senaryolarındaki önemli değişikliklerden talebin en az etkileneceği mineraldir.



Mineral Geri Dönüşümü, Yeniden Kullanım

Geri dönüşüm, düşük karbonlu bir geçişi sağlamak için minerallere olan talebi karşılamada artan bir rol oynayabilir. Bugün itibarıyla en çok geri dönüştürülen mineraller demir ve çeliktir (AGI 2017). Önceki bölümde talep risk matrisi altında haritalanan mineraller, teoride, enerji teknolojileri kullanım ömrünün sonuna ulaştığında bu minerallerin bir kısmının kısmen geri dönüştürülüp dönüştürülmediğine bağlı olarak farklı kadranslara kayabilir ve çıkarılması gereken mineral miktarını azaltabilir. Mineral geri dönüşümü fırsatlarını keşfetmek önemlidir, özellikle de mineral talebi en iddialı iklim yolları altında arttıkça.

Birincil mineraller, enerji teknolojileri de dahil olmak üzere ürünler üretmek için kullanılmadan önce çıkarılıp nihai bir mineral ürüne işlenen mineralleri ifade ederken, ikincil mineraller çeşitli ürünlerden geri dönüştürülmüş mineralleri ifade eder. Modelin geri dönüşümün potansiyel rolüne ilişkin tahmini projeksiyonları mineral geri dönüşümünün ekonomisini veya geri dönüşümün teknik sınırlamalarını dikkate almaz. Geri dönüşümün maliyeti, ne kadar geri dönüşümün gerçekleştiğini belirlemede önemli bir faktördür. Birincil mineral mevcutsa,

geri dönüştürülmüş malzemeden daha ucuzsa, çok az geri dönüşüm gerçekleşecektir. Politika desteği ve teknolojik iyileştirmeler, mineral geri dönüşüm endüstrisinin maliyetleri düşürmek ve düşük karbonlu teknolojilerden gelen talebi karşılamak için yeniliği teşvik etmek üzere nasıl geliştiğinde kritik bir rol oynayacaktır.

Geri dönüşüm

Mevcut mineral geri dönüşümü verilerinin sınırlamaları göz önüne alındığında, geri dönüşümün mineral talebi üzerindeki potansiyel etkisini analiz etmek ve diğer bölümlerle tutarlılık sağlamak için yalnızca beş mineral seçilmiştir. Alüminyum özellikle vurgulanmıştır çünkü neredeyse tüm enerji üretim teknolojileri ve depolamada kullanılmaktadır ve 2018 üretim seviyelerine göre önemli talep etkilerine sahiptir (3. kadrans - yüksek etkili, kesişen mineraller). Lityum ve kobalt önemlidir çünkü bu minerallere olan talep 2018 üretimine göre sırasıyla %488 ve %460 artmıştır (2. kadrans - yüksek etkili mineraller). Nikel ve bakır sergilenmiştir çünkü her iki mineral de kesişen minerallerdir (4. kadrans - kesişen mineraller) ve 2DS altında mutlak veya göreceli sayılardaki talep artışları, niş minerallere göre önemli düzeydedir.

Bölüm 1'in Geri Dönüşüm, Yeniden Kullanım bölümünde tartışıldığı gibi, analiz için iki geri dönüşüm oranı önemlidir:

- **Yaşam Sonu (EOL):** Bir ürünün kullanım ömrü sonunda geri kazanılan ve yeni malzemeye geri dönüştürülen malzeme yüzdesi
- **Geri dönüştürülmüş içerik (RC):** Yeni bir ürünün ikincil (geri dönüştürülmüş) malzeme kullanılarak yapılan yüzdesi

2DS kapsamında geri dönüşümün etkileri Şekil 4.8–4.10'da görülebilir. Bu grafiklerde, ilgili mineraller için nihai kullanım talebi, esas olarak bir rüzgar türbinine veya güneş panellerine girmesi gereken mineral miktarı gösterilmektedir. Şekiller, mevcut RC oranları 2050'ye kadar aynı kalırsa gereken birincil mineral miktarını göstermektedir.⁴³2050 yılına kadar EOL oranlarının %100'e çıkması durumunda (lityum oranları, 1. bölümdeki Geri Dönüşüm, Yeniden Kullanım bölümünde açıklandığı gibi farklı şekilde tahmin edilmektedir) durumla birlikte.

Şekil 4.8 alüminyum ve bakır geri dönüşümü için etkileri göstermektedir. 2DS kapsamındaki enerji teknolojilerinden gelen talebi karşılamak için yaklaşık 102,8 milyon ton alüminyuma ihtiyaç vardır. RC oranları bugünün %35 seviyelerinde sabit kalırsa, 42,3 milyon ton ikincil veya geri dönüştürülmüş üretimle karşılanacak, kalan 60,5 milyon ton ise boksit çıkarımından gelen birincil üretimden gelecektir.

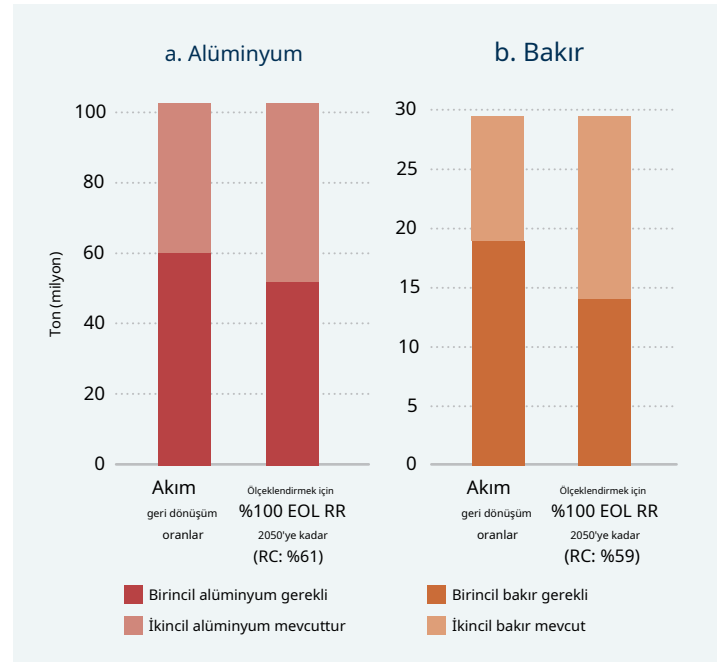
EOL oranları 2050'ye kadar %100'e çıkarsa -ki bu da mevcut tüm alüminyumun geri dönüştürüldüğü anlamına gelir- o zaman RC oranları %61'e çıkar. Teknolojileri tedarik etmek için gereken nihai alüminyum miktarı değişmez, ancak ikincil üretimle karşılanan miktar %24 daha az birincil üretimle 57 milyon tona çıkar.⁴⁴Birincil üretime olan talep, %100 EOL oranıyla bile tamamen ortadan kalkmıyor, çünkü ikincil alüminyum üretimi mevcut hurda arzıyla sınırlı.

Ekonominin doğasında yapısal değişiklikler meydana gelirse, yani hurda bulunabilirliğinin genel mineral talebine oranı değişirse, RC oranlarını %100 EOL oranlarından artırma potansiyeli vardır ve bu da birincil mineral tüketimini azaltır.

talebi daha da artırabilir. Hurda bulunabilirliğini artıracak bu tür değişikliklere örnek olarak, daha iyi mineral geri kazanımını mümkün kılmak için ürün tasarımında yapılan değişiklikler ve enerji sektörü dışındaki diğer sektörlerden minerale olan talebin büyük oranda düşmesi verilebilir.

Özellikle bakır için, mevcut RC oranlarının %28,5 olduğu varsayılmaktadır (Şekil 4.8) ve 2050'ye kadar %100 EOL'ye bir artış, RC oranlarını %59'a çıkararak enerji teknolojilerinden birincil bakıra yönelik genel kümülatif talebi %26 oranında azaltır. EOL oranlarını %100'e çıkarmak her iki mineral üzerinde de benzer bir etkiye sahip olsa da, alüminyuma yönelik birincil talep, 2050'ye kadar alüminyum için 46 milyon tonun üzerinde ve bakır için 14 milyon tonun üzerinde olmak üzere birincil bakır talebini üç kattan fazla aşmaktadır. Yine, iletim rakamları bu analize dahil edilmediğinden bakır rakamları hafife alınmış olabilir.

Şekil 4.8 2DS Kapsamında 2050'ye Kadar Geri Dönüşümün Alüminyum ve Bakır İçin Toplam Talep Üzerindeki Etkisi

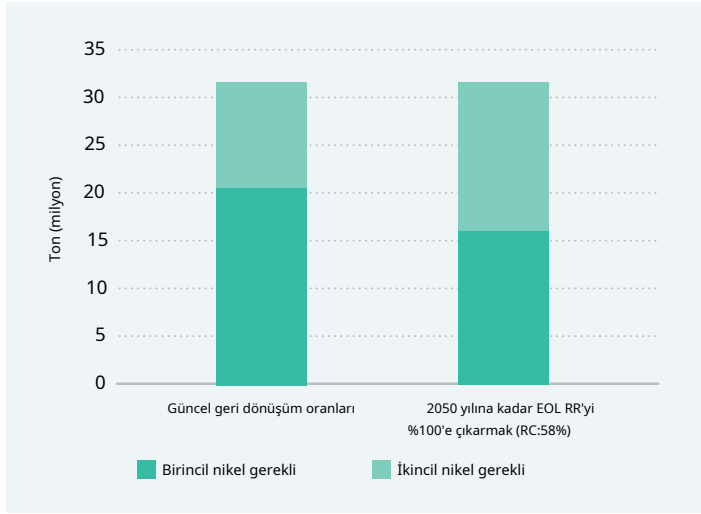


Not: 2DS = 2 derece senaryo.

⁴³ Farklı mineraller için küresel geri dönüşüm oranlarına ilişkin veriler eksiktir ve literatür taraması geniş bir tahmin yelpazesi göstermektedir.

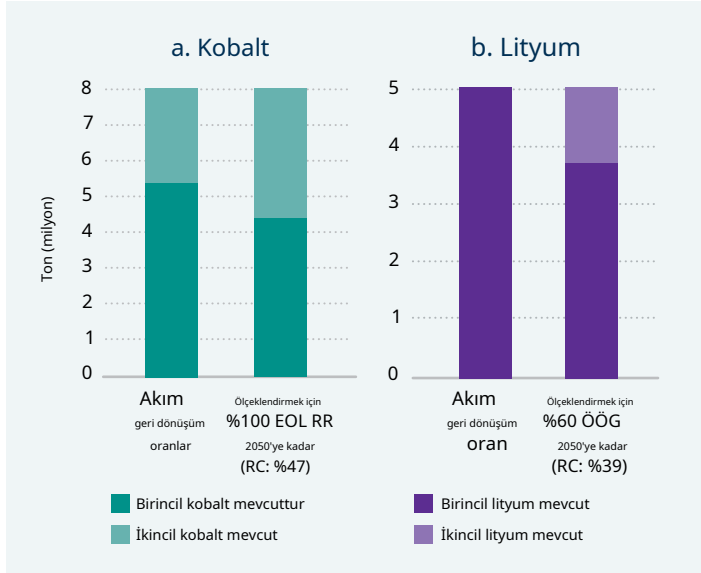
⁴⁴ Birincil talepteki değişim iki faktörün bir fonksiyonudur: son kullanım alüminyum talebinin zaman yolu ve geri dönüşüm oranlarının zaman yolu. Sonuçlar basmakalıp görünse de, aslında geri dönüşüm oranlarının ne kadar hızlı arttığına ve son kullanım talebinin çoğunluğunun ne zaman gerçekleştiğine bağlıdır. Son kullanım talebinin daha büyük payının 2050'ye yakın gerçekleştiği göz önüne alındığında, geri dönüşüm oranları burada varsayılan doğrusal eğilimden daha hızlı artarsa, genel birincil talep azalacaktır. Benzer şekilde, daha yüksek geri dönüşüm oranlarına daha yavaş bir geçiş, daha yüksek seviyelerde birincil alüminyum tedarik edilmesini gerektirecektir.

Şekil 4.9 2050'ye Kadar 2DS Altında Geri Dönüşümün Nikel İçin Toplam Talep Üzerindeki Etkisi



Not: 2DS = 2 derece senaryo, EOL = kullanım ömrü sonu, RC = geri dönüştürülmüş içerik, RR = geri dönüşüm oranı.

Şekil 4.10 2DS Altında 2050'ye Kadar Kobalt ve Lityum İçin Toplam Talep Üzerindeki Geri Dönüşümün Etkisi



Not: 2DS = 2 derece senaryo.

Nikel, enerji depolamada, Li-ion pillerde kullanımda ihtiyaç duyulduğu ve ayrıca çok çeşitli üretim teknolojilerinde kullanıldığı için yeşil enerji geleceğine geçiş için önemli bir metaldir ve genellikle gerekli çeliğin bir bileşeni olarak kullanılır. Nikel veya hurda nikelin RC oranları değişir, ancak %35'e odaklanır. RC oranları bu seviyede kalırsa, 2050 yılına kadar nikel için birincil talep 20 milyon tonun biraz üzerinde olacaktır (Şekil 4.9). Bakır ve alüminyum için benzer varsayımları izleyerek ve EOL oranlarının 2050 yılına kadar %100'e yükseldiğini varsayarak, RC oranları %58'e yükselir ve nikel için birincil talep bugünkü RC oranlarına kıyasla %23 düşer.

Pil mineralleri kobalt ve lityumun çok farklı geri dönüşüm yörüngeleri vardır. Kobaltın şu anda RC'si %32'dir ve birincil kobalt 2050'ye kadar 5,4 milyon ton talebi karşılamaktadır (Şekil 4.10). 2050'ye kadar %100 EOL'ye çıkmak RC'yi %47'ye çıkarır ve birincil kobalt için enerji teknolojilerindeki genel kümülatif talebi %15 azaltır, birincil üretimden gelen talebin azalması açısından alüminyum ve bakırla benzer bir yörünge izler. Ancak, pillerde kullanım için kobaltı çıkarmanın teknik zorlukları, bu varsayımları geri dönüşümü daha kolay olan alüminyum ve bakır için olduğundan daha az sağlam hale getirebilir.

Öte yandan lityum çok farklıdır çünkü çeşitli kaynaklara göre mevcut lityum geri dönüşüm oranları (hem EOL hem de RC) sifıra yakındır.⁴⁵ Ancak bazı kaynaklar bu alanda geri dönüşümün gelecekte yüksek potansiyelde büyüyeceğine dikkat çekiyor.⁴⁶ Örneğin, sırasıyla %40 ve %80 EOL oranlarının orta ve yüksek geri dönüşüm senaryolarını öngörüyorlar. Bu analizde, EOL'nin 2050'ye kadar %60'a yükseleceği ve tahmini %39 RC oranı anlamına gelen bir orta nokta seçilmiştir.⁴⁷

Bu tür geri dönüşümün etkisi, lityuma olan kümülatif talebin yüzde 26 oranında azaltılmasıdır.

⁴⁵ Li-ion pillerden lityumun geri dönüştürülmesi potansiyelini araştıran çok sayıda araştırma ve faaliyet olduğu belirtilmelidir. Ancak, bugüne kadar çok az sayıda kamuya açık veri bunun ticari olarak herhangi bir ölçekte gerçekleştirildiğini göstermektedir. Aslında, yakın zamanda yapılan çalışmalar lityumun düşük maliyetini ve geri dönüşümün nispeten yüksek maliyetini lityum geri dönüşümünün ölçeklendirilmesinin önündeki temel engel olarak vurgulamıştır. Örneğin, bkz.

⁴⁶ Ziemann ve diğerleri (2018) ve Church ve Wuennenberg (2019).

⁴⁷ Bu, Ziemann ve ark. (2018) tarafından yapılan analizden çıkarılmıştır.

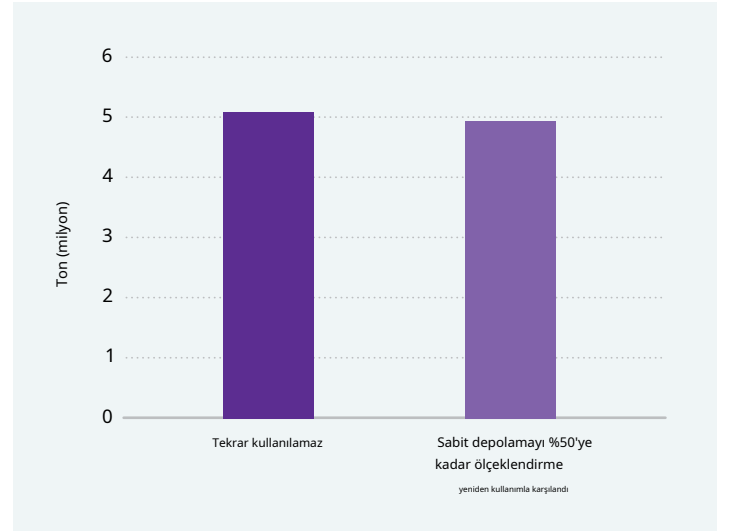
Tekrar kullan

Yeniden kullanım, geri dönüşümden farklıdır çünkü geri dönüşüm, malzemenin parçalanmasını ve alternatif bir kullanım için yeniden oluşturulmasını içerir. Bu bağlamda "yeniden kullanım" terimi, bir pil gibi orijinal bileşenin, başlangıçta amaçlanan amacın ötesinde başka bir kullanım için yeniden kullanılması anlamında kullanılır. Örneğin, elektrikli araçlarda kullanılan Li-ion piller, potansiyel olarak diğer enerji depolama uygulamalarında kullanılabilir.⁴⁸ Pillerin yeniden kullanımı sabit depolama uygulamaları için fırsatlar sunabilirken, genel mineral talebini azaltmaya yönelik bu potansiyel çözüm, atık ve güvenlik perspektiflerinden dikkatlice ele alınmalıdır.

Bu, temiz enerji teknolojileri kullanım ömürlerinin sonuna ulaştığında ve bir dereceye kadar yeniden kullanılabilir hale geldiğinde, bu teknolojilerin "yeniden kullanılmış" bir ürün bahanesiyle elden çıkarılması için bir bahane olarak kullanılmaması durumunda geçerli olabilir; bu durum özellikle gelişmekte olan ülkeler veya hizmetten yeterince yararlanamayan topluluklar için geçerlidir; çünkü bu teknolojiler kullanım ömürlerinin sonuna ulaştığında bu teknolojilerin alıcısı haline gelebilir ve bu da artan miktarda atığa yol açabilir.

Bu bağlamda, yeniden kullanım aynı zamanda yeniden amaçlandırma olarak da adlandırılmıştır. Yeniden kullanılan Li-ion pillerin oranına muhafazakar varsayımlar uygulanmıştır ve yeniden kullanılan pillerin 2050 yılına kadar sabit depolamada Li-ion pillere olan talebin %50'sini karşılayacağı varsayılmıştır. Bu, lityuma olan toplam kümülatif talebi %3 oranında azaltır (Şekil 4.11). Li-ion pillerin, yeniden üretim süreçleri yoluyla, araçlar arasında veya kamyonlar, otobüsler ve arabalar arasında, taşımacılıkta yeniden kullanılması durumunda, bu, lityuma olan birincil talebi önemli ölçüde azaltabilir.⁴⁹ Ancak bu alana yönelik çok sayıda araştırma ve ilgiye rağmen, bu süreçlerin ticari düzeyde gerçekleştiğine dair çok az kanıt bulunmaktadır.

Şekil 4.11 2050'ye Kadar 2DS Altında Lityum İçin Toplam Talep Üzerindeki Yeniden Kullanımın Etkisi



Not: 2DS = 2 derece senaryo

Aksi takdirde, lityum talebi yalnızca Ref, 2DS ve B2DS kapsamındaki enerji depolamasından, özellikle otomotiv sektöründen geldiğinden, lityum talebini önemli ölçüde azaltmanın tek yolu, sabit depolama uygulamaları 2050'ye kadar enerji depolama dağıtımlarının yalnızca küçük bir payını oluşturduğundan, elektrikli araç sektöründe Li-ion pilleri yeniden kullanmanın yollarını bulmak olacaktır. Ancak, elektrikli araçların büyük miktarda döngü (şarj ve deşarj) gerçekleştirme ve hızlı bir şekilde şarj tutma ve yeniden şarj etme kapasitesine sahip piller gerektirmesi nedeniyle bu eğilim olası değildir; bu özellikler yeni pillerle ilişkilidir.

48 Ahmadi ve diğerleri (2017)'deki tartışmaya bakın.

49 Daha fazla ayrıntı için Strandridge ve Hasan'a (2015) bakınız.

Fırsatlar ve Zorluklar

Mineralleri geri dönüştürme fırsatları düşük karbon geçişiyle ilişkili talep risklerini ele almaya yardımcı olabilirken, bazı geri dönüştürülebilir mineraller belirli enerji teknolojilerinin üretimi için uygun olmayabilir, çünkü bazı teknolojiler uygulamaları için belirli bir mineralin çok yüksek derecesini gerektirebilir (örneğin, çelik). Dahası, bazı geri dönüştürme süreçlerinin enerji yoğunluğu çelik ve alüminyum üretiminde belirlenen aynı sorunları ortaya çıkarabilir.

Geri dönüşüm oranları, maliyet ve teknik sorunlar nedeniyle mineraller arasında büyük ölçüde değişir. Çelik geri dönüşüm oranları özellikle yüksektir ve tahmini olarak %85'inden fazlası geri dönüştürülmüş EOL'dir. Mineraller içinde bile, oranlar ürünler arasında değişir. Örneğin, otomobillerden gelen çeliğin %95'i geri dönüştürülürken, çelik ambalajlardan gelen çelik geri dönüştürülür. Ancak geri dönüşüm oranları yanıltıcı olabilir. Çeliğin %85'i geri dönüştürülmesine rağmen, çeliğin yaklaşık üçte biri birincil üretimden gelir, çünkü çeliğin çoğunluğu uzun vadeli, dayanıklı yapılarda kilitlidir ve bu da özellikle talep arttığında geri dönüşüm için mevcut çelik miktarını sınırlar.

Geri dönüşüm, özellikle sera gazı emisyonlarında olmak üzere birçok alanda çevresel faydalar sağlar; alüminyum gibi minerallerin ikincil üretiminden kaynaklanan karbon ayak izi, birincil üretimin çok küçük bir kısmıdır. Ancak diğer mineraller için geri dönüşüm, enerji kullanımı ve su ayak izleri gibi çevresel faydalarla karşılaştırılması gereken ek çevresel zorluklarla birlikte gelir.

Genel olarak geri dönüşüm, güvenilir düşük karbonlu elektrik üretimiyle ilgili geri dönüşüm teknolojilerine sahip ülkeler için, belirli minerallere yönelik artan talebin baskısını azaltma potansiyeli açısından ilginç fırsatlar sunabilir; ancak gelecekteki uluslararası geri dönüşüm uygulamalarının mineral geri dönüşümünün çevresel, güvenlik ve yüksek maliyetlerini hesaba katması için ülkeler arasında politika tutarlılığına ihtiyaç duyulacaktır.



Yapıların ve ekipmanların ömürlerini uzatmak için yenilenmesi bu analizde ele alınmamıştır, ancak birincil minerallere olan talebi etkileyebilecek bir diğer önemli özellik olgusudur. Enerji teknolojilerinin birçok bileşeninin geri dönüştürülmesi teknik olarak zor veya maliyetli olabilir. Enerji teknolojilerinin parçalarının yenilenmesi, mineral ayak izini azaltarak ömürlerini önemli ölçüde uzatabilir. Örneğin, kullanım ömürlerinin sonuna gelen eski rüzgar türbinleri, kuleyi koruyarak ancak diğer bileşenlerin bir kısmını veya tamamını değiştirerek, türbinin kapasitesini artırarak veya dişli kutuları veya jeneratörler gibi daha verimli bileşenlerle yeniden donatarak yenilenebilir. Bu tür etkilerin ölçeğini tahmin etmek zordur, ancak yenilemeyi artırmak mineral talebinin genel ölçeğini azaltacaktır ve motorlar veya miktatsızlar gibi belirli bileşenlerde kullanılan minerallerden daha fazla çerçevelerde ve yapılarda kullanılan mineralleri etkileyebilir.





Enerji Teknolojilerinin, Minerallerin Küresel Isınma Potansiyeli

Enerji Teknolojilerinin GWP'si

Enerji teknolojilerinin GWP'sini hesaplamının önemi, düşük karbonlu bir gelecek sağlamak için daha fazla mineral çıkarma ve geri dönüştürmeyle ilişkili karbon ayak izini karşılamaktır. Amaç, özellikle analizin önceki bölümlerinin üretim ve depolama dahil olmak üzere düşük karbonlu teknolojilerin aşırı mineral yoğun olduğunu göstermesi nedeniyle, temiz enerji geçişinin karbon ayak izi etkilerini anlamaktır. Paris Anlaşması'nın küresel sıcaklığın 2°C'yi geçmemesi senaryosunu çağırmasıyla, GWP analizi, IEA 2DS kapsamında fosil yakıtlı teknolojilerle karşılaştırıldığında temiz enerji teknolojilerinin karbon ayak izinin yaklaşık hesaplamasını sağlar ve mineral talebini karşılamak için talep risk matrisinde benimsenen yaklaşımı yansıtır.

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi, 2050'ye kadar düşük karbonlu bir gelecek için gerekli minerallerle ilişkili emisyonlar vardır, ancak temiz enerji teknolojileri, kömür veya gazdan önemli ölçüde daha küçük bir genel GHG ayak izi sağlar - yenilenebilir enerji ve depolama, 2DS'de 2050'ye kadar yaklaşık 16 GtCO₂e katkıda bulunurken, kömürden yaklaşık 160 GtCO₂e ve gazdan yaklaşık 96 GtCO₂e katkıda bulunur. Bu son kaynaklardan önemli ölçüde daha fazla elektrik üretildiği temel senaryoda, kömür ve gazdan kaynaklanan emisyonlar sırasıyla 470 GtCO₂e ve 130 GtCO₂e'den fazla olarak çok daha fazladır.

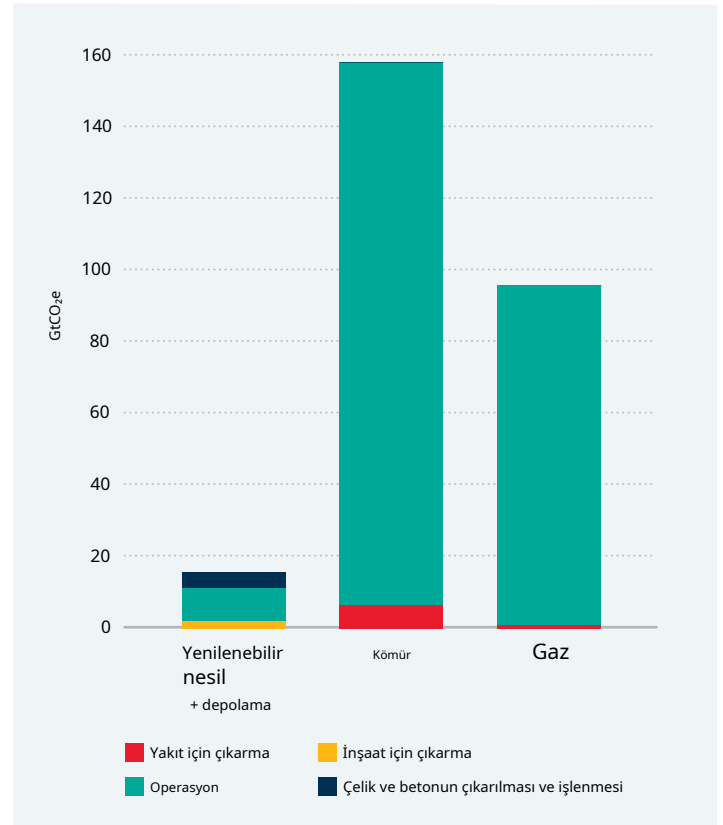
2

2

Temiz ve geleneksel enerji arasındaki temel fark, bu teknolojilerin her birinin işleyişiyle ilgilidir. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin inşası için gerekli minerallerin çıkarılması ve işlenmesindeki GHG ayak izinin fosil yakıt üretimine göre daha yüksek olması muhtemel olsa da, kömür ve gazın çıkarılmasından ve özellikle de elektrik üretmek için yakılmasından kaynaklanan emisyonlar hesaba katıldığında, fosil yakıt üretiminin ayak izi önemli ölçüde daha büyüktür. Başka bir deyişle, yenilenebilir enerji teknolojilerinin "beşikten kapıya" görel GWP'si, 2DS altında fosil yakıt yanmasının GWP'sine kıyasla önemli ölçüde daha küçüktür.

Çelik ve çimento analize dahil edilmemiş olsa da, yenilenebilir ve fosil yakıt enerji teknolojilerinin inşasından kaynaklanan emisyonlara yüksek katkıları nedeniyle Şekil 5.1'e dahil edilmiştir. Çelik şu anda toplam sera gazı emisyonlarının %7-9'unu oluşturmaktadır. Çimento yaklaşık %8'ini oluşturmaktadır (Timperley 2018). Teknolojileri inşa etmek için gereken çelik ve çimento ile çelik ve çimentonun karbon ayak izi hakkındaki veriler literatürden alınmış olup, tahmin aralığını modelin diğer yönleriyle benzer şekilde yakalamak için yüksek, medyan ve düşük değerler kullanılmıştır.

Şekil 5.1 2DS Altında Fosil Yakıt Teknolojileriyle Karşılaştırıldığında "Beşikten Kapıya" Maden Çıkarma ve İşleme, Yenilenebilir Elektrik Üretimi Operasyonları ve Enerji Depolama Teknolojilerinden 2050'ye Kadar Toplam GWP



Not: İnşaat için çıkarma, analizde yer alan 17 mineralden kaynaklanan kraterden kapıya emisyonları içerir. Çelik ve beton çıkarma ve işleme, çelik ve beton için kraterden kapıya emisyonları içerir ve analizde yer alan 17 mineralle karşılaştırıldığında bu iki mineralden kaynaklanan emisyonların ölçeği nedeniyle dahil edilmiştir. GtCO = gigaton karbondioksit, GWP $\frac{1}{100}$ küresel ısınma potansiyeli.

Sadece kömür ve gaz tesislerinin işletilmesinden kaynaklanan sera gazı emisyonları, 2017 sera gazı emisyonlarına benzerdir.⁵⁰ 60 yılı aşkın Avrupa Birliği emisyonlarının yıllık bazda. Bu bulgu, farklı enerji teknolojilerinin yaşam döngüsü ayak izini inceleyen daha geniş literatürle tutarlıdır. Ayrıca, IEA'nın kömür yanmasının, sanayi öncesi seviyelerin üzerindeki küresel ortalama sıcaklıktaki 1°C'lik artışın 0,3°C'sine katkıda bulunduğu ve küresel olarak toplam GHG emisyonlarının yaklaşık %30'unu temsil ettiği tahminiyle de uyumludur.⁵¹

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL), farklı enerji teknolojilerinin çeşitli yaşam döngüsü tahminlerini uyumlu hale getirmeye çalışan bir çalışma yürüttü. NREL'in kapsamı, yukarıda tahmin edilen GWP'den farklıdır, çünkü bu analiz yalnızca mineral çıkarma ve işleme ile ilgili GWP'ye ve enerji teknolojilerinin işletimine odaklanır, bu teknolojilerin kullanım ömrünün sonunu dikkate almaz, ancak çalışmalarından elde edilen bulgular benzerdir.⁵²

Bu GWP analizinden çıkarılacak sonuç, daha iddialı bir iklim senaryosunun daha fazla sayıda minerale olan talebi artırmasına karşın, beşikten kapağa yaklaşımı kullanan temiz enerji teknolojilerinin GWP'sinin kömür ve gazdan önemli ölçüde daha düşük olduğudur; bu nedenle, Paris Anlaşması ve Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ile uyumlu 2°C veya daha düşük bir yol elde etmek için temiz enerji geçişinin tercih edilen yol olduğudur.

Minerallerin GWP'si

Düşük karbon teknolojilerinin maddi yoğunluğu ve özellikle pil teknolojileri için bunların bertarafıyla ilişkili çıkarımlar göz önüne alındığında, mevcut ve gelecekteki yenilenebilir enerji politikası bu teknolojilerin artan dağıtımıyla ilişkili emisyonları da hesaba katmalıdır. Ayrıca GWP analizinin özellikle artan çıkarma ve işleme faaliyetleriyle ilişkili çevresel ve sosyal riskleri (örneğin su, ekosistemler vb.) dikkate almadığı da belirtilmelidir. **çapraz kesen mineraller**(4. kadran) ve **yüksek etkili, çapraz kesimli mineraller**(kadran 3).

GWP ayrıca, hangi mineralin en düşük ve en yüksek karbon ayak izine sahip olduğunu anlamak için her mineralin karbon yoğunluğuna 2DS'ye göre bakmak için de kullanılabilir. Şekil 5.2, bu minerallerin emisyon etkisi ile düşük karbonlu bir enerji sistemine geçişteki talep önemleri arasındaki dengeyi gösterir; daire boyutu, bir mineralin 2050'ye kadar kümülatif emisyonlarını temsil eder.

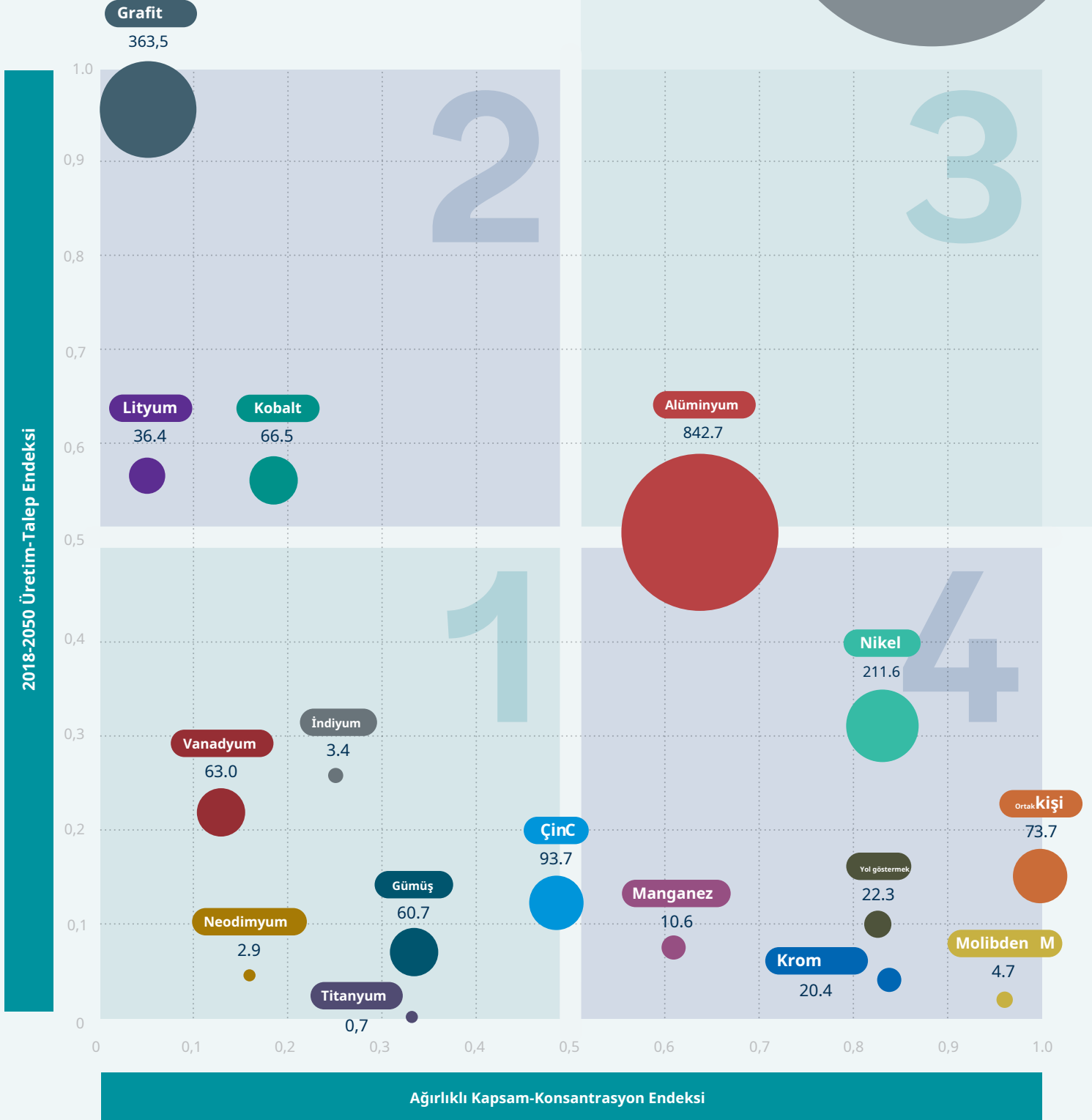
Alüminyum, 2DS'de 840 MtCO₂e ile en yüksek kümülatif karbon ayak izine sahiptir, çünkü güneş PV'nin bu senaryoda en yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji teknolojisi olması ve toplam alüminyum talebinin %87'sini oluşturması beklenir; ayrıca bir dizi başka enerji teknolojisinde de kullanılır. Ek olarak, alüminyum talebinin temel senaryoda 48,8 milyon tondan 2DS'de 102,8 milyon tona çıkarak %111 oranında artması beklenmektedir. Alüminyum, talep endeksinde en yüksek sırada yer alan mineraldir çünkü **yüksek etkili, çapraz kesen mineraller**; geniş bir teknoloji yelpazesinde kullanılmakta olup, yıllık üretim miktarı en yüksek olanıdır ve 2050 yılında yılda 5,6 milyon tona ulaşacaktır.

50 Veriler, 16 Temmuz 2008'de yayınlanan ve 10 Ekim 2019'da güncellenen Union of Concerned Scientists, "Each Country's Share of CO₂ Emissions" adlı rapordan alınmıştır. <https://www.ucsusa.org/resources/each-country-share-co2-emissions>.

51 IEA Veri ve İstatistik veritabanından edinilebilen veriler: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2%20emissions%20by%20energy%20source>. NREL, güneş PV'den kilovatsaat başına ortalama karbon emisyonunun, bir kömür santrali tarafından üretilen aynı kilovatsaatın yalnızca %6'sı ve bir gaz santralinden gelen bir kilovatsaatın %12'si olduğunu buldu. Proje hakkında daha fazla bilgi, "Yaşam Döngüsü Değerlendirme Uyumlaştırması" NREL adresinde mevcuttur: <https://www.nrel.gov/analiz/life-cycle-assessment.html>.

Şekil 5.2 2DS Altında 2050'ye Kadar Enerji Teknolojileri için Beşikten Kapağa Toplam Kümülatif Emisyonların Talep Endeksine (MtCO₂e) Göre Karşılaştırılması

Emisyon değerleri MtCO₂e'dir.



Grafit de bu yolu izliyor **yüksek etkili mineral**, 2050'ye kadar yaklaşık 360 MtCO₂'ya tekaşül ediyor çünkü yalnızca çoğu pil teknolojisinde kullanılan anotları üretmek için kullanılıyor. Nikel, üçüncü en yüksek GWP'ye sahip ve **çapraz kesen mineral** kategorisi; hem gelecekte yüksek talep görüyor, üretimi 2018 seviyelerine göre neredeyse iki katına çıkarıyor, hem de çok çeşitli teknolojilerde kullanılıyor.

Enerji teknolojileri için alüminyum, grafit ve nikel üretimi birlikte, 2050 yılına kadar toplam 1,4 GtCO₂ emisyonuna neden olacak ve bu da Fransa'nın 2018'deki toplam CO₂ emisyonuna neredeyse eşdeğer.

Almanya ve Birleşik Krallık bir arada.⁵³ Çelik, nikel, titanyum, demir cevheri ve krom gibi minerallerin çift sayılmasını önlemek için GWP analizine dahil edilmemiştir, çünkü bu mineraller çelik üretmek için gereklidir. Çelikten kaynaklanan emisyonlar o kadar yüksek olacaktır ki, kümülatif emisyonları 3,7 GtCO₂ e olacaktır; bu da alüminyumun GWP'sinden dört kat daha fazladır.

Talep risk matrisindeki dört kadrandan üçünden altı mineral seçildi ve hangi enerji teknolojisinin 2DS altında mineral başına en yüksek GWP'ye sahip olduğunu anlamak için kullanıldı. Yukarıdaki eğilimlere benzer şekilde, alüminyum emisyonlarının en büyük payını oluşturur,⁵⁴ neden olmuş

Kutu 5.1 Alüminyum Üretiminden Kaynaklanan Emisyonların Azaltılması



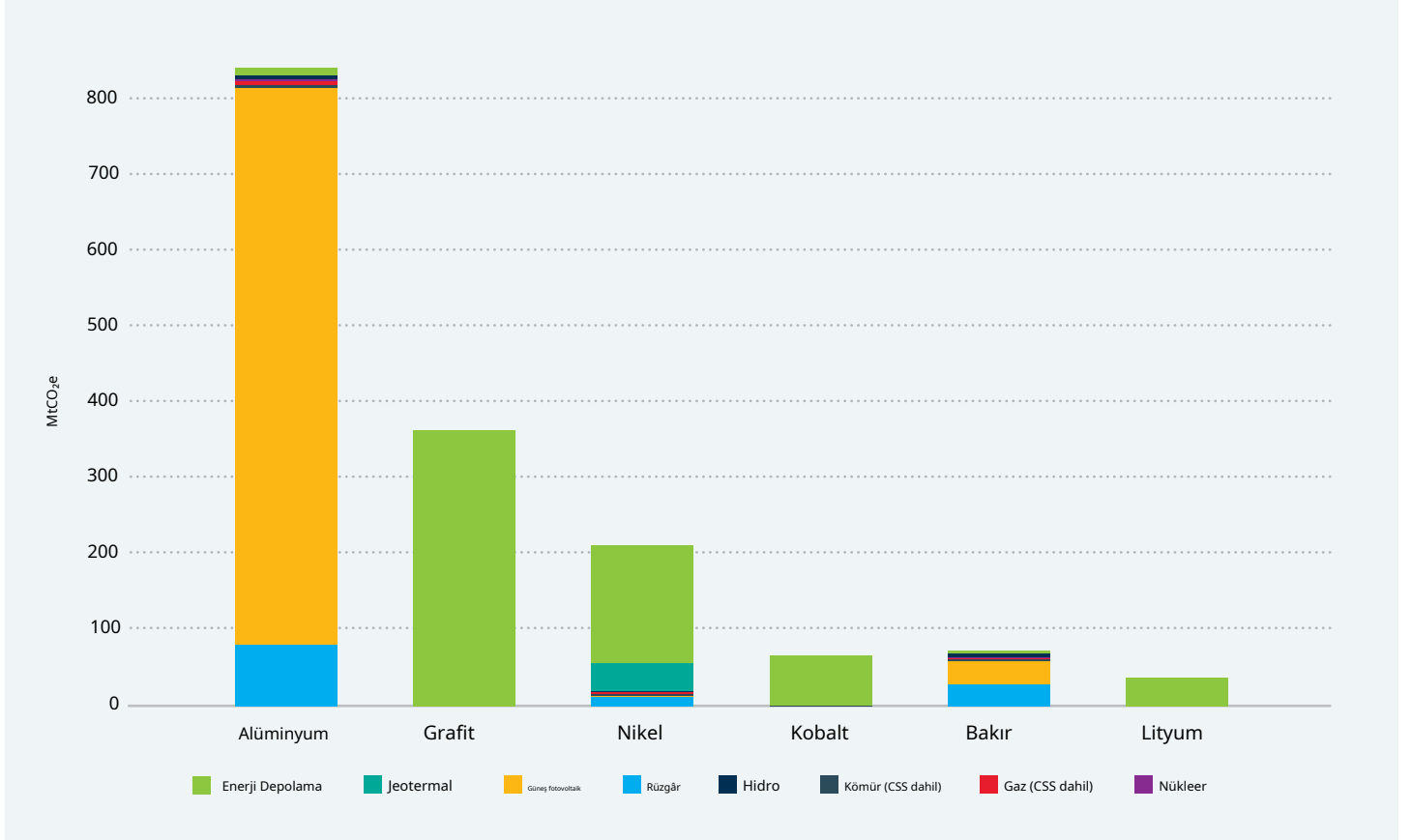
Birincil alüminyum üretimi, yer altından çıkarılan boksitin, önce ezilmesi, yıkanması, işlenmesi ve pişirilmesi (Bayer prosesi) yoluyla alüminaya (alüminyum oksit) ve daha sonra elektroliz yoluyla alüminyuma (Hall-Héroult prosesi) dönüştürüldüğü çok aşamalı bir işlemdir.

Her aşamada emisyonlar üretilir ve en büyük oran, büyük miktarda elektrik ve doğrudan sürecin kendisinden kaynaklanan CO₂ nedeniyle son aşamadan gelir.² Alüminyumun ton başına emisyonları, düşük karbonlu olması nedeniyle gelecekte önemli ölçüde düşebilir - özellikle bu son aşamadan

Geçişin kendisi. Artan yenilenebilir enerji dağıtımı, elektriğin karbon yoğunluğunu ve dolayısıyla elektroliz sürecinden kaynaklanan emisyonları azaltır. Akademik literatürden alınan veriler kullanarak, enerji teknolojilerinden kaynaklanan alüminyumdan kaynaklanan 840 MtCO₂ e kümülatif emisyonun, bu değişiklikler ve artan geri dönüşüm sonucunda yalnızca 500 MtCO₂ e altına düşebileceği tahmin edilmektedir. Ancak, alüminyum üretme süreci, alüminyum oksidi (alümina) alüminyuma parçalama sürecinden doğrudan CO₂ emisyonları ürettiğinden, elektroliz sürecinden kaynaklanan emisyonları azaltmak için başka teknolojik gelişmelere ihtiyaç duyulacaktır.

53 "CO₂ Emisyonları" Küresel Karbon Atlası'ndan alınan veriler: <http://www.globalkarbonatlas.org/en/CO2-emissions> Alüminyum üretim sürecinin ve ilişkili emisyonların tam bir özeti Ek B'de bulabilirsiniz.

Şekil 5.3 2DS'ye Göre 2050'ye Kadar Cradle-to-Gate Yöntemiyle Minerallerin Çıkarılması ve İşlenmesinden Elde Edilen Toplam GWP, İşlemler Hariç



Not: 2DS = 2 derece senaryosu, CCS = karbon yakalama ve depolama, CSP = yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, GWP = küresel ısınma potansiyeli, MtCO₂e = milyon ton karbondioksit eşdeğeri.

Şekil 5.3'te görüldüğü gibi, güneş PV (%87) ve ardından rüzgar (%10) dağıtımları ile. Bir B2DS kapsamında, enerji teknolojilerini tedarik etmek için alüminyum üretiminin toplam emisyonları 0,9 GtCO₂e'ye yükselir ve bu da 2DS'den %8'lik bir artışı temsil eder. Kobalt, grafit, lityum ve nikel üretimindeki sera gazı emisyonları, özellikle enerji depolama teknolojilerinden kaynaklanır, ancak nikel diğer enerji teknolojilerinde de kullanılır. Yine de, enerji depolama, nikelin karbon ayak izinin büyük bir bölümünü oluşturur - 154 MtCO₂e, enerji teknolojilerinden kaynaklanan toplam nikel emisyonlarının %73'ünü temsil eder - grafitin karbon ayak izi eşdeğerinin %100'ünü oluşturur (363 MtCO₂e).

Bir çapraz kesim minerali olarak bakır, kobalt ve lityuma benzer şekilde 2DS altında 74 MtCO₂e toplam karbon ayak iziyle tüm enerji teknolojilerinde kullanılır. Ancak, GWP bakır rakamı büyük ölçüde hafife alınmış olabilir çünkü bakır çok çeşitli endüstrilerde kullanılır ve iletim altyapısından dünya çapında elektrikli araçları bağlamaya kadar temiz enerji geçişi için kritik öneme sahiptir. Alüminyumun büyük karbon ayak izi öncelikle güneş PV'den kaynaklansa da, alüminyum elektrik üretimi ve depolaması da dahil olmak üzere altı enerji teknolojisinde kullanıldığı için çapraz kesim minerali olarak da kabul edilir.



Çözüm

Artan Genel Talep

Mineraller için

Temiz enerji teknolojilerinin inşasına yardımcı olacak temel ve niş minerallere olan talebin, 2018 üretim seviyelerine göre hem mutlak hem de yüzdesel olarak artarak 2050 yılına kadar önemli ölçüde artması bekleniyor. Temiz enerji teknolojileri farklı olsa da, hepsinin ortak bir özelliği vardır: Fosil yakıt tabanlı elektrik üretimine kıyasla daha yüksek malzeme yoğunluğu. Küresel ısınmayı 2 derecenin altında veya ötesinde tutmak için hangi teknoloji tabanlı azaltma senaryosunun gerçekleştirildiğine bakılmaksızın, yenilenebilir enerjinin hızlı ve büyük ölçekli dağıtımı, bu teknolojilerin elektriği nasıl ürettiği ve depoladığı nedeniyle mineral talebinde önemli artışlara yol açacaktır.

Bu raporda sunulan modele göre, özellikle lityum, grafit ve kobalt gibi enerji depolama teknolojilerinde yoğunlaşan bazı minerallerde, yaklaşık yüzde 500'e varan büyük talep artışları tahmin ediliyor. Göreceli talebi daha az artan mineraller bile (örneğin bakır) mutlak talepte hala büyük artışlarla karşı karşıyadır. Farklı enerji teknolojileri, yapılarını veya çerçevelerini inşa etmek veya güneş PV'sindeki PV hücreleri ve rüzgar türbinlerindeki mıknatıslar veya motorlar gibi elektrik üretmek için kullanılan teknolojide bileşenler olarak farklı mineral türleri gerektirir. Bu nedenle, temiz enerji geçişinden ortaya çıkan teknoloji yolu, talepte en büyük artışı yaşayacak mineral türlerini şekillendirecektir. Bununla birlikte, hangi düşük karbonlu teknoloji yolunun seçildiğine bakılmaksızın, genel mineral talebi hala artacaktır.

Temiz enerji geçişinde yer alan teknolojiler, yenilik ve artan dağıtım yoluyla hızla ortaya çıkıyor, gelişiyor ve iyileşiyor. Bu nedenle, düşük karbonlu geçişin ortaya çıkma biçimini tahmin etmek çok zordur. Bu analiz, gelecekteki enerji sistemini modellemek için IEA ve IRENA senaryolarına dayanıyordu, ancak politika seçimleri, teknolojik yenilik ve piyasa güçleri sonucunda çok farklı bir elektrik üretimi ve özellikle enerji depolama teknolojileri karışımının ortaya çıkması oldukça olasıdır. Yüzen açık deniz rüzgarı veya hidrojen yakıt hücreleri gibi yeni teknolojiler ortaya çıkabilir ve

pazar veya ticarileştirmeleri maliyetler veya politika engelleri tarafından engellenebilir. Modelden belirli minerallere olan talebin artması, ortaya çıkabilecek ve politika veya teknolojilerdeki değişimlere tabi olabilecek bir olasılık olarak değerlendirilmelidir. Genel sonuç—mineral talebinin artacağı—2050'ye kadar devreye alınabilecek teknolojilerin ve alt teknolojilerin tam karışımından bağımsızdır.

Özellikle mineral açısından zengin gelişmekte olan ülkelerde, hem madencilik sektörü hem de düşük karbonlu minerallere sahip hükümetler için fırsatlar ve riskler mevcuttur. Madencilik endüstrisi ve kaynak zengini ekonomiler için, madencilik faaliyetlerinin bir sonucu olarak ele alınması gereken çevresel ve sosyal zorluklar vardır. Örneğin, kıt su kaynaklarının kullanımı, madencilik şirketleri ve faaliyet gösterdikleri topluluklar arasında çatışma yaratabilir. Özellikle gelişmekte olan ülkeler için, bu çevresel ve sosyal sorunlar zayıf yönetim nedeniyle daha da kötüleşmektedir. Bu minerallere ev sahipliği yapan ülkelerde, iyi yönetilirse ekonomik büyümeye ve sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunabilecek artan bir talep olması muhtemeldir. Bu önemli minerallere yönelik talep modellerinin yeni bir enerji sistemi karşısında nasıl değişebileceğini anlamak, bu mineralleri üreten ve ulusal iklim hedeflerinin bir parçası olarak yenilenebilir enerji teknolojilerini kullanan ülkeler için uzun vadeli planlama açısından hayati önem taşımaktadır.

Maden Talebi

Güvenlik Açığı ve Riskler

Yenilenebilir enerjinin büyük ölçekli dağıtımının zorluğunun üstesinden gelmek, çeşitli temel minerallerin istikrarlı bir şekilde bulunmasını ve istikrarlı fiyatlar ile asgari düzeyde piyasa kesintileri gerektirir. Bu, özellikle SDG 7'yi yerine getirmesi gereken gelişmekte olan ülkelerde geçerlidir. "herkes için uygun fiyatlı, güvenilir, sürdürülebilir ve modern enerjiye erişim." Her mineralin farklı talep riskleri taşıyabileceğini anlamak, madencilik sektörü ve hükümetler için hayati önem taşır; her ikisinin de düşük karbonlu teknoloji dağıtımlarındaki değişikliklere hazırlıklı olması gerekir; bu da mineral talebinde büyük ve değişken değişimlere neden olabilir. Minerallerin değişken talep riskleri taşıyabileceğini anlamak, potansiyel geri dönüşüm fırsatları ve ihtiyaçları hakkında da fikir verebilir.

Bu rapor, farklı iklim senaryoları altında mineral talebini tahmin etmenin ötesine geçerek, belirli mineral gruplarıyla ilişkili olabilecek talep risklerini anlamak için yeni bir çerçeve geliştirmiştir.Bazı mineraller yalnızca bir teknoloji (veya alt teknoloji) ile ilgili potansiyel olarak büyük artışlarla karşı karşıya kalırken, diğerleri mutlak talepte daha düşük ancak daha geniş tabanlı artışlarla karşı karşıya kalacaktır. Hangi minerallerin hangi talep riski kategorisine girdiğini anlamak, madenciler, yenilenebilir enerji geliştiricileri ve politika yapımcılar için temiz enerji geçişi için kapsamlı bir plan oluşturmak açısından hayati öneme sahiptir.

The talep risk matrisiDüşük karbonlu geçişin anahtarı olarak tanımlanan 17 mineralin farklı talep profillerinden nasıl etkilendiğine dair genel bir bakış sunmaktadır.

I. Orta Etkili Mineraller

- Titanyum ve neodim gibi orta etkili mineraller hala talep artışlarından etkileniyor ve hala temiz enerji geçişinde önemli bir rol oynayabilir. Orta etkili mineraller ne yüksek düzeyde göreceli talebe sahip ne de bir dizi enerji teknolojisini çapraz kesen nitelikte olsa da, bu mineraller için pazarlar hala etkilenebilir. Sunulan iklim senaryolarında göreceli talep artışları küçük olsa da, teknoloji dağıtımındaki gelecekteki değişiklikler bu minerallere olan talebin önemli ölçüde artmasına neden olabilir.
- Orta etkili mineraller çok çeşitli teknolojilerde kullanılmaz ancak açık deniz rüzgarı için neodimyum ve jeotermal için titanyum gibi belirli teknolojilerin önemli bileşenleridir. Pazarın bu talebi karşılama yeteneğini tehdit eden sorunlar, bu belirli teknolojilerin dağıtımını ciddi şekilde etkileyebilir ve düşük karbonlu geçişin şeklini değiştirebilir. Bazı durumlarda, rüzgar enerjisi için neodimyum durumunda gösterildiği gibi, ikame ve verimlilik mümkün olabilir ancak bu birçok durumda sınırlı olabilir. Bu analiz yine mineral tedarik riskini değerlendirmese de, neodimyum nadir bir topraktır ve nadir toprakların yüzde 70'inden fazlası şu anda Çin'de üretilmektedir.

II. Yüksek Etkili Mineraller

- Temiz enerji geçişinin belirli minerallerin üretimi için önemli etkileri vardır. Grafit, lityum ve kobalt gibi yüksek etkili minerallerin, 2DS kapsamında, 2018 seviyelerine göre 2050 yılına kadar üretimlerini önemli ölçüde, neredeyse %500'e kadar artırmaları gerekecektir. Bu talebin çoğu özellikle enerji depolama teknolojilerinden gelecektir; ayrıca, grafit ve kobalt üretiminin %60'tan fazlası sırasıyla Çin ve Demokratik Kongo Cumhuriyeti'nde yoğunlaştığından, arz riskleri de taşıyabilir.
- Bu nedenle yüksek etkili minerallere olan talep hem potansiyel olarak yüksek hem de belirsizdir ve bu durum hem yenilenebilir enerji endüstrisi hem de bu minerallerin tedarik zincirinde yer alanlar için fırsatlar ve riskler yaratır. Dağıtılan enerji depolama teknolojileri ve alt teknolojilerinin miktarında ve türünde nispeten küçük değişiklikler, bu minerallerin pazarları için büyük etkilere sahip olabilir. Benzer şekilde, bu talebi karşılamada olası zorluklar, depolama sektöründe değişikliklere neden olabilir ve endüstrinin pil kimyasını veya hatta pil türünü değiştirmesine neden olabilir.

III. Yüksek Etkili, Kesitsel Mineraller

- Alüminyum gibi yüksek etkili, kesişen mineraller, yalnızca taleplerinin belirli bir teknolojiye bağlı olmaması nedeniyle değil, aynı zamanda çok çeşitli enerji teknolojilerinde daha yüksek miktarlarda ihtiyaç duyulması nedeniyle de kritik öneme sahiptir. Yüksek etkili, kesişen mineraller, dalgalanan talep risklerine daha az duyarlıdır çünkü bu minerallere olan yüksek talep seviyesi, 2050'ye kadar hangi tür enerji teknolojisi veya alt teknolojisi kullanılırsa kullanılсын her zaman mevcut olacaktır. Ek olarak, talepteki gerekli ölçeklenme önemlidir, bu da sadece kesişen minerallere kıyasla arzı artırmak için talebin daha büyük bir tetikleyicisi olduğu anlamına gelir. Bu, bu mineral kategorisini hem üreticiler hem de tüketiciler için yüksek riskli hale getirir, ancak aynı zamanda bu mineralleri tedarik edecek üreticiler için bu yüksek talebi karşılamak için potansiyel bir fırsat haline getirir.
- Yüksek etkili, kesişen minerallere olan talebin zaman içinde yüksek ve oldukça kesin olması muhtemeldir. Özellikle alüminyum için, gelecekteki kullanımı ve üretimi, temiz enerji geçişinde önemli etkilere sahip olabilir çünkü

çoğu teknoloji ve grafit hariç tüm 17 minerali önemli ölçüde aşan mutlak talep rakamlarına sahiptir. Güneş PV, iklim senaryoları daha iddialı hale geldikçe en yaygın olarak kullanılan temiz enerji teknolojisi olması beklendiğinden toplam alüminyum talebinin %87'sini oluşturmaktadır. Bu nedenle alüminyum, düşük karbonlu enerji geleceği için hayati öneme sahiptir. Zorluk, yenilenebilir enerji sektörünün potansiyelini yerine getirmesine izin veren bir maliyetle alüminyum gibi yüksek etkili, kesişen minerallerin istikrarlı bir tedarikini sağlamaktır.

IV. Kesişen Mineraller

- Nisbi talepte büyük artışlar olmasa bile, mineraller düşük karbon geçişinden büyük ölçüde etkilenebilir. Bakır gibi bazı mineraller için, temiz enerji teknolojilerinden gelecek talep, mevcut üretim seviyelerinin büyük bir bölümünü temsil etmeyebilir.⁵⁵ Ancak, mutlak değerler açısından ihtiyaç duyulan bu minerallerin miktarı, göreceli artışları çok daha fazla olan diğer minerallerin üretiminden daha ağır basmaktadır; talepteki artış yine de bu minerallerin genel pazarı ve bulunabilirliği üzerinde bir etki yaratacak kadar büyüktür. Tekrar ediyorum, bu öngörülen talepler yalnızca enerji teknolojilerini hesaba katmaktadır ve bu teknolojileri elektrik şebekelerine entegre etmek için gereken iletim hatlarını içermemektedir.
- Çapraz kesim mineralleri ayrıca geniş bir yelpazede elektrik üretimi ve enerji depolama teknolojilerinde kullanılır, bu da gelecekteki talep artışlarının herhangi bir teknolojinin kaderine daha az bağımlı olduğu anlamına gelir. Göreceli talebin yüksek olmayabileceği ancak mutlak talebin yüksek olabileceği bu mineraller için, bu tahmini talebin gerçekleşme olasılığı yüksektir. Bu talebi karşılamak, düşük karbon geçişinin tüm kaderi için de çok önemlidir, çünkü bu mineraller birçok enerji teknolojisinde hayati öneme sahiptir. Hızla artan görece talebin büyük tetikleyicileri olmasa bile, arzın talebi karşılayabilmesi çok önemli olacaktır.

Geri Dönüşüm ve Yeniden Kullanımın Rolü

Geri dönüşüm, yeniden kullanım ve yenileme, temiz enerji için minerallere yönelik gelecekteki talebi sınırlama ve karşılamada önemli rollere sahiptir

teknolojiler geliştirilecek, ancak yine de mineral kaynaklarının çıkarılması gerekecek. Hem kullanım ömrü sonu hem de geri dönüştürülmüş içerik açısından geri dönüşüm oranları mineraller arasında büyük ölçüde farklılık gösterir. Mevcut geri dönüşüm oranları, düşük karbon geçişinde yer alan mineraller için gereken birincil talebi azaltabilir. Geri dönüşüm oranlarındaki gelecekteki artışlar, Li-ion piller gibi enerji depolama teknolojileri için bileşenlerin yeniden kullanımı gibi birincil minerallere olan talebin artışını hafifletmede önemli bir rol oynayabilir, ancak bu tür yeniden kullanımın ticari uygulaması şu anda sınırlıdır. Geri dönüşümü, yeniden kullanımı ve yenilemeyi teşvik etmek, düşük karbon geçişinin hayati bir parçasıdır. Ancak, geri dönüşüm süreçleriyle ilişkili hem ekonomik hem de çevresel zorlukların farkında olarak, bu alandaki eylemleri ölçeklendirmek için daha fazla politika önlemine ihtiyaç vardır.

Geri dönüşümde büyük artışlar olsa bile (yüzde 100 EOL geri dönüşümünün sağlandığı bir senaryo dahil), birincil minerallere yönelik güçlü bir talep olması muhtemeldir. Bu durum özellikle, geri dönüştürülecek ve yeniden kullanılacak mevcut materyalden yoksun, talebin en yüksek oranda arttığı mineraller için geçerlidir. Mineral geri dönüşüm sektöründe büyük artışlar elde edilebilse bile, kalan birincil talebi karşılama ihtiyacı devam edecektir. Geri dönüşüm süreçlerinin sorumlu bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamak için bu alanda daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulacaktır. Temiz enerji teknolojilerinin güvenli ve verimli bir şekilde parçalanıp geri dönüştürülebilmesini sağlamak için enerji verimliliğini, çevresel ve sosyal açıdan sağlam uygulamaları ve inovasyonu teşvik eden politika önlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Emisyon Azaltımı ve Azaltma Fırsatları

Yenilenebilir enerjinin kullanımı, elektrik sektörünün karbondan arındırılmasının en etkili yollarından biri olmakla birlikte, temiz enerji teknolojilerinin mineral yoğunluğunun da ele alınması gerekiyor. Mineral üretimi ve temiz enerji teknolojilerinin işletilmesinden kaynaklanan emisyonlar kömür ve gaz üretiminin sadece %6'sı olsa bile, emisyonlar önemsiz değildir. Elektrik sektörünün yeşillendirilmesi, yukarı ve aşağı akışla ilgili emisyonların ele alınmasını gerektirecektir. Politika ve inovasyona ihtiyaç duyulacaktır. *"İklim değişikliği ve onun olumsuz etkileriyle mücadele için acilen harekete geçilmesi"*

etkileri (SDG 13) bu emisyon azaltımlarının ülkelerin Ulusal Olarak Belirlenen Katkılarına (NDC) entegre edilmesi.

Yenilenebilir enerji teknolojilerinin, mineral talebi riskleri ve yukarı akış ve son üretim faaliyetlerinden kaynaklanan ek karbon emisyonları dikkate alınmadan küresel çapta uygulanması, SDG 7 ve SDG 13'teki ilerlemeyi hızlandırmak yerine engelleyebilir. Her mineralin emisyon yoğunluğu, **talep risk matrisi** Temiz enerji teknolojisi üretimi ve son kullanımından kaynaklanan emisyon azaltımını ve hafifletme çabalarını en üst düzeye çıkarmak için olası yollar hakkında fikir sunmak. Minerallerin istikrarlı ve uygun maliyetli bir şekilde tedarik edilmesi, temiz elektrik üretimi ve depolamasının küresel olarak dağıtılmasını sağlamak için hayati önem taşısa da, çeşitli talep risk profilleri, temiz enerji mineral tedarik zincirinin çeşitli alanlarını karbondan arındırmak için farklı hafifletme stratejilerinin kullanılması gerektiği anlamına da gelir.

Düşük karbonlu teknolojiler için mineral tedarik zincirinin tamamını anlamak ve analiz etmek, iklim hedeflerini etkili bir şekilde gerçekleştirmek için kritik öneme sahiptir. Bu, temiz enerji geçişinin (1) geri dönüşüm de dahil olmak üzere mevcut ve gelecekteki mineral üretiminin 2050'ye kadar artan talebi karşılaması; (2) düşük karbonlu bir geçişi desteklemek için bu minerallerin sürekli, istikrarlı ve uygun fiyatlı bir şekilde tedarik edilmesini sağlarken artan mineral üretimiyle ilişkili emisyonların etkili bir şekilde hafifletilmesi veya azaltılması; ve (3) bu teknolojilerin güvenli bir şekilde bertaraf edilebilmesini, kolayca parçalanabilmesini ve mineral içeriklerinin ekonomik olarak makul seviyelerde geri dönüştürülebilmesini sağlamak için inovasyondan yararlanılması ve böylece bu yeni talebin kısmen karşılanması gerektiği anlamına gelir.

Emisyonların ölçüğü, yoğunluğu ve nedenleri mineralden minerale değişmektedir. Örneğin gümüş madenciliği emisyon yoğun bir iştir, ancak gümüş büyük ölçekte talep görmez. Gümüş üretimi, 2018'de toplamda üretilen 27 bin tona kıyasla, yalnızca güneş PV ve CSP teknolojilerine olan talepten dolayı 2050'ye kadar yılda 15 bin ton artacaktır (USGS 2018b). Öte yandan, boksit cevherinden üretilen 5,6 milyon ton alüminyum, 2018'de tüm kullanımlar için üretilen toplam 60 milyon ton alüminyuma kıyasla, sadece düşük karbonlu teknolojileri tedarik etmek için 2050'ye kadar 2DS kapsamında gereklidir (USGS 2018a). Bakır gibi diğer minerallerin kilogram başına daha küçük GHG ayak izleri vardır, ancak gümüşe kıyasla daha büyük ölçekte gereklidirler. Bu karmaşıklıkları anlamak

ve bu farklı minerallerin karbon ayak izini azaltmaya yönelik farklı politika yaklaşımlarının oluşturulması önemlidir.

Stratejileri tüm farklı mineral kategorilerine göre uyarlamak, hem stratejik minerallerin tedarik edilmesi zorluğunun üstesinden gelmesi hem de temiz enerji geçişinden kaynaklanan emisyonların en aza indirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Örneğin alüminyum, yüksek etkili, kesişen mineraller kategorisine girer ve 2DS veya daha fazlası altında en büyük kümülatif emisyonlara sahiptir. Bu, birincil alüminyum üretimini karbondan arındırırken istikrarlı ve uygun fiyatlı tedarik sağlamak için tüm alüminyum tedarik zincirine daha fazla dikkat gösterilmesini hayati hale getirir. Bu minerallerin tedarik zincirleri boyunca tüm paydaşlar, emisyonları azaltmaya yardımcı olabilecek ve talep risklerini daha da kötüleştirmeyecek stratejiler aramalıdır. Bu stratejiler arasında hükümet politikası desteği, endüstri tarafından teknolojik yenilik ve son kullanıcıların tedarikçileri satın alacakları ürünler için sera gazı emisyonlarını azaltmaya teşvik etmesi yer alabilir.

Yenilenebilir enerjiyi artırmaya yönelik müdahalelerden bazıları, kaynak açısından zengin gelişmekte olan ülkelerde ekonomik büyümeyi artırmaya ve iklim ve çevresel riskleri azaltmaya yardımcı olarak çift yönlü kazanımlar sunabilir. Bir örnek, minerallerin taşınmasıyla ilişkili emisyonlarla, ayrıca çıkarma işleminin gerçekleştiği ülkelerde katma değerli üretimi kolaylaştırmakla ve talebin güçlü olduğu bölgelerde yenilenebilir teknolojiler için üretim kapasitesini artırmakla ilgilidir; örneğin, bölgenin muazzam güneş kaynakları göz önüne alındığında, Afrika'daki güneş PV. Bu, bu analizin kapsamı dışında kalsa da, bu emisyon azaltma ve hafifletme fırsatları, yenilenebilir enerjilerin nerede konuşlandırılacağına ve bu minerallerin nerede üretileceğine bağlı olarak belirli mineraller ve teknolojiler için önemli olabilir.

Çelik ve çimento üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının, bu analizde tanımlanan 17 mineralin çoğunluğunun ürettiği emisyonlardan önemli ölçüde daha yüksek olması muhtemeldir. Çelik üretimi şu anda dünya çapındaki toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %7-9'unu oluştururken (WSA 2020), çimento yaklaşık %8'ini oluşturmaktadır (Rodgers 2018). Bu nedenle, belirli temiz enerji teknolojileri için, bunlar hariç tutulduğunda, üretimleriyle ilişkili tahmini sera gazı emisyonları büyük ölçüde hafife alınmış olabilir. Rüzgar, jeotermal ve hidroelektrik gibi teknolojiler için çelik ve çimento önemli girdilerdir, ancak

modele dahil edilen çeşitli minerallerin çelik üretmek için gerekli olması nedeniyle, olası çift sayım sorunları nedeniyle bu analizde hesaba katılmamıştır. Bu iki endüstrinin sera gazı ayak izini azaltmaya yönelik uluslararası iş birliğinin artırılması, düşük karbon teknolojilerinin üretimini yukarı akış perspektifinden etkili bir şekilde karbondan arındırmak için çok önemli olacaktır.

Bu düşük karbonlu teknolojilerin bir kısmının kullanım ömürlerinin sonuna gelindiğinde geri dönüştürülmesi, birincil mineral üretimiyle ilişkili emisyonların azaltılmasına yardımcı olabilir; ancak geri dönüşüm süreçlerinin enerji yoğunluğuyla ilişkili emisyonların da dikkate alınması gerekir. Geri dönüşüm tek başına mineral tedarikiyle ilişkili tüm emisyonları ortadan kaldıramaz, ancak bu emisyonların bazılarını azaltmada önemli bir etkiye sahip olabilir. Örneğin, ikincil alüminyum (örneğin, geri dönüştürülmüş içerik) birincil alüminyum üretiminden gelenin yaklaşık %5-10'u kadar bir karbon ayak izine sahip olabilir (Nuss ve Eckelman 2014). Bu nedenle geri dönüşümü artırmak daha temiz bir enerji sistemine geçişte büyük ölçüde yardımcı olabilir, ancak mineral hurdasının bulunabilirliği ve bazı uygulamalarda malzemelerin saflığına duyulan ihtiyaçla ilgili zorluklarla yüzleşmek ve geri dönüşüm süreçlerinin emisyon yoğunluğunu azaltmak gerekir.

Modelin Ötesindeki Riskler

Burada sunulan model, iklim değişikliği konusunda farklı hırs seviyeleri altında mineral talebi için potansiyel gelecekteki yollara ilişkin temel içgörüler sağlar; ancak, karmaşık bir sistemin yalnızca bir parçası hakkında bulgular sunar. İki önemli alan, arz ve daha geniş çevresel ve sosyal riskler ele alınmamıştır, ancak raporun daha geniş bağlamını anlamak için önemlidirler.

Tedarik Riskleri

Genel olarak, minerallere olan talebin yüksek, çeşitli ve bazı durumlarda belirsiz olması muhtemeldir. Teknoloji ve alt teknoloji dağıtımlarındaki değişiklikler, piyasa koşulları ve ulusal ve uluslararası eğilimlerle dalgalanacaktır. Arzın bu talebi karşılayabilmesini sağlamak kritik öneme sahiptir ve birincil mineral üretiminin olumsuz sonuçlarını en aza indirirken aynı zamanda şunları sağlar:

Düşük karbonlu geçişin tamamı veya bu geçiş içindeki temel teknolojiler için kritik öneme sahip mineraller pazara sürekli olarak tedarik edilmektedir. Tedarik riskini anlamak, hem tüketici hem de üretici olan gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için SDG 7 ve 13'ü karşılamak açısından hayati öneme sahiptir. Bu analiz, temel, değerli ve nadir minerallerin artan çıkarımı ve üretimiyle ilişkili maddi etkiler de dahil olmak üzere tedarik konusunu ele almamaktadır.

Bu rapor potansiyel mineral tedarik risklerini dikkate almasa da, kaynak açısından zengin gelişmekte olan ülkelerin bu stratejik minerallerin önemli bir bölümünü üreterek ve bunları küresel pazara tedarik ederek temiz enerji geleceğine büyük katkıda bulunacakları temeline dayanmaktadır. Dünya Bankası'nın Düşük Karbonlu Bir Gelecek İçin Minerallerin ve Metallerin Büyüyen Rolü (2017) temelinde, bu stratejik mineralleri üretmede potansiyel olarak önemli bir role sahip olan bir dizi önemli gelişmekte olan ülke belirlenmiştir.

Daha Geniş Çevresel ve Sosyal Riskler

Bu rapor, kaynak açısından zengin gelişmekte olan ülkelerin SDG 7 ve 13'ü gerçekleştirmek için ihtiyaç duydukları mineralleri sürdürülebilir ve sorumlu bir şekilde üretmelerine yardımcı olma arayışlarında politika yapıcıları, özel sektör aktörlerini ve sivil toplum örgütlerini bilgilendirecektir. Belirli iklimle ilgili risklerin ötesinde, artan mineral çıkarımının diğer çevresel ve sosyal risklerinin de tedarik zinciri boyunca dikkate alınması gerekir. Bunlar, GHG emisyonlarına odaklanıldığı için bu analizde ele alınmamıştır.

Daha geniş bir çevresel bakış açısından, örneğin, madencilik sektörünün su yoğunluğu ve ormansızlaşmanın etkisi, bu minerallerin temiz enerji teknolojilerini sürdürülebilir bir şekilde tedarik etmek için nasıl üretilmesi gerektiğine entegre edilmelidir. Sosyal bir bakış açısından, madenciliğin yerel topluluklar üzerindeki etkisi gibi konuları anlamak, temiz bir enerji sistemine geçişin herkes için faydalı olmasını sağlamak için hayati önem taşımaktadır. Minerallerin düşük karbonlu geçiş için ne kadar kritik olduğu göz önüne alındığında, bu daha geniş çevresel ve sosyal riskleri ele almamak, sera gazı emisyonlarını azaltmak için gereken yenilenebilir elektrik üretimi ve enerji depolama teknolojilerine karşı bir tepkiyi kolaylaştırabilir.⁵⁶

56 Dünya Bankası'nın son raporları gibi Orman Akıllı Madencilik: Büyük Ölçekli Madenciliğin Ormanlar Üzerindeki Etkileriyle İlişkili Faktörlerin Belirlenmesi(2019) ve Dayanıklılık Oluşturma: Madencilik Yatırımını Harekete Geçirmek İçin Yeşil Büyüme Çerçevesi(2019) ve IFC ve ICMM'nin Paylaşılan Su, Paylaşılan Sorumluluk, Paylaşılan Yaklaşım: Madencilik Sektöründe Su(2017) bu zorluklardan bazıları aydınlatılmış ve potansiyel çözümler sunulmuştur. Artan mineral üretiminin daha geniş çevresel ve sosyal risklerini anlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulacaktır.

Sonraki Adımlar ve Eylemler

The **Dünya Bankası Grubu'nun İklim Akıllı Madencilik** Girişim, mineral ve metallerin sürdürülebilir şekilde çıkarılmasını ve işlenmesini destekleyerek temiz enerji teknolojileri için tedarik güvence altına alırken, bu malzemelerin değer zinciri boyunca iklim ve malzeme ayak izlerini en aza indirir ve mineral açısından zengin gelişmekte olan ülkelerde teknik yardım ve yatırımları artırır. Bu hedeflere ulaşmak iklim için önemli bir kazan-kazan durumu oluşturacaktır: İddialı iklim senaryoları altında gerekli olan yenilenebilir ve depolama teknolojilerinin geniş çapta yaygınlaştırılmasına olanak tanırken, bu teknolojilerle ilişkili emisyonları ve malzeme ayak izlerini en aza indirecektir. Hangi minerallerin hangi enerji teknolojileri ve alt teknolojileri için gerekli olduğunu anlayabilmek, yenilenebilir enerji geliştiricilerinin, madencilerin ve hükümetlerin mineral talebini, çevresel ve iklimle ilgili riskleri azaltmak için temiz enerji tedarik zinciri boyunca başlıca risklerin nerede yattığını anlamalarına yardımcı olmak için çok önemlidir.

The **İklim-Akıllı Madencilik** Girişim, hükümetler, kalkınma ortakları, endüstriler ve sivil toplumla birlikte çalışarak bu zorlukları ele alıyor. İklim açısından akıllı madencilik talepleri risklerine ilişkin bir anlayışla birleştirmek, iklim, enerji ve madencilik paydaşlarına artan iklim hırsının karbon ve malzeme ayak izlerini azaltma fırsatlarını belirlerken istikrarlı bir mineral tedariki sağlamak için eyleme geçirilebilir içgörüler sağlayabilir. Tedarik zincirindeki her paydaşın oynayacağı bir rol vardır:

- **İklim politikası yapımcıları:** Minerallerin temiz enerji geçişini sağlamada hayati bir rol oynamasıyla, iklim topluluğu üyelerinin, kaynak açısından zengin gelişmekte olan ülkeler ve madencilik endüstrisi de dahil olmak üzere bu minerallerin üreticileriyle yakın bir şekilde çalışarak ilişkili emisyonların etkili bir şekilde azaltılmasını sağlaması hayati önem taşıyacaktır. Mineral üretiminden kaynaklanan emisyonları azaltmayı öncelik haline getiren mineral açısından zengin ülkeler, **iklime duyarlı madencilik** uygulamaları, karbon giderme çabalarını Paris Anlaşması kapsamındaki NDC'lerine entegre edebilir. Bu zorluklardan bazılarını ele almak için iklim paydaşları şunları yapabilir:

- İklim dostu madencilik uygulamaları yoluyla mineral üretiminden kaynaklanan emisyonları azaltmayı bir öncelik haline getiren mineral açısından zengin ülkeleri aktif olarak destekleyin ve karbon azaltma çabalarını NDC'lerine entegre etmelerine yardımcı olun.
- Madenlerin madenler ve işleme tesisleri arasında taşınmasından kaynaklanan emisyonlar ve bu teknolojilerin üretiminden kaynaklanan emisyonlar da dahil olmak üzere, düşük karbonlu teknolojilerin tüm tedarik zincirini karbondan arındırmayı amaçlayan önlemleri destekleyin.
- İklim değişikliğini azaltma stratejileri için daha hedefli bir yaklaşım gerektiren minerallere odaklanmak ve belirli temiz enerji teknolojilerini tedarik etmek için talep risk matrisi gibi yeni ve mevcut çerçevelerden yararlanın.
- **Temiz enerji paydaşları:** Enerji sektörü, geliştirdikleri ve kullandıkları düşük karbonlu teknolojilerin sürdürülebilir ve sorumlu bir şekilde üretilmesini sağlamada ve bu teknolojilerin kullanım ömürlerinin sonuna geldiklerinde atık yönetimini hesaba katmada önemli bir rol oynamaktadır. Enerji topluluğu, ülkeler ve madencilik şirketleriyle etkileşime girerek mineral üreticilerinin karbon ayak izlerini azaltmalarına yardımcı olmada rol oynayabilir. Madencilik sektörü dünyanın toplam enerji tüketiminin %2-11'ini oluşturduğundan, enerji sektörünün minerallerin temiz enerji kaynakları kullanılarak üretilmesini sağlamak için madencilerle yakın bir şekilde çalışması önemli olacaktır **ve iklime duyarlı madencilik** uygulamaları. Özellikle enerji sektörü şunları yapmalıdır:
 - Madencilerle çalışarak iklim dostu madencilik uygulamalarını benimsemelerine yardımcı olmaktan, bu teknolojilerin kullanım ömrünü artırmak için devre dışı bırakma, yeniden kullanma, geri dönüştürme ve yenileme işlemlerini kolaylaştırmaya kadar teknolojilerinin tüm tedarik zincirinin çevresel ve karbon ayak izlerini azaltmaya odaklanmak.
 - Bu zorluklara bütünsel bir bakış açısıyla yaklaşılmasına yardımcı olmak için madencilik sektöründeki paydaşlarla ve geri dönüşüm sektöründe yer alan kişilerle bağlantı kurun.
 - Talep riski matrisi gibi çerçeveleri kullanarak, en büyük talep zorluklarının nerede olabileceğini ve belirli malzemelerin kullanımını azaltmak için inovasyonun hangi noktalara odaklanması gerekebileceğini anlayın.

- **Madencilik Paydaşları:** Madencilik topluluğu, tedarik ettikleri minerallerle ilişkili iklim ve malzeme ayak izlerinin en aza indirilmesini sağlayarak SDG 7'ye katkıda bulunan bir kuruluş olarak kendini konumlandırmalıdır. Bu mineralleri çıkarmak için gereken enerji, su ve arazi miktarını azaltmak için yenilik gereklidir. Bu zorlukları ele alan önlemler alınmadan, **iklime duyarlı madencilik** uygulamaları, madencilik sektörünün kendisini temiz enerji geçişinin şampiyonu ve destekleyicisi olarak konumlandırmasını zorlaştıracaktır. Sektör için önerilen belirli eylemler:

- Düşük karbonlu geçiş için ihtiyaç duyulan kritik minerallerin tedarik edilmesinde karbon ve malzeme ayak izlerini azaltmak amacıyla iklim dostu madencilik uygulamalarının kullanımını yaygınlaştırmak.
- Düşük karbonlu teknoloji tedarik zincirlerinin tüm aşamalarında yer alan kişilerle ağlar kurarak, düşük karbonlu geçiş için ihtiyaç duyulan malzemelerin tedarikindeki fırsatlar, zorluklar ve riskler konusunda anlayışın geliştirilmesine yardımcı olun.
- Yeşil mineral tedarik zincirlerine yeni teknolojik gelişmeler geliştirmek ve paylaşmak için inovasyonu teşvik edin ve savunun. Bu, su kullanımını azaltmak, enerji verimliliğini artırmak, temiz enerji kamyonları ve işleme teknolojisi dağıtmak ve mineral geri dönüşüm fırsatlarını keşfetmek için yeni yöntemler geliştirmeyi içerir.

- **Hükümetler:** Politikalar, şunların sağlanmasında önemli bir rol oynayacaktır: **iklime duyarlı madencilik** düşük karbon teknolojilerinin tüm tedarik zinciri boyunca, bu minerallerin tedarikini sürdürülebilir ve sorumlu yollarla güvence altına almak ve bu minerallere dairesel bir yaklaşım entegre etmek için uygulamalar benimsenir. En önemlisi, politika yapıcılar aşağıdakileri yapmayı düşünmelidir:

- Temiz enerji dönüşümünde kullanılan teknolojilerin geri dönüştürülmesi, yeniden kullanılması ve yenilenmesine yönelik ekonomik ve teknik engelleri teşvik etmek, desteklemek ve ortadan kaldırmak.
- En büyük talep risklerinin nerede ortaya çıkabileceğini anlamak için madencilik sektörü ve yenilenebilir enerji geliştiricileriyle birlikte çalışın.
- İklim dostu madencilik uygulamalarının teşvik edilmesi ve desteklenmesi, ekonomik ve teknik engellerin ortadan kaldırılması için madencilik sektörü ve bu mineralleri üreten ve tüketen kullanıcılarla birlikte çalışın.



Rio Tinto, Diavik Elmas Madeni, Kanada

İklim Eylemi İçin 100 Mineral: Temiz Enerji Geçişinin Mineral Yoğunluğu



Ek A. İklim-Akıllı Madencilik Hakkında

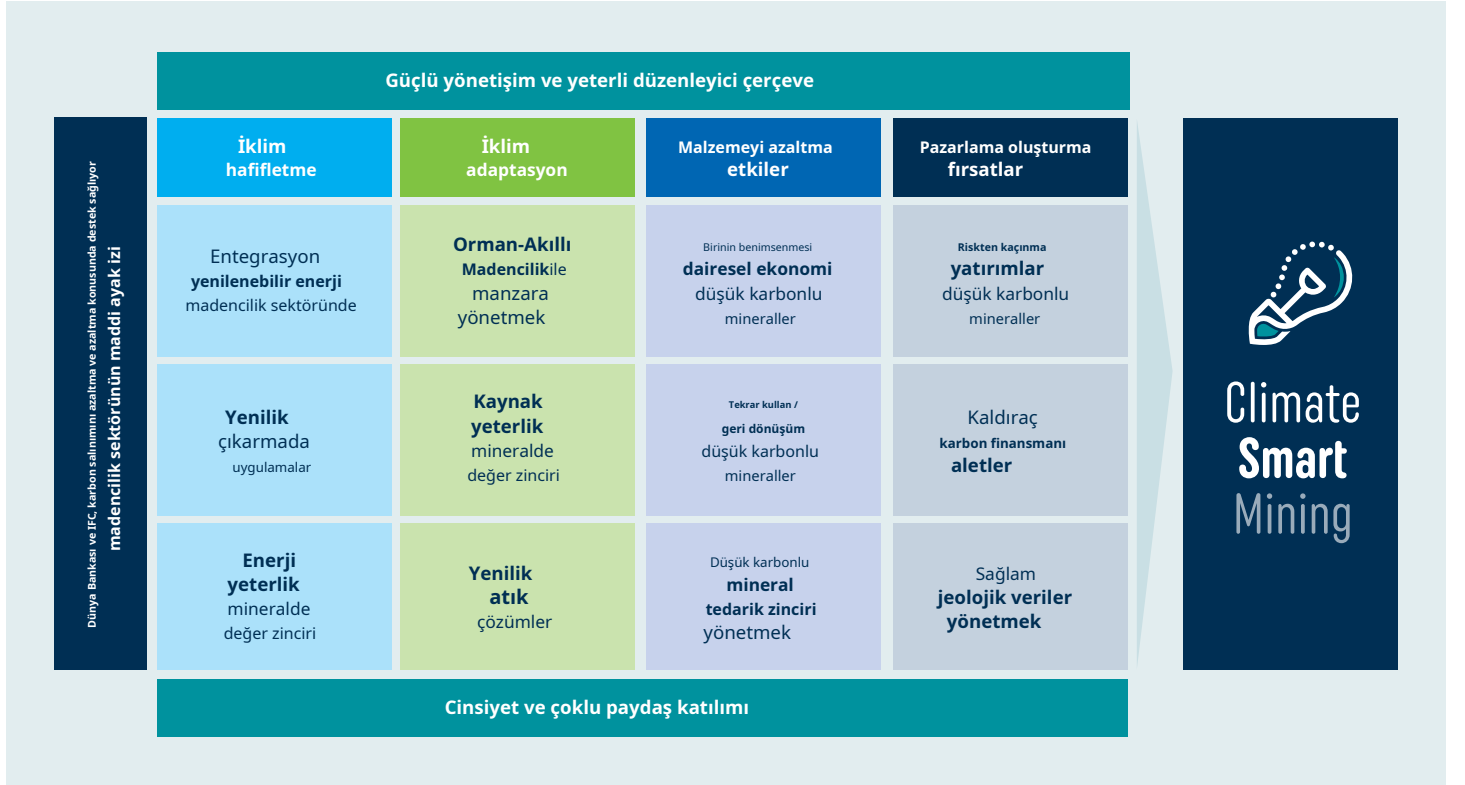
İklim Akıllı Madencilik Girişimi, kaynak açısından zengin gelişmekte olan ülkelerin minerallere ve metallere olan artan talepten faydalanmalarına yardımcı olurken, madencilik sektörünün çevresel ve iklim ayak izlerini en aza indirecek şekilde yönetilmesini sağlayacak.⁵⁷

Girişim, kaynak açısından zengin gelişmekte olan ülkelerde teknik yardım ve yatırımları artırarak, bu malzemelerin değer zinciri boyunca sosyal, çevresel ve iklim ayak izlerini en aza indirerek temiz enerji teknolojileri için arz güvenliğini sağlamak amacıyla minerallerin ve metallerin sorumlu bir şekilde çıkarılmasını ve işlenmesini destekliyor.

Minerallere ve metallere yönelik artan talep, kaynak açısından zengin gelişmekte olan ülkeler ve sektör için ekonomik fırsatlar sağlarken, iklim odaklı temiz enerji geçişi sorumlu ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmezse önemli zorluklar ortaya çıkacaktır. İklim açısından akıllı madencilik uygulamaları olmadan, madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan olumsuz etkiler artacak ve gelişmekte olan ülkelerdeki zaten savunmasız toplulukların yanı sıra faaliyet gösterdikleri çevreyi de etkileyecektir.

İklim Akıllı Madencilik Girişimi, madencilik ve elektrik endüstrilerinin karbonsuzlaştırılmasının, bu stratejik minerallere ev sahipliği yapan kaynak zengini ülkelere ve bunların çıkarılmasından doğrudan etkilenen topluluklara, ayrıca iklim hedeflerine ulaşmak için yenilenebilir enerji teknolojilerini kullanması beklenen gelişmekte olan ülkelere de fayda sağlamasını garantilemek amacıyla Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ve Paris Anlaşması ile uyumlu olarak geliştirilmiştir.

Şekil A.1 İklim Akıllı Madencilik Yapı Taşları



Ek B. Metodoloji

Modelde bir dizi varsayım, veri ve yöntem kullanıldı. Bu ek, raporda tartışılan metodolojiyi genişletiyor.

Enerji Depolama Varsayımları

Gelecekteki enerji depolama yollarını modellemek, söz konusu farklı teknolojilerin hızla ortaya çıkması ve yararlanılacak kamuya açık senaryoların göreceli eksikliği nedeniyle zordur. Bu nedenle, literatürün geniş bir şekilde okunması ve endüstri uzmanlarıyla yapılan tartışmalar temelinde bir dizi varsayımda bulunulmuştur.

• Otomotiv enerji depolama varsayımları

- 2030 yılına kadar, otomotiv enerji depolamasının tamamı lityum iyon pillerle karşılanıyor. 2030 yılına kadar, kurşun-asit pillerin kullanımı doğrusal olarak sifıra düşüyor.

• Otomotiv enerji depolama varsayımları

- 2030 yılına kadar, otomotiv enerji depolamasının tamamı Li-ion pillerle karşılanıyor. 2030 yılına kadar, kurşun-asit pillerin kullanımı doğrusal olarak sifıra düşüyor.

• Sabit enerji depolama varsayımları

- Enerji depolama ihtiyacının yüzde 90'ı şebeke ölçeğinde enerji depolama, yüzde 10'u ise merkezi olmayan kaynaklardan karşılanıyor.
- Merkezi olmayan enerji depolama, 2050 yılına kadar kurşun-asit, Li-ion ve diğer enerji depolama teknolojilerinin eşit bir karışımına dönüşecek.
- Şebeke ölçeğinde enerji depolama, Li-ion pillerin çoğunluğu (kapasitenin %70-84'ü, senaryoya bağlı olarak) ve küçük bir kurşun-asit yüzdesi (%2,5-5) tarafından karşılanmaktadır. Diğer teknolojiler (çoğunlukla pompalı enerji depolama) %17 ile %25 arasında önem kazanırken, vanadyum redoks akış pilleri, senaryoya bağlı olarak 2050 yılına kadar kapasitenin %2,8 ile %3,7'sini karşılamak için yılda %5 oranında ek kapasite oranında büyümektedir.

Ağırlıklı Kapsam-Konsantrasyon Endeksi

Ağırlıklandırılmış kapsam-konsantrasyon endeksi, iki ögenin eşit ağırlıklandırılmasıyla hesaplanır: (1) bir mineral gerektiren teknolojilerin sayısı ve (2) tek bir teknolojiden gelen minerallere olan talebin payı. Bu endeks, bakır için 1'e normalize edilir ve diğer tüm mineraller bu minerale göre derecelendirilir. İki bileşen aşağıdaki şekilde hesaplanır:

- *Bir minerale ihtiyaç duyulan teknolojilerin sayısı.* Bu, mineralin kaç teknolojiye rol oynadığı sayılarak hesaplanır. Enerji depolamada kullanılan tüm minerallere, enerji üretimine kıyasla enerji depolamadan gelen minerallerin genel talebine göre bir değer verilir (%6). Üretim teknolojilerinde de kullanılan minerallere, minerallerin kullanıldığı teknolojilerin hesaba katıldığı 2DS'de 2050'deki toplam kurulu kapasite payına göre bir puan verilir ve üretimde kullanılan toplam mineral miktarıyla çarpılır (%94). Örneğin, bir mineral sadece rüzgarda kullanılsaydı, 0,22 puan alırdı çünkü rüzgar 2050'de kurulu kapasitenin %23'ünü oluştururdu ve bu %94 ile çarpılırdı. Bir mineral ne kadar çok teknolojiye dahil olursa, değeri o kadar yüksek olur.
- *Tek bir teknolojiden elde edilen minerale olan talep payı.* Bu, bir teknolojiden gelen talebin en büyük yüzdellik payının 1'den çıkarılmasıyla hesaplanır. Örneğin, bir minerale olan talebin yüzde 60'ı rüzgardan geliyorsa, bu $1 - 0,6 = 0,4$ olarak hesaplanır. Bunun arkasındaki fikir, herhangi bir teknolojiden gelen pay ne kadar düşükse, mineralin o kadar çok kesişen olmasıdır.

2018–2050 Üretim-Talep Endeksi

2018–2050 üretim-talep endeksi, yukarıda tartışıldığı gibi mutlak ve göreceli talebin ortalaması üzerinden hesaplanır. Bu endeksi hesaplamak için kullanılan veriler tablo B.2'de verilmiştir.

Tablo B.1 Temiz Enerji Geçişinin Mineral Talebi Zorlukları Üzerindeki Etkileri

Kadran	Kategori	İma
1. Kadran	Orta etkili mineraller	1. Kadran mineralleri daha az öncelikli görünebilir, ancak durum böyle olmayabilir. Bu minerallerden bazıları temel alt teknolojiler için kritik olabilir ve bazı ikameler mümkün olsa da temiz enerji geçişi için stratejik olarak önemli olabilirler. Bu mineraller 2. Kadran minerallerinin karşılaştığı yüksek talep seviyeleriyle veya 3. ve 4. Kadranların karşılaştığı istikrarlı koşullarla karşılaşmayabileceğinden, bu minerallere daha az öncelik verilebilir, ancak bu da arz kısıtlamaları varsa kritikliklerinin potansiyel olarak artmasıyla sonuçlanabilir.
2. Kadran	Yüksek etkili mineraller	2. kadrandaki minerallere olan talep çok daha yüksektir, ancak belirli teknolojilerde veya alt teknolojilerde çok daha yoğunlaşmıştır. Talep büyümesi önemli olabilir, ancak politika, piyasa koşulları veya diğer temel faktörlerdeki değişimler farklı teknoloji veya alt teknoloji türlerinin daha büyük veya daha düşük seviyelerde konuşlandırılmasına neden olursa potansiyel olarak daha çeşitli olabilir.
3. Kadran	Yüksek etkili, kesişen mineraller	3. Kadran mineralleri, geniş bir teknoloji yelpazesinden gelen yüksek talep seviyelerini karşılamamın ikili zorluğuyla karşı karşıyadır. 2. Kadran mineralleriyle aynı teknoloji seçimi zorluklarıyla karşılaşmazlar, ancak 4. Kadran minerallerinden daha yüksek seviyelerde göreceli taleple karşı karşıyadırlar. Bu nedenle talep baskılarının bu minerallerde en yüksek ve en istikrarlı olması muhtemeldir.
4. Kadran	Kesişen mineraller	4. Kadran, istikrarlı ve sabit talep seviyelerini temsil eder. Bu alandaki mineraller enerji teknolojisindeki değişimlere o kadar bağımlı değildir ve daha yüksek iklim hırsı seviyelerinin bu minerallerde genel olarak artışlara yol açması muhtemeldir. Bu nedenle talep büyümesinin öngörülebilir ve sabit olması muhtemeldir.

Tablo B.2 2018 Maden Üretimi ve 2050 Enerji Teknolojilerinden Tahmini Yıllık Talep

Mineral	2018 yıllık üretim (Tonlarca, binlerce) ^a	2050 tahmini yıllık enerji talebi teknolojiler (Ton, binlerce)	2050 yılına kadar enerji teknolojilerinden beklenen yıllık talep yüzde olarak 2018 yıllık üretimi
Alüminyum	60.000	5.583	%9
Krom	36.000	366	%1
Kobalt	140	644	460%
Bakır	21.000	1.378	%7
Grafit	930	4.590	494%
İndiyum	0,75	1,73	%231
Ütü	1.200.000	7.584	%1
Yol göstermek	4.400	781	%18
Lityum	85	415	%488
Manganez	18.000	694	%4
Molibden	300	33	%11
Neodimyum	23 ^b	8.4	%37
Nikel	2.300	2.268	%99
Gümüş	27	15	%56
Titanyum	6.100	3.44	0%
Vanadyum	73	138	%189

a. 2018 yılı yıllık üretim verileri ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu'ndan alınmıştır.

b. Veriler Deetman ve ark. (2018) tarafından sağlanmıştır.



Küresel Isınma Potansiyeli

Burada sunulan temiz enerji geçişinde kullanılan minerallerin GWP tahminleri bir dizi uyarı ve gelecekteki araştırmalar için yollar ile birlikte gelir. Bunlar tarihsel kaynaklardan kilogram başına GWP'ye dayanır ve statiktir; yani ilgili düşük karbonlu teknolojilerin bileşimindeki değişiklikleri hesaba katmazlar. Ayrıca elektrik karışımındaki gelecekteki değişiklikleri, azalan cevher derecelerini, değişen teknolojileri, göreceli fiyatlardaki değişimleri veya geri dönüşüm faaliyetlerindeki artışları da hesaba katmazlar. Ayrıca yenilenebilir enerji teknolojileri oluşturmak için gereken minerallerin çıkarılmasından kaynaklanan sağlık, su ve ekosistem kaybı gibi daha geniş çevresel etkileri de hesaba katmazlar.

Nuss ve Eckelman (2014) verilerini hesaplamak için çok çeşitli veri kaynaklarından yararlandı ve her metal için çeşitli üretim tekniklerini dahil ederek her üretim tekniğinin geçmiş paylarına göre metal başına GWP'nin ağırlıklı ortalamasını oluşturdu. GWP tahmininin ardındaki ayrıntılar çoktur ve çok çeşitli veri, teknik ve varsayımlara dayanmaktadır. Örneğin, bakır üretimi farklı cevher türlerini kullanan yedi farklı üretim tekniğine dayanmaktadır.

Kilogram başına GWP tahminleri, tarihsel verilere dayalı birincil ve ikincil üretimin payına dayanmaktadır. Ana raporda tartışıldığı gibi, temel metallerin geri dönüşümü önemli ölçüde artarsa, o zaman nihai GWP

talep edilen metal önemli ölçüde değişebilir. Örneğin, Nuss ve Eckelman (2014), boksit cevherinden elde edilen birincil alüminyumun GWP'sini, ikincil alüminyumun GWP'sinin 8,7 ile 30,5 katı arasında tahmin etmiştir (kullanılan hurda alüminyumun kaynağına bağlı olarak). Bu nedenle, ikincil alüminyum üretimindeki önemli artışlar, enerji teknolojilerinde kullanılan alüminyumun genel GWP'sini azaltacaktır; hurda alüminyumun kolayca bulunabilmesi şartıyla.

Cevher derecelerine ilişkin olarak, van der Voet ve diğerleri (2019) boksit, demir veya manganez için cevher derecelerinin düştüğüne dair çok az kanıt buldular, ancak bakır, çinko, kurşun ve nikel için uzun vadeli düşüş eğilimleri buldular ve bu, aynı miktarda cevher elde etmek için malzemeleri çıkarmak ve işlemek için daha yüksek enerji girdileri nedeniyle GWP sayılarını artırmaya çalışacak. Azalan cevher dereceleri, ilişkili çevresel etkilerde artışa neden olur; örneğin, üretilen atık hacmindeki bir artış, daha büyük atıkların yanı sıra yerel ekosistemler üzerinde etkiler üretir. Üretim teknikleri için, yazarlar yine farklı etkiler buldular ve çelik üretiminde enerji talebini azaltan iyileştirilmiş işlem verimliliklerinde açık bir eğilim var. Boksit cevherinin alüminyaya işlenmesi için böyle bir ilerleme kaydedilmedi ve alüminanın alüminyuma dönüştürülme verimliliğinde yalnızca yavaş bir iyileşme sağlandı.

Çıkarılacak sonuç, kilogram başına öngörülen gelecekteki GWP'de tutarlı bir iyileşme modelinin olmadığıdır.

Metaller—yollar, enerji kaynağı olarak elektriğe olan bağımlılığa ve diğer faktörlere bağlı olarak metalden metale farklılık gösterecektir.⁵⁸

Bu alanda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır ve van der Voet ve diğerleri (2019) tarafından yürütülen çalışmalar genişletilmektedir. Model, kilogram başına GWP'deki bu önemli gelecekteki değişiklikleri not eder ancak analiz yapmak için Nuss ve Eckelman'ın (2014) statik verilerini başlangıç noktası olarak kullanır ve yukarıda tartışılan sınırlamaları ve gelecekteki değişiklikleri not eder.

Alüminyum Emisyonlarının Değiştirilmesi

Boksit cevherinden alüminyum üretimi çok aşamalı bir işlemdir ve çeşitli aşamalarda farklı miktarlarda ve türlerde sera gazı emisyonları yaratır (Şekil B.1). Alüminyum üretiminin karbon yoğunluğunun, elektriğin karbon yoğunluğundaki değişiklikler, süreçte kullanılan teknolojilerin verimliliği ve yerden çıkarılan cevherin derecesi nedeniyle gelecekte değişmesi muhtemeldir.

İşlemin ilk aşaması, boksitin yerden çıkarılmasıdır. İşlemin bu kısmından kaynaklanan emisyonlar, ton başına emisyonların %0,2'sini oluşturur (Tan ve Khoo 2005), toprağı temizlemek ve maden çukurları kazmak için gereken makineleri çalıştırmak ve boksiti çıkarmak ve ezmek için yakıt kullanımından kaynaklanır.

İşlemin bir sonraki aşaması boksitin alüminaya veya alüminyum okside dönüştürülmesidir. Bu, boksitin kostik soda ile sindirilmesi, likör akımlarının berraklaştırılması, alümina hidratının çökeltilmesi ve alüminanın kalsinasyonunu içeren dört aşamalı bir "Bayer" işlemi ile yapılır. Bu son aşama, alüminanın bir fırında 1.000°C'nin üzerindeki sıcaklıklara ısıtılmasını içerir. Bu aşamadaki emisyonlar, fırınların ısıtılması gibi işlemin çeşitli aşamalarında fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan toplam emisyonların yaklaşık %13'ünü oluşturur (Tan ve Khoo 2005).

Son aşama, alüminayı Hall-Héroult işlemiyle alüminyuma dönüştürür. Bu aşama, emisyonların %60-90'ını oluşturan sürecin en karbon yoğun kısmıdır (Carbon Trust 2011). Büyük miktarda elektrik kullanımını içerir ve

bu nedenle emisyonları elektrik kaynağına bağlı olarak büyük ölçüde değişir. İşlem, alüminanın elektrolizini içerir. Elektroliz işlemi, oksijeni alüminadan (veya alüminyum oksitten) ayıran ve onu anottaki karbona bağlayan karbon anotlarını içerir, CO (ve diğer sera gazları) oluşturur ² süreçte. Dolayısıyla emisyonlar hem söz konusu elektrikten hem de sürecin doğrudan bir sonucu olarak ortaya çıkar.

Emisyonlar alüminyum üretim sürecinin üç aşamasında da potansiyel olarak değişebilir. Bu değişimlerin ölçeği, yenilenebilir kaynakların elektrik şebekesine nüfuz etmesine, teknoloji iyileştirmelerine ve çıkarılan cevherdeki değişikliklere bağlı olacaktır. Bu değişimler, alüminyumun karbon yoğunluğunun farklı yönlere kaymasına neden olabilir. Yenilenebilir kaynakların daha fazla nüfuz etmesi, karbon yoğunluğunun azalmasına neden olurken, azalan cevher kalitelerinin karbon yoğunluğunu artırması muhtemeldir.

Literatürde emisyonların gelecekteki yoluna ilişkin tahminler nadirdir, ancak van der Voet ve diğerleri (2019) uyarlanmış GEO-4 senaryoları altında tahminler sunmaktadır. Yazarların WEO 450 senaryosuna bağlı olduğu sürdürülebilir bir kalkınma senaryosu olan eşitlik öncelikli senaryo kapsamında alüminyum emisyonları 2050 yılına kadar ton başına %43 oranında düşmektedir. Senaryolar tamamen benzer olmasa da bu değişimlerin etkisi 2DS kapsamında 2050 yılına kadar alüminyumun GWP tahminlerinde gösterilmektedir. Enerji teknolojilerinde kullanım için toplam alüminyum emisyonları 2DS kapsamında 840 MtCO e'den 550 MtCO e'ye düşmektedir (eğer, kullanım ömrü sonu geri dönüşüm oranları 2050 yılına kadar %100'e çıkarsa 454 MtCO e'ye düşmektedir). Bu değişim, düşük karbonlu geçişin kendisinin gerekli minerallerden kaynaklanan emisyonların bir kısmını azaltmaya yardımcı olabileceği ölçeği göstermektedir, ancak hepsini değil. Hall-Héroult sürecinde inert anotların kullanımı ve elektroliz aşamasında elektrik kullanımını azaltmaya odaklanan inovasyon (IEA 2019e) dahil olmak üzere, sürecin çeşitli aşamalarında azaltma seçenekleri mevcuttur. Ancak, minerallerin çıkarılması ve işlenmesinde yer alan emisyonları azaltmak için daha fazla eyleme ihtiyaç vardır; bu, İklim Akıllı Madencilik Girişimi için kritik bir çalışma alanıdır.

58 Van der Voet ve diğerleri (2019) gelecekteki metal talebini tahmin ederken GEO-4 senaryolarını kullanır. Farklı metallerin karbon ayak izindeki farklı etkiler, piyasalar birinci senaryo (küresel piyasaların hakim olduğu bir senaryoyu temsil eder) altındaki kilogram metal başına emisyon projeksiyonlarını eşitlik birinci senaryo (sürdürülebilir kalkınmayı temsil eder) altındaki projeksiyonlarla karşılaştırarak görülebilir. CO: Alüminyum için kilogram başına eşdeğer, piyasa senaryosunda %11 ve eşitlik senaryosunda %49 oranında düşüyor. Buna karşılık, bakır için aynı rakam piyasa senaryosunda %15 artarken eşitlik senaryosunda %24 oranında düşüyor, kurşunun kilogram başına emisyonları ise piyasa senaryolarında %23 ve eşitlik senaryosunda %9 oranında artıyor.

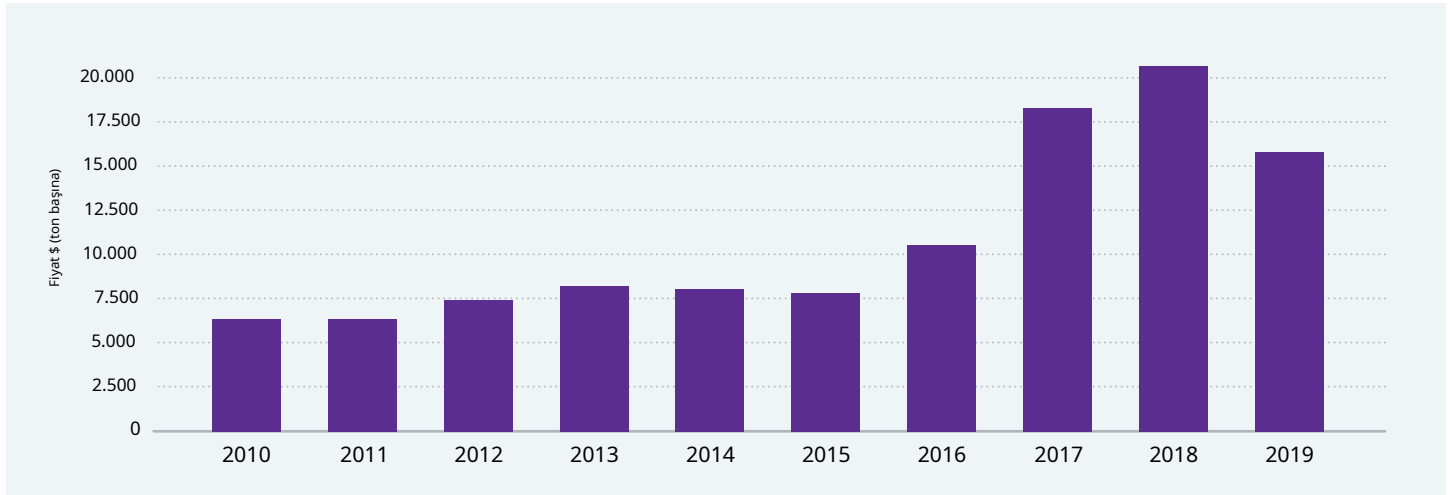
Piyasa Dinamikleri

Bu modelde üretilen talep tahminleri, minerallere yönelik altta yatan (veya gizli) talebi temsil eder. Bu, diğer her şey eşit olduğunda, özellikle arzda veya indüklenen ikame ve verimlilikte değişiklik olmadan meydana gelecek taleptir.

Emtialara olan talebin daha yüksek seviyelerde olması, iki önemli etkiye yol açan daha yüksek fiyatlara yol açabilir: (1) Emtiaların çıkarılması ve üretiminde yer alanlar arzlarını artırır ve (2) bu mineralleri talep edenler, ya diğer minerallerin yerine geçerek ya da minerallerin nasıl kullanıldığına ilişkin verimliliği artırarak ürünlerinde bu minerallerin kullanımını azaltmaya teşvik edilir.

Bu analizde sunulan talep rakamları, bu tür bir ikame veya verimlilik iyileştirmesi mümkün değilse arzın ne kadar ayarlanması gerektiğine dair bir ölçek sağlar. Bu talebin ne kadar risk oluşturduğunu tam olarak ölçmek, hem arz yönlerine hem de ikame ve verimliliğin rol oynayabileceği ölçüğe bağlıdır. Arzla ilgili sorular bu raporun kapsamının ötesindedir, teknoloji ikamesi ve verimlilik soruları ise teknolojiden teknolojiye ve minerallerden minerale önemli ölçüde değişir. Bu yönlerden bazıları, ana raporun 3. bölümündeki Enerji Depolama bölümünde Li-ion pillerdeki lityum, kobalt, nikel ve manganez için araştırılmıştır.

Şekil B.1 Lityum Fiyatları, 2010–2019



Kaynak: Garside 2020.

Teknoloji ikamesi ve arz tepkileri talebin büyük ölçekli artışlarının karşılanmasına izin verse de, talebin bu şekilde hızlı ölçeklenmesi fiyat artışlarına ve düşüşlerine neden olarak hem madencilik hem de yenilenebilir enerji sektörleri için istikrarsızlık ve belirsizlik yaratabilir. Bunun bir örneği lityum pazarındaki son hareketlerde görülebilir. Büyüyen bir elektrikli araç pazarının yanı sıra cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar ve tabletlerden gelen Li-ion pillere olan talebin hızla büyümesi, son yıllarda arzda büyük artışlara neden oldu ve 2017 ile 2018 arasında küresel üretimde %98'lik bir artışla sonuçlandı. Bu da pazarda kısa vadeli bir arz fazlasına neden oldu ve 2019'da lityum fiyatlarında düşüşe neden oldu.

Bu, lityum kullanımında ikame ve teknik verimlilik teşviklerini ve ayrıca gelecekteki lityum arzına yatırım yapma teşviklerini azaltır. Bu, gelecekte fiyat artışlarına neden olarak arzı artırabilir. Bu dinamikleri anlamak, düşük karbonlu geçişin mineral piyasaları üzerindeki etkisini tam olarak anlamak için kritik öneme sahiptir. Her emtia ve teknolojinin belirli özellikleri vardır, bu da piyasa dinamiklerinin her durum için benzersiz olacağı anlamına gelir. Bu nedenle, mineral talebinin ve piyasa dinamiklerinin tam resmini anlamak için emtia ve teknolojiye özgü araştırmalara ihtiyaç vardır.

Ek C. Belirsizlikler

Enerji teknolojilerinden kaynaklanan gelecekteki mineral talebine ilişkin belirsizlik, çeşitli kaynaklardan kaynaklanmaktadır: enerji teknolojilerinin mineral bileşimi, gelecekte devreye alınacak bu teknolojilerin miktarı ve hangi teknolojilerin gerçekten devreye alınacağı.

İlk ikisine ilişkin belirsizlikler, bir dizi metal bileşimi tahmini dahil edilerek ve bir dizi senaryo arasında karşılaştırmalar sağlanarak modelde yakalanır. Raporda sunulan tahminler, etkili bir şekilde bir dağıtımın merkezi noktasıdır. Bu dağıtımlar, bazı durumlarda aşırı geniştir; örneğin, güneş PV'de alüminyum kullanımı, kompozit veya sentetik alternatiflerle değiştirilebilir. Mineralin kullanımının daha az ikame edilebilir olduğu ve literatürde daha az tahmin aralığının olduğu durumlarda, dağıtım çok daha küçüktür.

Düşük karbonlu bir geçiş için gereken minerallerin GWP'sine bakıldığında, gelecekteki mineral talebi seviyelerindeki belirsizlikle birleşen başka bir belirsizlik kaynağı daha vardır: kilogram metal başına gelecekteki GWP'deki belirsizlik. Bu belirsizliğin bir kısmı, Nuss ve Eckelman'ın (2014) kilogram başına GWP tahmin aralığını dahil ederek yakalanmıştır. Ancak, ek B'de tartışıldığı gibi, GWP'deki potansiyel gelecekteki değişiklikler göz önüne alındığında, bunun belirsizliği hafife alma olasılığının yüksek olduğu kabul edilmelidir.

Bu potansiyel aralığının ölçeği, alüminyum için GWP aralığını inceleyerek görülebilir. Güneş PV'de alüminyum kullanımından kaynaklanan GWP, hem kilogram başına GWP'deki hem de güneş PV panellerinde alüminyum kullanımındaki belirsizlik nedeniyle değişir. Nuss ve Eckelman (2014) tarafından verilen mineral kilogram başına GWP'deki belirsizlik, birincil alüminyum ve geri dönüştürülmüş alüminyum arasındaki GWP'deki geniş çeşitliliğin sonucudur (bunun çoğu elektrik kaynağındaki farktan kaynaklanmaktadır: alüminyum üretimi çok güç yoğun olduğundan, güç kaynağı -kömür, gaz veya hidro- çok önemli bir değişkendir).



Bu belirsizlik, özellikle güneş panelleri için gereken bağlantı parçalarında, güneş PV'de alüminyum kullanımının belirsizliğiyle çarpılır. Literatürde bunun için son derece geniş bir aralık verilmiştir. Bunlar birlikte, güneş PV'de alüminyum kullanımı için ortalama GWP'nin büyük olmasına rağmen, alüminyum üretimindeki iyileştirmelerin, ikincil alüminyumun daha fazla kullanımına doğru gidişin ve güneş PV tasarımındaki verimlilik iyileştirmelerinin GWP'yi önemli ölçüde azaltabileceğini vurgulamaktadır.

Referanslar

- Ahmedi, L., SB Young, M. Fowler, RA Fraser ve MA Achachlouei. 2017. "Basamaklı Bir Yaşam Döngüsü: Enerji Depolamada Elektrikli Araç Lityum-İyon Pil Paketlerinin Yeniden Kullanımı Sistemleri." *Uluslararası Yaşam Döngüsü Dergisi Değerlendirme* 22 (1): 111–24.
- AGI (Amerikan Jeoloji Bilimleri Enstitüsü). 2017. *Mineral Kaynağı Olarak Geri Dönüşüm Emtialar*. B. Mander tarafından yazılan ve derlenen Bilgi Notu 2017-001, Mart.
- AIP (Amerikan Fizik Enstitüsü). 2019. "Rüzgar Enerjisinin Büyümesi Gelecekteki Zorluklara ve Umutlara İşaret Ediyor." *BilimGünlük*, Ağustos 13. <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/08/190813112211.htm>.
- Bloomberg. 2019. "Elektrikli Arabalar İçin Lityum Madenciliği Bu Çölün Yerel Çevresine Zarar Veriyor." Çocuk Postu, *Washington Postası*, 12 Haziran. https://www.washingtonpost.com/lifestyle/kidspost/elektrikli-arabalar-icin-lityum-madenciligi-cozumleri-yerel-cevreye-zarar-veriyor/2019/06/12/aa5a5f64-83b9-11e9-95a9-e2c830afe24f_story.html.
- Bomgardner, MM ve A. Scott. 2018. "Yenilenebilir Enerjinin Geri Dönüşümü: Değerli Malzemeleri Atıklardan Uzak Tutmak İçin Eski Piller, Rüzgar Türbinleri ve Güneş Panelleri Üzerindeki Döngüyü Kapatılabilir miyiz? Çöp?" *Kimya ve Mühendislik Haberleri* 96 (15): 34. <https://cen.acs.org/energy/yenilenebilir/Geri-Dönüşüm-yenilenebilir/96/i15>.
- Campero, C. ve LM Harris. 2019. "Su Taleplerinin Yasal Coğrafyaları: Şili'deki Madencilik Bölgelerinde Deniz Suyunun Tuzdan Arındırılması." *su* 11 (5): 886. <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/5/886>.
- Caramia, V. ve B. Bozzini. 2014. "Çinko-Hava Pillerinin Malzeme Bilimi Yönleri: Bir İnceleme." *Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Malzemeler Enerji* 3 (2): 28.
- Karbon Vakfı. 2011. *Uluslararası Karbon Akışlar*. Londra: Karbon Vakfı. <https://www.carbontrust.com/resources/internationalkarbon-akislari>.
- CCSI (Columbia Sürdürülebilirlik Merkezi) Yatırım). 2018. *Yenilenebilir Enerji Maden*. New York: ÇGD.
- Chipindula, J., VSV Botlaguduru, H. Du, RR Kommalapati ve Z. Huque. 2018. "Teksas'taki Kara ve Deniz Rüzgar Çiftliklerinin Yaşam Döngüsü Çevresel Etkisi." *Sürdürülebilirlik* 10 (6): 2022.
- Church, C. ve L. Wuennenberg. 2019. *Sürdürülebilirlik ve İkinci Yaşam: Kobalt ve Lityum Geri Dönüşümünün Önemi*. Winnipeg, Kanada: Uluslararası Sürdürülebilirlik Enstitüsü Gelişim. <https://www.iisd.org/sites/default/files/publications/sustainabilitysecond-life-cobalt-lithium-recycling.pdf>.
- Deetman, S., S. Pauliuk, DP van Vuuren, E. van der Voet ve A. Tukker. 2018. "Elektrik Üretim Teknolojileri, Otomobil ve Elektronik Sektörlerindeki Minerallere Yönelik Talep Artışı Senaryoları "Ev aletleri." *Çevre Bilimi ve Teknoloji* 52 (8): 4950–59.
- ESMAP (Enerji Sektörü Yönetim Yardımı) Programı). 2019. *Küreselleşme: Açık Deniz Rüzgarını Gelişmekte Olan Piyasalara Genişletmek*. Washington, DC: Dünya Bankası.
- EC (Avrupa Komisyonu). 2018. "Pil Uygulamaları için Hammaddeler Raporu." Komisyon Personeli Çalışma Belgesi SWD(2018) 245/2 final, Avrupa Komisyonu, Brüksel.
- Garside, M. 2020. "Lityum Karbonat Fiyatı 2019–2019." Statista, 7 Şubat. <https://www.statista.com/statistics/606350/batterygrade-lityum-karbonat-fiyat/>.
- GCCSI (Küresel CCS Enstitüsü). 2019. "Küresel CCS Veritabanına Yeni Büyük Ölçekli CCS Tesisleri Eklendi." Insights, 18 Kasım. <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/insights/global-ccs-veritabanina-yeni-buyuk-olcekli-ccs-tesisleri-eklendi/>.
- Goldie-Scot, L. 2019. "Lityum-iyon Pil Fiyatlarına İlişkin Sahne Arkası Bir Bakış." BloombergNEF, 5 Mart. <https://about.bnef.com/blog/behindscenes-take-lithium-ion-battery-prices/>.
- Guilbaud, JJ 2016. "Madencilik Endüstrisi için Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri: Sistem Maliyetleri, Güvenilirlik Maliyetleri ve Portföy Maliyet Riskleri." Doktora tezi, University College London.
- Hagelüken, C. 2012. "Platin Grubu Minerallerinin Geri Dönüşümü: Avrupa Perspektifi." *Platinum Minerals İncelemesi* 56 (1): 29–35.
- IEA (Uluslararası Enerji Ajansı). 2016. *Enerji Teknoloji Perspektifleri 2016: Sürdürülebilir Kentel Enerji Sistemlerine Doğru*. Paris: IEA.
- — — . 2017. *Enerji Teknolojisi Perspektifleri 2017: Enerji Teknolojisi Dönüşümlerini Tetiklemek*. Paris: IEA. <https://www.iea.org/etp/>.
- — — . 2018. *Küresel Elektrikli Araç Görünümü 2018*. Paris: IEA.
- — — . 2019a. *Yakıttan Kaynaklanan CO Emisyonları Yanma 2019*. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuelcombustion-2019>.
- — — . 2019b. *Küresel Elektrikli Araç Görünümü 2019*. Paris: IEA.
- — — . 2019c. *Dünya Enerji Görünümü 2019*. Paris: IEA.
- — — . 2019g. *Yenilenebilir Enerji 2019*. Paris: Uluslararası Enerji Ajansı. <https://www.iea.org/raporlar/yenilenebilir-enerji-2019>.

- — — . 2019t. *Yenilik Boşlukları*. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/innovationgaps> .
- — — . 2019f. *Temiz Enerji Yollarını Keşfetmek: CO Depolamanın Rolü*. Paris: IEA.
- IFC (Uluslararası Finans Kurumu) ve ICM (Uluslararası Madencilik ve Mineraller Konseyi). 2017. *Paylaşılan Su, Paylaşılan Sorumluluk, Paylaşılan Yaklaşım: Su Madencilik Sektörü*. Washington, DC ve Londra: IFC ve ICM.
- IRENA (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı). 2018. *Yenilenebilir Kapasite İstatistikleri 2018*. Abu Dabi: IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2018.pdf .
- — — . 2019a. *Küresel Enerji Dönüşümü: 2050'ye Giden Yol Haritası*. Abu Dabi: IRENA.
- — — . 2019b. *Yenilenebilir Kapasite İstatistikleri*. Abu Dabi: IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2019.pdf .
- — — . 2019c. *Yenilenebilir Enerji Üretimi 2018'deki maliyetler*. Abu Dabi: IRENA.
- — — . 2019d. "Güneş Enerjisi." <https://www.irena.org/gunes> .
- Johnson Matthey. 2019. *PGM Pazar Raporu: Mayıs 2019*. Londra: Johnson Matthey.
- Lazard. 2018. *Lazard'ın Depolama Maliyetinin Dengelenmesi Analizi - Sürüm 4.0*. Lazard. <https://www.lazard.com/media/450774/lazards-levelized-cost-of-storage-version-40-vfinal.pdf> .
- Martin, C. 2020. "Rüzgar Türbini Kanatları Geri Dönüştürülemiyor, Bu Yüzden Çöplüklerde Yığılıyor." *Bloomberg Yeşil*, 5 Şubat. <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/ruzgar-turbini-kanatları-geri-dönüştürülemez-bu-yüzden-çöplüklerde-yeniden-istifleniyor> .
- Meeus, M. 2018. "Pil Hücreleri Teknolojilerine Genel Bakış." Avrupa Pil Hücreleri Araştırma ve Yenileme Çalıştayı'nda sunum, Brüksel, 11-12 Ocak 2018.
- Moss, R.L., E. Tzimas, P. Willis, J. Arendorf, P. Thompson, A. Chapman, N. Morley, ve diğerleri. 2013. *AB Enerji Sektörünün Karbonsuzlaştırılmasına Doğru Yolda Kritik Mineraller: Düşük Karbonlu Enerjide Tedarik Zinciri Darboğazları Olarak Nadir Minerallerin Değerlendirilmesi*. *Teknolojiler*. JRC Bilimsel ve Politika Raporu. Lüksemburg: Avrupa Birliği Yayın Ofisi.
- Nuss, P. ve MJ Eckelman. 2014. "Minerallerin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi: Bilimsel Bir Sentez." *PLoS Bir* (7): e101298.
- PEI (Power Engineering International). 2019. "Kazakistan 100 MW Güneş Enerjisi Santralini Karşılıdı." Power Engineering International, Eylül 19. <https://www.powerengineeringint.com/2019/09/23/kazakistan-100-mw-gunes-santralini-karsiladi/> .
- Rodgers, L. 2018. "İklim Değişikliği: Bilmediğiniz Büyük CO2 Salınımı." BBC Haberler, 17 Aralık. <https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844> .
- Rogelji, J., M. Den Elzen, N. Höhne, T. Fransen, H. Fekete, H. Winkler, R. Schaeffer, F. Sha, K. Riahi ve M. Meinshausen. 2016. "Paris Anlaşması İklim Önerilerinin Isınmayı 2°C'nin Altında Tutmak İçin Bir Destek Gerekliyor." *Doğa* 534 (7609): 631.
- Sanderson, H. 2016. "Güneş Enerjisi Gümüşe Yeni Bir Talep Getiriyor." *Finansal Zamanlar*, 13 Mayıs. <https://www.ft.com/content/010da6e2-1863-11e6-b197-a4af20d5575e> .
- Savvantidou, S., EL Morse, AR Syme, A. Yuen, J. Channell ve HR Jansen. 2013. *Enerji Darwinizm: Enerji Endüstrisinin Evrimi*. Citibank. www.citi.com/citiqps .
- Sherman, SB, ZP Cano, M. Fowler ve Z. Chen. 2018. "Elektrikli Araçlar İçin Menzili Uzatın Çinko-Hava Bataryası." *Amaçlar Enerji* 6 (1): 121-45.
- Standridge, CR ve MM Hasan. 2015. "Araç Uygulaması Sonrası Lityum İyon Pil Yeniden Üretimi, Yeniden Kullanım ve Geri Dönüşüm Kapasitesi: Modelleme ve Analiz." *Dergi Endüstri Mühendisliği ve Yönetim* 8 (3): 823-39.
- Tan, RBH ve HH Khoo. 2005. "Birincil Alüminyum Tedarik Zincirinin LCA Çalışması." *Temiz Üretim Dergisi* 13 (6): 607-18.
- Teske, S., N. Florin, E. Dominish ve D. Giurco. 2016. *Yenilenebilir Enerji ve Derin Deniz Madenciliği: Arz, Talep ve Senaryolar*. Sidney: Sürdürülebilir Gelecekler Enstitüsü.
- Timperley, J. 2018. "Soru-Cevap: Çimento Emisyonları İklim Değişikliği İçin Neden Önemlidir." Emisyonlar, İklim Özeti, 13 Eylül. <https://www.karbonbrief.org/qa-why-cementemissions-matter-for-climate-change> .
- Tokimatsu, K., M. Höök, B. McLellan, H. Wachtmeister, S. Murakami, R. Yasuoka ve M. Nishio. 2018. "Küresel Enerji-Mineral Bağlantısına Yönelik Enerji Modelleme Yaklaşımı: Metal Gereksinimlerini ve %100 Yenilenebilir Enerji ile 2°C'nin Çok Altındaki Hedefi Araştırmak." *Uygulanan Enerji* 225: 1158-75.
- Tsai, L., JC Kelly, BS Simon, RM Chalot ve GA Keoleian. 2016. "Açık Deniz Rüzgar Santrali Yerleşiminin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi: Konumsal Faktörlerin, Göl Derinliğinin ve Kıydan Uzaklığın Etkileri." *Endüstriyel Ekoloji Dergisi* 20 (6): 1370-83.
- Tsiropoulos, I., D. Tarvydas ve N. Lebedeva. 2018. *Mobilite ve Sabit Depolama Uygulamaları İçin Li-Ion Piller Maliyetler ve Pazar Büyümesi Senaryoları*. Lüksemburg: Avrupa Birliği Yayın Ofisi.

UNEP (Birleşmiş Milletler Çevre Programı). 2011. *Metallerin Geri Dönüşüm Oranları: Bir Durum Raporu*. Küresel Metal Akışları Çalışma Grubu'nun Birleşmiş Milletler Çevre Programı Uluslararası Kaynak Paneli'ne Raporu. TE Graedel, J. Allwood, JP Birat, BK Reck, SF Sibley, G. Sonnemann, M. Buchert ve C. Hagelüken tarafından yazılmıştır. Nairobi: UNEP.

USGS (ABD Jeoloji Araştırması). 2018. Mineral Emtia Özetleri 2018. ABD Jeoloji Araştırması, Reston, Virginia.

Varzi, A., R. Raccichini, S. Passerini ve B. Scrosati. 2016. "Lityum Mineral Pillerin Canlandırılmasında Katı Elektrolitlerin Rolünün Zorlukları ve Beklentileri." *Malzeme Kimyası Dergisi A4* (44): 17251-59.

E. van der Voet, L. van Oers, M. Verboon ve K. Kuipers. 2019. "Metaller İçin Gelecekteki Talep Senaryolarının Çevresel Etkileri: Metodoloji ve Metaller Durumuna Uygulama Yedi Büyük Metal." *Endüstriyel Dergi Ekoloji23* (1): 141-55.

Wade, L. 2016. "Tesla'nın Elektrikli Arabaları Düşündüğünüz Kadar Yeşil Değil." *Kablolu*, 31 Mart. <https://www.wired.com/2016/03/teslaselectric-cars-might-not-green-think/>.

Dünya Bankası. 2017. *Düşük Karbonlu Bir Gelecek İçin Minerallerin ve Metallerin Artan Rolü*. Washington, DC: Dünya Bankası.

— — — . 2019. *İklim-Akıllı Madencilik: Mineraller İklim Eylemi için*. Washington, DC: Dünya Bankası. <https://www.worldbank.org/en/topic/extractiveindustries/brief/climate-smartmining-minerals-for-climate-action>.

WSA (Dünya Çelik Birliği). 2020. "Çeliğin Düşük Karbonlu Bir Geleceğe ve İklim Dayanıklı Toplumlara Katkısı." Pozisyon belgesi. Dünya Çelik Birliği, Brüksel, Belçika.

Ziemann, S., DB Müller, L. Schebek ve M. Weil. 2018. "EV pillerinden lityum geri dönüşümünün lityum talebi üzerindeki potansiyel etkisinin modellenmesi: Dinamik bir MFA yaklaşım." *Kaynaklar, Koruma ve Geri Dönüşüm* 133: 76-85.



WORLD BANK GROUP



Climate Smart Mining

