

NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ ve STRATEJİK ÖNEMİ:

Kaynaklar, Kullanım Alanları ve
Gelecek Öngörülleri



NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ ve STRATEJİK ÖNEMİ: **Kaynaklar, Kullanım Alanları ve Gelecek Öngörüler**

Basım Tarihi: EKİM 2024, ANKARA

Yayın Sahibi

Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
Mutlukent Mh. 2038. Sk. No: 15
Beysukent, 06800, Çankaya/ANKARA

Tel: 0.312 474 0274

Fax: 0.312 474 0275

E-posta: info@tureb.com.tr

İÇİNDEKİLER

Yönetici Özeti (Executive Summary).....	2
---	---

1. Giriş.....	3
---------------	---

2. Nadir Toprak Elementleri.....	4
2.1. Nadir Toprak Elementleri Nedir.....	4
2.1.1 Nadir Toprak Elementlerinin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	5
2.1.2 Nadir Toprak Elementlerinin Birincil ve İkincil Kaynaklardan Elde Edimi....	6
2.2 Nadir Toprak Elementlerinin Kullanım Alanları.....	7
2.2.1 Enerji Sektöründeki Kullanımları.....	8
2.2.1.1 Kalıcı Mıknatıs Üretimi.....	8
2.3 Nadir Toprak Elementlerinin Tarihsel Gelişimi (2010 NTE Krizi).....	9
2.3.1 Türkiye’de Nadir Toprak Elementlerinin Tarihsel Gelişimi.....	10

3. Nadir Toprak Elementlerinin Önemi.....	11
3.1 Nadir Toprak Elementlerinin Stratejik Önemi ve Riskler.....	11
3.2. Nadir Toprak Elementlerinin Temiz Enerji Sektöründeki Rolü.....	12
3.2.1 NTE’lerin Rüzgâr Türbinlerinde Kullanımı.....	12
3.3. Nadir Toprak Elementlerinin Türkiye 2030 Hedefleri için Önemi.....	13

4. Nadir Toprak Elementlerinin Mevcut Durumu.....	14
4.1 Nadir Toprak Elementlerinin Kaynak Bakımından Mevcut Durumu.....	14
4.1.1 Dünyada Mevcut NTE Rezervleri.....	14
4.1.2 Türkiye’deki Nadir Toprak Elementlerinin Mevcut Rezervleri.....	14
4.2. NTE’lerin Temiz Enerji Piyasalarındaki Mevcut Durumu.....	15
4.2.1 Temiz Enerji Dönüşümü Kurulumundaki Durum.....	15
4.2.2 NTE Arz-Talep ve Fiyat Durumu.....	16

5. Nadir Toprak Elementleri Gelecek Öngörüsü.....	19
5.1 NTE Gelecek Öngörüsü.....	19

6. Nadir Toprak Elementleri Stratejiler, Politikalar ve Projeler.....	23
6.1 Stratejiler.....	23
6.2 Uygulanan Politikalar.....	24
6.2.1 Amerika Birleşik Devletleri’nin uyguladığı politikalar.....	24
6.2.2 Avrupa Birliği’nin Uyguladığı Politikalar.....	24
6.3 Projeler.....	25
6.3.1 Türkiye’de Planlar.....	28
6.3.1.1 İşletmede olan NTE rezervi.....	29

7.Sonuç.....	30
--------------	----

Yönetici Özeti

Nadir Toprak Elementleri (NTE) ve Türkiye'nin Gelecek Vizyonu

Nadir Toprak Elementleri (NTE), yeşil enerji dönüşümü ve ileri teknoloji endüstrileri için vazgeçilmez stratejik hammaddelerdir. Bu elementler, rüzgâr türbinlerinden elektrikli araçlara, savunma sanayisinden tıbbi cihazlara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Küresel ısınmayı sınırlandırma çabaları ve sürdürülebilir enerji hedefleri doğrultusunda NTE'lere olan talep her geçen gün artmaktadır. 2030 yılı itibarıyla talebin iki katına çıkması ve temiz enerji teknolojilerinde NTE'lerin daha fazla kullanılması öngörülmektedir.

Ancak, NTE'lerin üretimi ve tedariki küresel bir sorun haline gelmiştir. Çin, madencilik ve rafinasyon süreçlerinde %60'ın üzerinde bir pazar payına sahiptir ve bu durum, tedarik zincirindeki jeopolitik riskleri artırmaktadır. Bu baskın rol, fiyatlardaki dalgalanmaların ve arz-talep dengesizliklerinin temel nedenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. 2020-2021 döneminde fiyatlarda yaşanan büyük artışlar ve 2023'te gözlemlenen ciddi düşüşler, pazarın belirsizliğini göstermektedir. Özellikle ağır NTE'lerin (disprosyum ve terbiyum) arzında yaşanabilecek sıkıntılar, enerji projelerini ve yenilenebilir enerji sektörünü riske atabilecek önemli bir tehdittir.

Türkiye, dünya genelindeki bu stratejik madende rekabet gücünü artırmak ve enerji dönüşümünde söz sahibi olmak için son yıllarda önemli adımlar atmaktadır. Eskişehir Beylikova'da bulunan büyük NTE rezervleri, Türkiye'nin NTE potansiyelini ortaya koymuştur. 2023 yılında açılan pilot tesis, yılda 1.200 ton cevher işleme kapasitesine sahiptir, ancak planlanan yatırımlarla bu kapasitenin yıllık 570.000 tona çıkarılması hedeflenmektedir. Bu sayede Türkiye, hem iç pazarda enerji güvenliğini artıracak hem de uluslararası pazarda ihracat potansiyelini geliştirebilecektir.

Enerji sektörü açısından bakıldığında, Türkiye'nin rüzgâr türbinlerinde kullanılan kalıcı mıknatısların üretimi için NTE'lere olan bağımlılığı stratejik bir öneme sahiptir. Doğrudan tahrikli türbinlerin yaygınlaşması ile birlikte bu mıknatıslara olan talebin artacağı öngörülmektedir. Türkiye, yerli üretim ile bu talebi karşılayarak dışa bağımlılığı azaltmayı ve enerji projelerinde önemli bir avantaj sağlamayı hedeflemektedir.

Türkiye'nin 2030 enerji hedefleri, yenilenebilir enerji kapasitesini artırmayı ve bu doğrultuda NTE'lerin stratejik olarak değerlendirilmesini içermektedir. 2020 yılında %42,4 olan yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının, 2053 yılına kadar %69,1'e çıkarılması hedeflenmektedir. Rüzgâr türbinleri ve elektrikli araçlar gibi teknolojiler, NTE'lerin kritik bileşenlerini oluşturmakta ve Türkiye'nin enerji geleceğinde hayati bir rol oynamaktadır.

Türkiye, mevcut NTE rezervleri ve gelecekteki endüstriyel yatırımları ile küresel pazarda stratejik bir pozisyona sahip olma yolunda ilerlemektedir. Enerji projelerinde dışa bağımlılığı azaltmak ve uluslararası arenada söz sahibi olmak adına NTE'lerin yerli üretimi ve kullanımına yönelik çalışmalar hız kazanmaktadır.

1. Giriş

Küresel sıcaklık artışının endüstriyel seviyelerin 4-6°C üzerinde gerçekleşmesi öngörülmektedir. Bu durum, biyoçeşitlilik ve canlı yaşamı üzerinde ciddi tehditler oluşturmakta ve yenilenebilir enerji kaynaklarının optimal kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Yenilenebilir enerji, çevresel etkileri minimuma indirerek atmosfere salınan gazların azalmasına ve iklim değişikliğinin yavaşlatılmasına katkı sağlayabilir. Karbon emisyonları açısından dünyada ikinci sırada yer alan Amerika Birleşik Devletleri, yenilenebilir enerjiye geçişi kritik bir iklim koruma stratejisi olarak görmektedir.

Son yıllarda birçok ülke net-sıfır emisyon taahhüdünde bulunmuştur. 2015 yılında 195 ülke Paris Antlaşması'nı imzalamış ve Ulusal İklim Planlarını yayımlamıştır. 70'ten fazla ülke net-sıfır hedeflerini kanunlarına dahil etmiş veya politika belgeleri yayınlamıştır. Ayrıca, 155'ten fazla ülke, 2020'den 2030'a kadar metan emisyonlarını %30 oranında azaltmayı hedefleyen Küresel Metan Taahhüdü'ne imza atmıştır. Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri de temiz teknoloji çözümleriyle değer zinciri oluşturmayı hedefleyen stratejik planlarını hayata geçirmiştir.

Türkiye'nin jeolojisi nadir toprak elementlerinin oluşumu için uygun bir yapıya sahiptir ve bu kaynakların değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Türkiye, 2030 yılı hedefleri doğrultusunda rüzgâr enerjisinde karasal olarak 24.6 GW, deniz üstü olarak ise 5 GW kurulu güce ulaşmayı hedeflemektedir. 2023 yılı itibarıyla Türkiye 537.71 MW'lık kurulum gerçekleştirerek son 13 yılın en düşük seviyesini görmüştür. Temmuz 2024 itibarıyla Türkiye'nin kurulu rüzgâr enerjisi gücü 12.993,01 MW olup, yıl sonunda bu kapasitenin 13.000 MW'ı geçmesi beklenmektedir.

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan NdFeB mıknatısları, özellikle 2026'da kurulması planlanan deniz üstü türbinler için kritik öneme sahiptir. Avrupa ve Amerika için yapılan benzer analizlerde de yenilenebilir enerji hedefleri ile kurulu güç arasında boşluklar tespit edilmiştir.

Nadir toprak elementlerine olan talep 2015'ten 2023'e kadar yaklaşık iki katına çıkarak 93 kiloton seviyesine ulaşmıştır. Temiz enerji teknolojilerinde, rüzgâr türbinleri ve elektrikli araçların payı bu süreçte %8'den %18'e çıkmıştır. Beyaz Saray'ın 2022 yılında yayımladığı rapora göre, nadir toprak elementlerine olan talebin önümüzdeki birkaç on yıl içinde %400 ila %600 oranında artması beklenmektedir.



Nadir toprak elementleri ile üretilen mıknatıslar, özellikle rüzgâr türbinleri ve elektrikli araç motorlarında kullanılmakta ve bu da talep artışının ana nedenlerinden biri olarak gösterilmektedir. 2030 yılına kadar nadir toprak elementlerine olan talep artışının %35'inin mıknatıslardan kaynaklanacağı öngörülmektedir. Küresel kalıcı mıknatıs pazarı, 2022'de 30.15 milyar dolardan 2023'te %14.6 büyüyerek 34.54 milyar dolara ulaşmıştır.

Çin'de, 2024'ün Haziran ayında Dongfeng Electricity Company tarafından kurulan 18 MW'lık deniz üstü rüzgâr türbini, yıllık 72 GWh elektrik üretebilmekte ve 36.000 hanenin ihtiyacını karşılayabilmektedir. Bu türbin, kayıtlara geçen en büyük rüzgâr türbini olarak dikkat çekmektedir.

Önümüzdeki on yılda, hibrit ve tam elektrikli araçların pazar payının önemli ölçüde artması beklenmektedir. Bu gelişme, nadir toprak elementleri talebini doğrudan etkileyerek, enerji üreticilerinin bu değişime hazırlıklı olmalarını gerektirecektir.

Bu yazıda, nadir toprak elementleri farklı açılardan ele alınacak; dünya ve Türkiye'deki mevcut durum ve geleceğe yönelik öngörüler değerlendirilecektir. Temiz enerjiye geçişte nadir toprak elementlerinin ve Türkiye'nin rolü incelenecektir.

2. Nadir Toprak Elementleri

2.1. Nadir Toprak Elementleri Nedir

Nadir toprak elementleri (NTE), Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) tanımına göre kimyasal, manyetik ve optik özellikleri bakımından birbirine benzeyen 17 elementten oluşmaktadır. Bu elementlerin on beşi, periyodik tabloda atom numaraları 57-71 arasında bulunan lantanitler grubunu oluşturur: lantanyum, seryum, praseodimyum, neodimyum, prometyum, samaryum, evropiyum, gadolinyum, terbiyum, disprosyum, holmiyum, erbiyum, tulyum, iterbiyum ve lutesyum¹. Ayrıca, atom numaraları 21 olan skandiyum ve 39 olan itriyum da aynı cevherleşme içinde yer alan ve kimyasal özellikleri lantanitlere benzeyen elementlerdir. Bu elementler, aslında yer kabuğunda nispeten bol miktarda bulunsalar da genellikle lantanitlerle birlikte bulunur ve nadir toprak elementleri statüsünde kabul edilirler.²

Nadir toprak elementleri genellikle oksit bileşikleri halinde bulunurlar ve bu oksitlerin metale indirgenmesi zor olduğu için “nadir” olarak adlandırılmışlardır. Bu durum, sık karşılaşılan bir durum olmadığı için bu elementler “nadir toprak elementleri” olarak adlandırılmıştır.³

Ekonomik olarak değerlendirilebilir miktarlarda nadir toprak elementleri mineral yatakları mevcuttur. NTE'ler genellikle magmatik ve hidrotermal kökenli birincil mineral yataklarında bulunurlar. Ayrıca, tortul süreçler ve ayrışma ile ilişkili ikincil yataklarda da varlık gösterirler.⁴

¹NTE Kullanım Alanları, NATEN, TENMAK: <https://haten.tenmak.gov.tr/tr/nte-hakkinda/kullanim-alanlari.html>

²Dünyada ve Türkiye'de Nadir Toprak Elementleri, MTA: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/5NTE.pdf>

³NTE Kullanım Alanları, NATEN, TENMAK: <https://haten.tenmak.gov.tr/tr/nte-hakkinda/kullanim-alanlari.html>

⁴International Union of Pure & Applied Chemistry: <https://iupac.org/project/2018-039-3-600/>

2.1.1 Nadir Toprak Elementlerinin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Parlak, demir gri ve gümüş renginde olan nadir toprak elementleri, genel olarak yumuşak ve kolay şekillendirilebilir yapısal özellikleriyle tepkimeye girebilme karakteristiğine sahiptirler. Skandiyumun kimyasal farklılığı bir kenara alınırsa nadir toprak elementleri, atom kütlelerine göre ağır nadir toprak elementleri (HREE) ve hafif nadir toprak elementleri (LREE) olarak kategorize edilirler.⁵ Skandiyum ile atom numaraları 57 ile 64 aralığında yer alan elementler hafif nadir toprak elementleri; itriyum ve atom numaraları 65-71 aralığında olan elementler ise ağır nadir toprak elementleri olarak adlandırılır.⁶

Nadir toprak elementlerin az miktar kullanımı, ürünün kalitesini önemli ölçüde artırmaktadır. NTE'ler, içeriğinde bulundukları malzemeleri hafifleterek yüksek sıcaklığa (230° C), aşınmaya ve korozyona karşı dirençli kılmaktadır. Sc-Al, Sc-Mg, Y-Al, Y-Mg ve Nd-Mn gibi nadir toprak alaşımları bu duruma örnek gösterilebilir. Doymamış 4f elektronik yapılarından kaynaklanan ışık yayma, manyetizma ve elektronik özellikleri, bu elementlerin nadir toprak fosforların üretiminde, çok güçlü manyetik ürünlerde, hidrojen depolama malzemelerinde ve katalizörler gibi malzemelerde kullanılmalarına olanak sağlamaktadır. Yüksek teknoloji ürünlerinde kullanım miktarı az olmaktadır, ancak birim performansa etkisi yine kritik düzeydedir.⁷

1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.0026				
3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.012															5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305															13 Al Aluminium 26.982	14 Si Silicon 28.085	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulphur 32.06	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.887	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.630	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798				
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium 98	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29				
55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57-71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium 209	85 At Astatine 210	86 Rn Radon 222				
87 Fr Francium 223	88 Ra Radium 226	89-103 Actinides	104 Rf Rutherfordium 261	105 Db Dubnium 268	106 Sg Seaborgium 269	107 Bh Bohrium 270	108 Hs Hassium 271	109 Mt Meitnerium 278	110 Ds Darmstadtium 281	111 Rg Roentgenium 282	112 Cn Copernicium 285	113 Nh Nihonium 286	114 Fl Flerovium 289	115 Mc Moscovium 290	116 Lv Livermorium 293	117 Ts Tennessine 294	118 Og Oganesson 294				
57 La Lanthanum 138.91	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.91	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.35	63 Eu Europium 151.96	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.93	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93	70 Yb Ytterbium 173.05	71 Lu Lutetium 174.97							
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.04	91 Pa Protactinium 231.04	92 U Uranium 238.03	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (260)							

Şekil 1: Periyodik Tablo

⁵Rare Earths in The Wind Industry (Wind Europe-2020)

⁶NTE Kullanım Alanları, NATEN, TENMAK: <https://naten.tenmak.gov.tr/tr/nte-hakkinda/kullanim-alanlari.html>

⁷Global Critical Minerals Outlook 2024- IEA & Dünyada ve Türkiye'de Nadir Toprak Elementleri, MTA

Element	Simge	Atom Numarası	Atom Ağırlığı	Yoğunluğu gr/cm ³	Ergime noktası, °C	Kaynama noktası, °C	Vicker's sertliği (kg/mm ²)
Skandiyum	Sc	21	44.95	2.989	1541	2831	85
İtriyum	Y	39	88.90	4.469	1522	3338	38
Lantan	La	57	138.90	6.146	918	3457	37
Seryum	Ce	58	140.11	8.160	798	3426	24
Praseodim	Pr	59	140.90	6.773	931	3515	37
Neodimyum	Nd	60	144.24	7.008	1021	3068	35
Prometyum	Pm	61	145.00	7.264	1042	-	-
Samaryum	Sm	62	150.30	7.520	1074	1791	45
Evropiyum	Eu	63	151.96	5.244	822	1597	17
Gadolinyum	Gd	64	157.25	7.901	1313	3266	57
Terbiyum	Tb	65	158.92	8.230	1356	3223	46
Dispersiyum	Dy	66	162.50	8.551	1412	2562	42
Holmiyum	Ho	67	164.93	8.795	1474	2695	42
Erbiyum	Er	68	167.26	9.066	1529	2863	44
Tulyum	Tm	69	168.93	9.321	1545	1947	48
İterbiyum	Yb	70	173.04	6.966	819	1194	21
Lutesyum	Lu	71	174.97	9.841	1663	3395	77

Şekil 2: Nadir Elementler Özellikleri

2.1.2 Nadir Toprak Elementlerinin Birincil ve İkincil Kaynaklardan Elde Edimi

Parlak, demir gri ve gümüş renginde olan nadir toprak elementleri, genel olarak yumuşak ve kolay şekillendirilebilir yapısal özellikleriyle tepkimeye girebilme karakteristiğine sahiptirler. Skandiyumun kimyasal farklılığı bir kenara alınırsa, nadir toprak elementleri atom kütlelerine göre ağır nadir toprak elementleri (HREE) ve hafif nadir toprak elementleri (LREE) olarak kategorize edilirler.⁸ Skandiyum ile atom numaraları 57 ile 64 arasında yer alan elementler hafif nadir toprak elementleri, itriyum ve atom numaraları 65-71 arasında olan elementler ise ağır nadir toprak elementleri olarak adlandırılır.⁹

Nadir toprak elementlerinin az miktarda kullanımı, ürünlerin kalitesini önemli ölçüde artırmaktadır. NTE'ler, içeriğinde bulundukları malzemeleri hafifleterek yüksek sıcaklığa (230° C), aşınmaya ve korozyona karşı dirençli hale getirmektedir. Sc-Al, Sc-Mg, Y-Al, Y-Mg ve Nd-Mn gibi nadir toprak alaşımları bu duruma örnek gösterilebilir. Doymamış 4f elektronik yapılarına bağlı olarak ışık yayma, manyetizma ve elektronik özellikleri, bu elementlerin nadir toprak fosforlarının üretiminde, çok güçlü manyetik ürünlerde, hidrojen depolama malzemelerinde ve katalizörlerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır.¹⁰ Yüksek teknoloji ürünlerinde kullanım miktarı az olsa da, birim performansla olan etkisi kritik düzeydedir.¹¹

⁸Rare Earths in The Wind Industry (Wind Europe-2020)

⁹a.g.e

¹⁰Global Critical Minerals Outlook 2024- IEA & Dünyada ve Türkiye'de Nadir Toprak Elementleri, MTA

¹¹a.g.e

2.2 Nadir Toprak Elementlerinin Kullanım Alanları

Kendilerine has manyetik, katalitik, optik gibi farklı özelliklere sahip nadir toprak elementleri, bu özelliklerinin değişikliğinden ötürü birçok teknolojik alanda kullanılmaktadır.¹²

Sağlık sektöründe kullanılan modern tıbbi cihazlarda, hibrit araçlarda, fiber-optik kablolarda, cep telefonlarında, diz üstü bilgisayarlarında, televizyon ekranlarında, kamera lenslerinde, elektrik tasarruflu ampullerde, bataryalarda, güçlü mıknatıslarda, uçak motorlarında, füze kontrol sistemlerinde, lazerlerde, seramik- cam üretiminde, güneş enerjisi, petrol arıtma işlemleri ve rüzgâr türbinleri gibi bir çok alanda kullanımı mevcuttur.¹³

Nadir Elementler	Ana Kullanım Alanları	Yüzde
Ce	Katalitik konvertörler, metal üretimi, ham petrolün rafine edilmesi	%40.2
La	Petrol parçalama ve katalizör, kamera lensleri, batarya elektrodu	%27.8
Nd	Kalıcı mıknatıslar, metal üretim geliştirici	%17.6
Y	Televizyon ve bilgisayar ekranı, Kompakt Floresan ampul ve LED ışıkları	%6.8
Pr	Kalıcı mıknatıslar, cam ve seramik renklendirici, lazerler	%4.4
Gd	Manyetik soğutma, metal üretimi, optik cam	%0.9
Dy	Kısa dalga uzunluğunda ışık, Parlayan malzeme	%0.7
Sm	Sm-co kalıcı mıknatıs, x-ışını lazerleri	%0.5
Ho	Lazer cam, cam renklendirme, metal halide lamba, elektrik seramikler	%0.5
Er	Fiber optik kablolarda sinyal amplifikasyonu, lazer cam	%0.5
Tm	Fiberamplifikatör, lazer cam	%0.5
Yb	Lazer cam, fiber amplifikatör	%0.5
Lu	Tıbbi izotop radyasyon tedavisi	%0.5
Eu	Renkli televizyon ekranları, Led ışıklar, X ışını yoğunlaştırıcı ekranlar	%0.4
Tb	Kalıcı mıknatıs katkı maddesi, dev manyetostriktif malzeme	%0.2
Pm	İzotop lüminesan malzemeler	NA
Sc	Havacılık ve uzay çerçevesi, özel alaşım, nötron jeneratörü	NA

Şekil 2: Nadir Elementler Özellikleri

Kullanım Alanları	Kullanıldığı ekipman, cihaz ya da sistemler
Mıknatıslar	Motorlar, disk sürücüler ve motorları, jeneratörler, mikrafon ve hoparlörler, manyetik rezonans görüntüleme cihazı (MRI), fren sistemi, otomobil parçaları, iletişim sistemleri, rulmanlar, mikrodalga tüpleri, soğutma sistemleri, alaşımlar
Katalizörler	Petrol rafinasyonu, kimyasal prosesler, katalitik dönüştürücüler, mazot katkısı, endüstriyel atık temizleme sistemleri
Elektronik Cihazlar	Ekranlar (CRT; PDP; LCD), lazerler, medikal görüntüleme cihazları, fiber optik, sensörler
Cam	Parlatma bileşikleri, optik camlar, optik termal sensörler, termal aynalar
Seramik	Kapasitörler, sensörler, renklendiriciler, sintilatör
Alaşımlar	Hidrojen depolama (NiMH piller, yakıt hücreleri), çelik, dökme demir, süper alaşımlar
Diğer	Su arıtma, floresan lambalar, pigmentler, gübre, tıbbi izleme, kaplamalar

Şekil 4 - Kaynak: Nadir toprak elementlerinin birincil ve ikincil kaynaklardan üretimi

¹²Rare Earths in The Wind Industry (Wind Europe-2020)

¹³NTE Kullanım Alanları, NATEN, TENMAK & Dünyada ve Türkiye'de Nadir Toprak Elementleri, MTA

2.2.1 Enerji Sektöründeki Kullanımları

Nadir toprak elementlerinin en yaygın kullanıldığı alanlardan biri kalıcı mıknatıslardır (en sık kullanılan sınıflar N38SH-N48SH ve N52) (TENMAK). NTE içeren kalıcı mıknatıslar kullanılarak üretilen elektrik motorları ve jeneratörler, bugüne kadar geliştirilmiş enerji verimi en yüksek aletlerdir ve sıradan motorlara kıyasla %20 ila %40 arası tasarruf sağlayabilirler. NTE'lerin 1-2 kg arası düşük miktarda mıknatıslara eklenmesi; lityum, nikel kobalt gibi diğer metallerin kullanım ihtiyacını azaltarak türbinin ağırlığını 60-80 kg aralığında düşürmektedir.¹⁴

2018'de, kalıcı mıknatıslı türbinler Avrupa deniz üstü pazarının tamamını ve küresel pazarın %75'ini kapsamaktaydı. NdFeB bazlı kalıcı mıknatısların hâkim olduğu bu pazarda, AlNiCo ve samaryum kobalt (Sm-Co) bazlı mıknatıslar da yaygın olarak kullanılmaktadır. Sm-Co, güçlü manyetik özelliklere sahip olması ve manyetikliğinin giderilmesinin zor olması nedeniyle diğer mıknatıs türlerine göre daha pahalıdır (İ). Rüzgâr türbinlerinin jeneratörlerinde çalışma sıcaklığı yüksek olduğu için SH sınıfı (çalışma sıcaklığı 150°C) ve üzeri sınıftaki mıknatıslar tercih edilmektedir.

2.2.1.1 Kalıcı Mıknatıs Üretimi

Kalıcı mıknatıs üretiminde kullanılan nadir toprak elementleri şunlardır:

Neodimyum (Nd)
Terbiyum (Tb)
Disprosyum (Dy)
Praseodimyum (Pr)

Neodimyum ve praseodimyum, manyetik güce katkıda bulunan alaşım bileşenleri iken, disprosyum ve terbiyum özellikle yüksek sıcaklıklarda demanyetizasyona karşı direnci artırır.¹⁵ NTE içeren en yaygın mıknatıslar, neodimyum-demir-bor (NdFeB) mıknatıslardır. Kobalt gibi stratejik öneme sahip elementlerin fiyatlarındaki artış, kobalt içermeyen kalıcı mıknatısların üretilmesine neden olmuştur. Bu gelişmeler sonucunda, 1983 yılında geleneksel toz metalurjisi ve ergitme yöntemleri kullanılarak NdFeB esaslı kalıcı mıknatıslar üretilmiştir (Sagava vd., 1984; Croat vd., 1984; İcin, 2016).¹⁶

Üretim yöntemleri arasında en yaygın olanı, toz metalurjisi yöntemlerini içeren sinterleme yöntemidir. Sinterlenmiş mıknatısların manyetik özellikleri, Nd₂Fe₁₄B fazından kaynaklanan yüksek manyetik enerjisi nedeniyle güçlüdür. Bu fazın birim hacimde ürettiği enerji miktarı yaklaşık olarak 512 kJ/m³'tür. NdFeB mıknatıslarının yüksek kalıcılıkta mıknatıslığa sahip olmalarının en önemli nedeni, mıknatısın bileşimini oluşturan NTE (Nd) ve geçiş metali (Fe) arasında güçlü ferromanyetik bir etkileşimin gerçekleşmesidir.¹⁷

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan ortalama bir kalıcı mıknatıs %28,5 neodimyum, %4,4 disprosyum, %1 bor ve %66 demir içermektedir ve toplam ağırlıkları 4 tona kadar çıkabilmektedir (Rabe vd., 2017). Türkiye'de 2003 yılı ve öncesinde kurulan türbinlerde kalıcı mıknatıs kullanılmamıştır (TENMAK).

¹⁷a.g.e

¹⁸ a.g.e

¹⁹ Towards an Alloy Recycling of Nd-Fe-B Permanent Magnets in a Circular Economy: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40831-018-0171-7?fromPaywallRec=false>

NdFeB Geri dönüşümü

Kalıcı mıknatıslardan nadir toprak elementlerinin (Nd, Pr, Dy) geri kazanılmasında hidrometalurjik yöntemler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.¹⁸Karakteristik özelliklerinden dolayı, Nd-Fe-B içeren mıknatıslar, daha az kritik maden içeriğine sahip olmaya uygun değildir. Teknolojik gelişmelerle birlikte, Nd-Fe-B mıknatıslar içeren çeşitli ürünler için Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman (WEEE) geri alım sistemleri kurulmuştur. Bu sistemler, geri dönüştürülebilir hurda mıknatısların sistematik olarak temini için ideal bir temel oluşturmaktadır.

Malzemeyi tamamen çözerek elementleri veya oksitleri geri kazanmayı amaçlayan hidrometalurjik yaklaşımlar, enerji kaybına ve zaman harcamaya sebep olmanın yanı sıra maliyetleri yüksek ve karbon ayak izleri büyüktür. Geri dönüştürülmüş nadir toprak elementleri ve oksitler, bahsi geçen ilgili endüstrilerin eksikliği nedeniyle Çin'den gelen bakir malzemelerle rekabet etmek zorundadır. Günümüzde, mıknatıs alaşımını koruyacak ve bunları doğrudan yeni bir mıknatıs üretim döngüsü için kullanacak olan malzemedan malzemeye geri dönüşüm yaklaşımları mevcuttur.

Geri dönüştürülmüş mıknatıslar, birincil kaynaklardan elde edilen mıknatıslarla üretim maliyetleri ve manyetik özellikler bakımından rekabet etmekte, ayrıca karbon ayak izi açısından çok daha avantajlıdır.¹⁹

2.3 Nadir Toprak Elementlerinin Tarihsel Gelişimi (2010 NTE Krizi)

Başlangıçta, Amerika Birleşik Devletleri ilk nadir toprak elementi tedarikçisi konumundaydı ve Mountain Pass yatağı, 1950'lerden beri dünyaya nadir toprak elementi tedarik etmekteydi. Aynı zamanda, Amerika nadir toprak elementlerinin işlenmesinde ve bu konudaki teknolojilerde lider konumundaydı. 1960'larda Çin, Batou bölgesinde kurduğu büyük fabrikalarla nadir toprak elementleri çalışmalarına başladı.²⁰

1970'lerin sonuna doğru Komünist Çin Hükümeti, politikada iktidarı sağlamlaştırmak, yurtiçi refahı sağlamak ve 20. yüzyılda karşılaşılan katastrofik olayların üstesinden gelmek amacıyla kendi üretim ve ihracat kabiliyetlerini geliştirmeye başlamıştır.²¹ Çin'in nadir toprak elementleri endüstrisinin gelişimi, Çin'in 1978'de küresel ticarete yeniden girişimiyle ve hükümetin Çin'i üretim anlamında küresel bir güç haline getirme hedefleriyle güçlenmiştir.

Çin'in nadir toprak elementi üretimi, 1978-1995 yılları arasında her yıl ortalama %40 oranında büyümüştür. 1990'larda artan ihracat, dünya genelinde nadir toprak elementi fiyatlarının hızla düşmesine yol açmıştır. Bu fiyat düşüşleri, "Çin fiyatı" olarak adlandırılmış ve rakip üreticilerin iflas etmelerine ya da üretimlerini ciddi miktarda azaltmalarına sebep olmuştur.

1990'ların başlarından itibaren Çin'e bağlı firmalar, diğer ülkelerde nadir toprak elementi üretimi yapan firmaların hisselerini toplamaya başlamıştır. Örneğin, 1995'te iki Çin firması, Amerikan yatırımcılarla Magnequench'i satın almak için anlaşmıştır. Bu tarz yabancı yatırımlar, ABD hükümetinin kanun düzenleyicileri tarafından onaylanmak zorundaydı ve ABD bu satın almayı, fabrikaların en az 5 yıl ABD'de üretime devam etmesi koşuluyla izin vermiştir. Ancak 5 yıl 1 gün sonra fabrikalar Çin'e taşınmıştır. Son yıllarda Çinli şirketler, Amerika Birleşik Devletleri'nde (Molycorp's Mountain Pass Mine 2005) ve Avustralya'da (Lynas Corporation's Mount Weld Mine 2009) satın almayı teklif etmiş, ancak her iki hükümet de bu teklifleri geri çevirmiştir.²²

²⁰The role and challenges of rare earths in the energy transition: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301420723008486>

²¹History and Future of Rare Earth Elements: <https://www.sciencehistory.org/education/classroom-activities/role-playing-games/case-of-rare-earth-elements/history-future/>

²²a.g.e

2010 sonbaharında Çin'in, nadir toprak elementlerinin ihracatını kısıtlayarak jeopolitik nüfuz elde edebileceği düşünülüyordu. Çin ve Japonya arasında yaşanan uluslararası bir olay, öngörülemez sonuçları olan bir ticaret ambargosunu tetikledi. Çinli bir balıkçının Japon Sahil Güvenliği tarafından gözaltına alınmasının ardından, Çinli gümrük memurları Japonya'ya giden nadir toprak oksitlerinin sevkiyatını durdurdu. Bu sevkiyatlar Japon yüksek teknoloji üretimi için hayati öneme sahipti. Çok geçmeden nadir toprak metallerinin fiyatları hızla arttı ve bazı durumlarda %100'den fazla artış gösterdi. Aniden birçok insan ve şirket, nadir toprak elementlerinin yaygın ve elzem hale geldiğini fark etti. Hükümetler, ülkelerinin silahlar ve diğer önemli teknolojiler için ihtiyaç duyduğu malzemeler konusunda endişelenmeye başladı. Nadir toprak elementlerinin yüksek fiyatları ve bunlara erişememe korkusu, cesur ve radikal çözümleri gündeme getirdi. Bazı insanlar Amazon yağmur ormanlarının madencilğe açılmasını veya Grönland'daki kaynakların sömürülmesini talep etti. Diğer girişimciler, nadir toprak elementlerinin deniz tabanından veya Ay'dan çıkarılmasını önerdi. Molycorp, işleme operasyonları için yeni kirlilik kontrollerine 500 milyon dolar yatırım yaptıktan sonra, 2012'de Kaliforniya'daki Mountain Pass Madeni'ni yeniden açtı.

Ancak, yüksek fiyatların yarattığı patlama kısa ömürlü olmuştur. Avustralya ve Amerika Birleşik Devletleri'nde başlatılan maden çalışmaları sayesinde küresel nadir toprak elementi tedariki çeşitlendirilmiştir. 2012'de ABD, Japonya ve Avrupa Birliği tarafından Dünya Ticaret Örgütü'ne yapılan bir şikayet sonucunda, Çin'in ihracat kotalarının gevşetilmesi sağlanmış ve fiyatlar 2009 seviyelerine geri dönmüştür. Nadir toprak elementlerinde yaşanan en büyük fiyat düşüşleri, evropiyum (%-59), itriyum (%-50) ve samaryum (%-57) elementlerinde olmuştur.²³

2.3.1 Türkiye'de Nadir Toprak Elementlerinin Tarihsel Gelişimi

Türkiye, teknoloji ve savunma endüstrilerindeki stratejik önemi nedeniyle nadir toprak elementlerine (NTE) giderek artan bir ilgi göstermektedir. Türkiye, geleneksel olarak küresel nadir toprak elementi pazarında önemli bir oyuncu olarak bilinmemekle birlikte, son keşifler ve çalışmalar ülkenin bu alandaki potansiyelini vurgulamıştır.

Amerika Jeoloji Araştırma Bülteni incelendiğinde, Türkiye'de yapılan nadir toprak elementi çalışmalarının uzun bir geçmişe sahip olduğu ve bu araştırmaların 1970'li yıllara dayandığı görülmektedir.²⁴

10/07/2018 tarihli ve 30474 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan 1 sayılı Cumhurbaşkanlığı Teşkilatı Hakkında Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi kapsamında yeniden şekillenen bakanlıklar, merkez ve taşra teşkilatları ile ilgili kamu kurum ve kuruluşlarının görev ve faaliyetleri belirlenmiştir. Bu kapsamda, NTE'lerin gelecekte farklı sektörlerle sağlayacağı önemli girdiler dikkate alınarak Nadir Toprak Elementleri Araştırma Enstitüsü (NATEN) kurulmuştur. NATEN, Türkiye'de bulunan nadir toprak elementleri ile ilgili araştırmaları aktif bir şekilde yürütmektedir.

Günümüzde, Eskişehir Beylikova'da aktif olarak nadir toprak elementlerine yönelik çalışmalar devam etmektedir. Ancak, henüz bir pazar oluşmamış olup, Türkiye'den bu elementlerin ihracatı yapılmamaktadır.

²³ Rare Earths in The Wind Industry (Wind Europe-2020)

²⁴<https://www.eurare.org/countries/turkey.html>

3. Nadir Toprak Elementlerinin Önemi

Yeşil ekonomiye geçiş, birçok emtia pazarının odak noktasını farklı alanlara yönlendirmiştir; lityum ve kobalt gibi piyasalar, şarj edilebilir pillerin etkisi altında şekillenirken, nadir toprak elementlerinin yaşadığı dönüşüm çok daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Nadir toprak elementleri piyasası, yalnızca nihai tüketicinin baskın olduğu bir pazarla değil, aynı zamanda miknatis uygulamalarının ön planda olduğu bir dinamikle karşı karşıyadır. Bununla birlikte, pazar, değişen nadir toprak elementleri gereksinimlerine uyum sağlamayı ana hedef olarak belirlemiştir.

Ham maddelere erişim, Avrupa Birliği ekonomisi ve iç pazarın sürdürülebilir işleyişi açısından son derece kritik bir öneme sahiptir. Kritik ham maddelerin önemi, özellikle yeşil enerji, dijital dönüşüm, uzay ve savunma sanayilerinde kullanımın artmasıyla önümüzdeki yıllarda katlanarak artacaktır. Bu durum, tedarik sürecinde yaşanabilecek kesinti riskini artırmakta ve kaynaklar üzerindeki rekabet ile jeopolitik gerilimleri daha da körüklemektedir. Bu sürecin etkili bir şekilde yönetilememesi durumunda, kritik ham maddelere olan talep artışı, sosyal ve çevresel anlamda olumsuz sonuçlara yol açabilir.

Enerji üretiminde ve tarımda doğrudan kullanılmayan, ancak bazı gelişmekte olan ülkelerde tedarik süreçlerinden kaynaklanan yüksek riskler taşıyan bu ham maddeler, özellikle de yalnızca birkaç ülke tarafından sağlanabildiği için Avrupa Birliği Komisyonu tarafından “kritik” ilan edilmiştir. Nadir toprak elementleri de bu kritik ham maddeler listesine dahil edilmektedir.

2010 yılında yaşanan Nadir Toprak Elementleri krizi sonrasında, Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri Enerji Departmanı, nadir toprak elementlerine olan bağımlılığı daha yakından incelemeye almış ve özellikle tedarik zincirindeki aksaklıklara dikkat çekmiştir. Bu doğrultuda, çeşitli stratejiler geliştirilmiş ve pazarın çeşitlendirilmesi ile hareketlendirilmesi hedeflenmiştir.

3.1 Nadir Toprak Elementlerinin Stratejik Önemi ve Riskler

Nadir toprak elementleri (NTE), yeşil teknolojiler ve savunma sanayisindeki kullanımlarından ötürü stratejik olarak kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, jeopolitik bağıllık yaratması, tedarik zincirinde yaşanan aksaklıklar, Çin'in pazarda yarattığı baskı ve fiyatların aşırı dalgalanması gibi faktörler nedeniyle büyük riskler barındırmaktadır. Ayrıca, çevresel etkileri ve geri dönüşümün zor olması da NTE'lerin stratejik önemini artıran diğer unsurlardır. Kaynaklara erişimin sınırlı olması ve şeffaf bilgi akışının bulunmaması, NTE pazarında karşılaşılan en büyük sorunların başında gelmektedir. Bu bilgi eksikliği, ülkeler arasında stratejik planlamaların zorlaşmasına ve tahminlerin belirsizliğe açık olmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, bu yazıda sunulan istatistiklerin de bu faktörlerden etkilenebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

2023 yılında G7 ülkeleri, NTE'lerin stratejik önemi ve riskleri üzerine şu açıklamayı yapmıştır: “Kritik minerallerin temiz enerji geçişi için artan önemini ve kırılgan tedarik zincirleri, tekelleşme, mevcut kritik mineral tedarikçilerinin çeşitlendirilememesi nedeniyle oluşan ekonomik ve güvenlik risklerini önleme ihtiyacını yeniden teyit ediyoruz. Sorumlu ve dayanıklı kritik mineral tedarik zincirleri oluşturmak, yerel toplulukların yararını sağlamak, inovasyonu ve rekabeti ilerletmek ve insan haklarına saygı göstermekle birlikte çevresel ayak izlerini en aza indirmek için güçlü çevresel, sosyal ve yönetim (ESG) standartlarının hayati önem taşıdığını teyit ediyoruz. Kritik minerallerde izlenebilirlik ile açık, şeffaf, kurallara dayalı ve piyasa odaklı ticareti desteklemeye, kritik mineraller üzerindeki piyasayı bozan önlemlere ve tekeli politikalarına karşı çıkmaya kararlıyız.”

Uluslararası Enerji Ajansı, NTE'lerin rafinasyon sürecinin 2030 yılına kadar yalnızca bir ülkeden elde edileceğini öngörmüş ve bu sürecin %77 oranında jeopolitik risk barındıracağını hesaplamıştır. Ayrıca, NTE'lerin fiyat dalgalanmasının diğer minerallere kıyasla çok daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, tedarik zincirinde fiyat belirsizliğinden kaynaklanan orta düzeyde bir riskin olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, tedarik zincirinde meydana gelebilecek aksaklıkların giderilmesi riskinin de çok yüksek olduğu vurgulanmaktadır. Başka bir deyişle, fiyatlardaki şeffaflık eksikliği nedeniyle pazar, birkaç stratejik hamle ile domine edilebilmekte ve tedarik dengesi bozulabilmektedir (2010 NTE krizi örneğinde olduğu gibi).

Rafinasyon sürecinde ortaya çıkan atıklar nedeniyle ESG ve iklim riskleri de oldukça yüksektir. Rafinasyon süreci, 607 gCO₂/kWh ile en yüksek şebeke karbon yoğunluğuna sahip süreçlerden biridir.

3.2. Nadir Toprak Elementlerinin Temiz Enerji Sektöründeki Rolü

3.2.1 NTE'lerin Rüzgâr Türbinlerinde Kullanımı

Rüzgâr türbinleri, tahrik sistemlerinin konfigürasyonuna göre kategorize edilmektedir. Tahrik sistemi, kanat hubını jeneratöre bağlayarak farklı kanat hızlarına uygun konfigürasyonlar sağlar. Doğrudan tahrik sistemine sahip türbinlerde, kanatlar doğrudan jeneratöre bağlanır ve bu türbinler düşük hızlarda (10-30 rpm) çalışmaktadır. Bu tür türbinler hem elektro mıknatıslı senkron jeneratörlerle (EESG) hem de kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörlerle (PMSG) dizayn edilebilir.

Bir rüzgâr türbininin ana bileşeni olan jeneratörler, kanatlardan elde edilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Jeneratör tipi seçimi, malzeme maliyetlerine ve türbinin yerleştirileceği sahanın özelliklerine göre değişiklik gösterebilir. Elektrik enerjisinin kesintisiz şekilde şebekeye aktarılması için jeneratörlerin, şebeke bağlantısının ihtiyaçlarına uygun kalitede olması gerekmektedir.

Rüzgâr türbinlerinde genellikle senkron jeneratörler ve asenkron jeneratörler kullanılır. Asenkron jeneratörler, çalışmaya başlamak için statorlarında manyetik alan oluşturabilmek adına şebekeden gelen elektrik akımıyla uyarılmak zorundadır. Çift beslemeli asenkron jeneratörler (DFIG), yüksek verimlilikleri ve geniş hız aralığıyla özellikle karasal rüzgâr türbinlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Senkron jeneratörlerde ise mıknatıslar kullanılarak elektrik üretimi sağlanır. Rotor jeneratörün dönen kısmıdır ve stator üzerinde manyetik bir alan oluşturur. Bu değişen manyetik alan, statordaki sargılarda elektrik akımını indükler. Rotor üzerinde bulunan mıknatıslar elektromıknatıs ve kalıcı mıknatıs olarak ikiye ayrılır. Elektromıknatısların kullanıldığı senkron jeneratörlere “Electrically Excited Synchronous Generators” (EESG), kalıcı mıknatısların kullanıldığı jeneratörlere ise “Permanent Magnets Synchronous Generator” (PMSG) denir.

Kalıcı mıknatıslar, doğaları gereği güçlü manyetik alan yaratma potansiyeline sahiptir. Bu yüzden, PMSG'ler, çalışmaya başlamak için herhangi bir akıma ihtiyaç duymazlar. Kalıcı mıknatıslı jeneratörler, nadir toprak elementlerinin güçlü manyetik özelliklerinden faydalanarak daha verimli elektrik üretimi sağlarlar. Bu tür jeneratörlerin en önemli avantajı, yüksek güç yoğunluğuna sahip olmalarıdır (higher power density). Bu özellik, özellikle büyük (5 MW ve üzeri) türbinlerde jeneratör ağırlığının ve parçalarının azaltılmasına imkân tanır.

Dişli kutuları, daha ağır ve bakım ihtiyacı daha fazla olduğundan, karasal ve deniz üstü alanlardaki rekabet avantajını kaybetmeye başlamıştır. Kalıcı mıknatıslı senkron jeneratörlerle donatılmış doğrudan tahrikli türbinler, dişli kutusunun ortadan kaldırılmasıyla türbin boyutunun ve kütlesinin azaltılabilmesi açısından deniz üstü uygulamalarda popüler hale gelmiştir. Bu tür türbinler, daha az mekanik arıza riski taşır ve daha az bakım gerektirir.

Türbin üreticileri, 1991 yılında dişli kutusuz rüzgâr türbinleri üretmeye başlamıştır. Dişli kutusu arızalarını ve iletimdeki kayıpları minimize etme amacıyla geliştirilen bu teknoloji, özellikle deniz üstü türbinlerde kullanım açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Uzmanlar, doğrudan tahrik sisteminin zamanla en yaygın kullanılan teknoloji olacağını öngörmektedir. Bunun başlıca nedenleri, deniz üstü türbinlerde kullanım kolaylığı ve teknolojik gelişmelere açık olmasıdır.

3.3. Nadir Toprak Elementlerinin Türkiye 2030 Hedefleri için Önemi

Türkiye Ulusal Enerji Planına göre;

2020-2035 döneminde %3,5 artması öngörülen elektrik enerjisi tüketiminde 2035 yılı sonrası artış oranının, 2053 yılı için belirlenen net-sıfır emisyon hedefine ulaşılabilmesi adına elektrik enerjisinin nihai enerji tüketimi içindeki payının artmasıyla daha hızlı bir şekilde yükselmesi gerektiği görülmektedir. Bu şekilde 2035-2053 döneminde elektrik enerjisi tüketiminde yıllık ortalama artış oranı %5,2 düzeyine yükselmektedir.

2020 yılında %42,4 olan yenilenebilir enerji kaynaklarının payı 2053 yılına kadar %69,1'e çıkmaktadır. 2020 yılında elektrik üretiminde %11,7 orana sahip kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının payı 2053 yılına kadar kademeli olarak %61,4'e yükselmektedir.

Enerji dönüşümlerinde planlanan ivmelenme hızı küreselde kritik madenlere olan ihtiyacı da tetiklemektedir. STEPS, talep 2030'u kadar ikiye katlanmaktadır, devamında da artarak ilerlemektedir. APS'de, talep 2030'da iki kattan daha fazla 2050'de ise üç katını görecektir. NZE Senaryosunda, 2030'da kritik minerallere olan talep üç katına çıkarken, 2050'de 40Mt'e çıkacağı öngörülmektedir. Bu talep artışı, ciddi bir pazar imkânı sunmaktadır. Türkiye'nin mevcut rezervleri ve 2030 hedefleri düşünüldüğünde, bu alana odaklanması gerekmektedir.



4. Nadir Toprak Elementlerinin Mevcut Durumu

4.1 Nadir Toprak Elementlerinin Kaynak Bakımından Mevcut Durumu

4.1.1 Dünyada Mevcut NTE Rezervleri

	Rezerv	Mineral Üretimi (ton)	
		2022	2023
Amerika Birleşik Devletleri	1.800.000	42.000	43.000
Avustralya	5.700.00	18.000	18.000
Brezilya	21.000.000	80	80
Burma	N/A	12.000	38.000
Kanada	830.000	-	-
Çin	44.000.000	210.000	240.000
Grönland	1.500.000	-	-
Hindistan	6.900.000	-	-
Madagaskar	N/A	2.900	2.900
Malezya	N/A	960	960
Rusya	10.000.000	2.600	2.600
Güney Afrika	790.000	-	-
Tanzanya	890.000	-	-
Tayland	4.500	7.100	7.100
Viyetnam	22.000.000	1.200	600
Toplam:	110.000.00	300.000	350.000

Şekil 5: Dünyada Mevcut NTE Rezervleri

NTE'ler yerküre yüzeyinde bol miktarda bulunmalarına rağmen, çıkarılabilir olanları alışlagelen minarelerden daha az yaygındır. Kuzey Amerika'da ölçülen rakamlar 3.6 milyon tonu Kanada'da ise 14 milyon tonu göstermektedir.

4.1.2 Türkiye'deki Nadir Toprak Elementlerinin Mevcut Rezervleri

Türkiye'nin nadir toprak elementleri (NTE) potansiyeli uzun yıllar sınırlı araştırmalarla sınırlı kalmış, ancak son yıllarda önemli keşifler gerçekleştirilmiştir. Genel olarak, NTE taşıyan mineraller birincil ve ikincil jeolojik ortamlarda bulunur. Bu ortamlar karbonatitler (genellikle hafif nadir toprak elementleri - LREE), pegmatitler, hidrotermal damarlar (ağır nadir toprak elementleri - HREE açısından zengin), aşınmış tortular/lateritler (iyon adsorpsiyonlu kil) ve plaserler (çoğunlukla deniz kökenli kumlar) şeklinde sınıflandırılmaktadır. Türkiye'de keşfedilmiş başlıca NTE yatakları aşağıdaki gibidir:

Sivrihisar-Beylikova (Eskişehir) Yatağı: Eti Maden, 2016-2018 yılları arasında Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) ile iş birliği yaparak, Eskişehir'in Sivrihisar ve Beylikova ilçelerinde yeni rezerv çalışmalarını yürütmüştür. Bu çalışmalar sonucunda 2022 yılında yaklaşık 694 milyon tonluk NTE rezervi keşfedilmiştir. Bu keşif, Türkiye'nin NTE potansiyeli açısından büyük önem taşımaktadır.

Sofular (Malatya) Yatağı: Sofular Th-NTE yatağı, Sivas ve Malatya arasında yer almaktadır. Yatak, yüksek oranda toryum (Th) ve NTE içeren torit, britolit ve bastnazit gibi minerallerle zenginleşmiştir. NTE içeriği %70'e kadar çıkabilmektedir²⁶.

Çanaklı (Isparta) Yatağı: Isparta yakınlarındaki Gölcük'ün Kuaterner alkali volkanizması, nadir toprak elementlerinde zenginleşme göstermektedir. Çanaklı plaserinde yer alan ağır mineraller, olası bir NTE kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Bu plaserin %0,07–0,08 ağırlıkça TREO'da (Toplam Nadir Toprak Oksitleri) 494 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Çanaklı, potansiyel olarak önemli bir Avrupa kaynağı olarak değerlendirilmektedir.

Mortaş-Doğankuzu (Seydişehir-Konya) Yatağı: Türkiye'nin Toroslar bölgesinde yer alan bu yatak, önemli boksit rezervlerine ev sahipliği yapmaktadır. Bu boksit yataklarında yüksek oranda NTE mineralizasyonu tespit edilmiştir. Mortaş boksit yatağı, Orta Toroslar'daki en büyük yataklardan biri olup, Doğankuzu, Morçukur, Değirmenlik ve Çatmakaya yataklarıyla birlikte toplam 32 milyon tonluk NTE potansiyeline sahiptir. Toplam çıkarılabilir NTE miktarı yaklaşık 37.528 tondur ve ekonomik değeri 46,8 milyar Amerikan Doları olarak tahmin edilmektedir. Bu yatakların içerebileceği NTE miktarı yaklaşık 100,000 ton olup, ekonomik değeri 125 milyar dolara kadar çıkabilmektedir²⁷. Bu yataklar, Türkiye'nin gelecekteki enerji ve teknoloji projeleri açısından stratejik öneme sahiptir.

4.2. NTE'lerin Temiz Enerji Piyasalarındaki Mevcut Durumu

Kalıcı miktatlara olan talep, 2015 ile 2023 yılları arasında neredeyse iki katına çıkarak 93 kiloton seviyesine ulaşmıştır. Bu artış, temiz enerji teknolojilerindeki gelişmeler ve iklim hedeflerine ulaşma çabalarının bir sonucudur. Özellikle rüzgâr türbinlerinin kurulumu ve elektrikli araç kullanımının yaygınlaşması, temiz enerjinin toplam enerji üretimindeki payını artırmıştır. Bu süreçte, temiz enerjinin teknoloji içerisindeki payı %8'den %18'e yükselmiştir.

Nadir toprak elementleri (NTE'ler), bu teknolojilerin etkin çalışmasını sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan miktatlara üretiminde ve elektrikli araçların motorlarında NTE'ler vazgeçilmez bir bileşen haline gelmiştir. İklim hedeflerine ulaşmak amacıyla yapılan yatırımların artmasıyla birlikte, NTE'lere olan talep de hızla artmaya devam edecektir.

4.2.1 Temiz Enerji Dönüşümü Kurulumundaki Durum

2023 yılında temiz enerji kurulumlarındaki yıllık artış, dünya genelinde yeşil enerji dönüşümünde en yüksek seviyeyi görmüştür. Bu artış, rüzgâr endüstrisinde %60, elektrikli araçlarda ise %35 civarındadır. Global olarak rüzgâr enerjisi kurulumundaki bu artış, en son 2020 yılında görülen rekorun kırılmasına yol açmıştır. Özellikle Çin, rüzgâr sektöründeki küresel kurulum artışının %60'ını oluşturarak bu alanda lider konumundadır.

Avrupa ise yavaş ve karmaşık işleyen izin süreçlerini düzenlemek amacıyla çözüm politikaları üzerinde çalışmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise Inflation Reduction Act (IRA)'in imzalanmasıyla gelecekteki vergi kredilerine dair belirsizlik nedeniyle yıllık kurulum miktarında yarıdan fazla bir düşüş yaşanmıştır. Ancak, bu yasanın sağladığı politika görünürlüğü sayesinde kapasite artışlarının önümüzdeki dönemde ciddi oranlarda gerçekleşmesi beklenmektedir.

²⁶a.g.e

²⁷Uranium, Thorium and Rare Earth Element Deposits of Turkey: https://www.researchgate.net/publication/330516694_Uranium_Thorium_and_Rare_Earth_Element_Deposits_of_Turkey

Hindistan'da, büyük miktardaki projeler sayesinde yıllık kurulumlar %50'den fazla artış göstermiştir. Deniz üstü rüzgâr türbini kurulumları ise, 2022'de yaşanan ciddi düşüşün ardından 2023 yılında toparlanma yaşamıştır. Ancak Çin hükümeti haricinde, endüstri genelinde yükselen maliyetler, deniz üstü kurulum maliyetlerinin geçtiğimiz yıllara oranla %20 artmasıyla mücadele etmektedir. Amerika Birleşik Devletleri ve Birleşik Krallık ise artan bu maliyetler nedeniyle toplamda yaklaşık 15 GW'lık deniz üstü projelerini iptal etmek ya da ertelemek zorunda kalmıştır.

Global ölçekte, 130'dan fazla ülke, yenilenebilir enerji kapasitesini artırmak amacıyla destekleme mekanizmaları geliştirmiştir. 2020'li yılların ortasından itibaren yenilenebilir enerjinin kömürü geçerek en büyük enerji kaynağı haline gelmesi beklenmektedir.

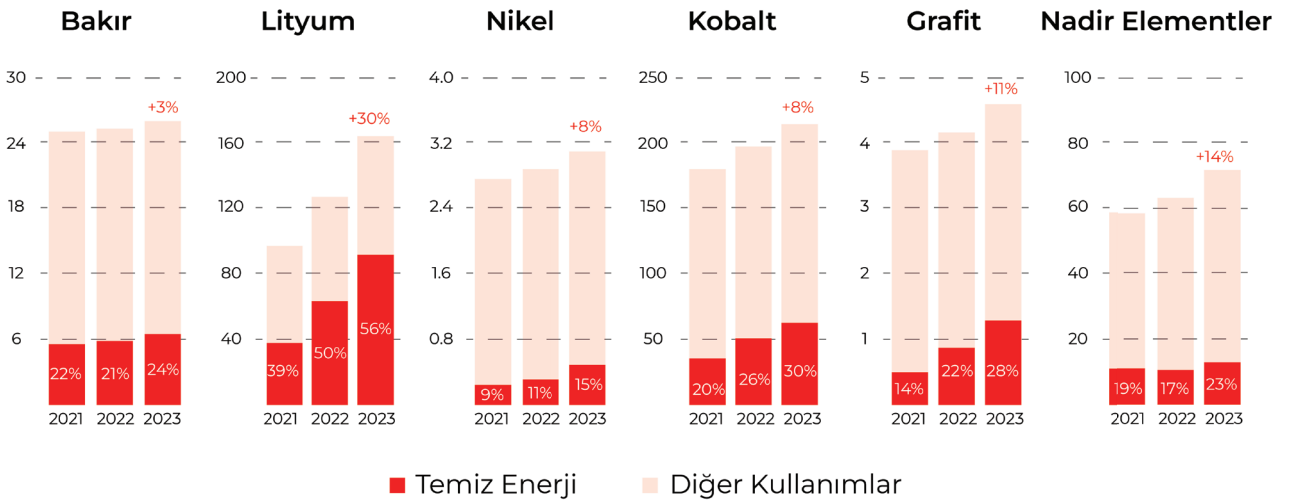
4.2.2 NTE Arz-Talep ve Fiyat Durumu

Yenilenebilir enerji üretim kapasitesinin hızla devreye alınmasını desteklemek amacıyla bakır, silikon ve nadir toprak elementleri (NTE) gibi kritik minerallere olan talep artmıştır ve önümüzdeki yıllarda bu talebin daha da artması beklenmektedir. Özellikle elektrikli araç satışları, 2023 yılında yıllık %35 artışla 14 milyona ulaşarak, 2018'deki satışların neredeyse 6 katına çıkmıştır. Elektrikli araçlar, 2023 yılında küresel araç satışlarının %18'ini oluşturmaktadır, bu oran 2022'de %14 seviyesindeydi. Küresel elektrikli araç satışlarının neredeyse %95'i Çin, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde gerçekleşmektedir.

Bu artan elektrikli araç talebi, aynı zamanda elektrikli araç bataryalarına ve nadir toprak elementlerine olan talebi de artırmıştır. NTE'lerin enerji depolama, manyetik özellikler ve yüksek teknoloji ürünlerinde kullanılmasının öneminin altı çizilmektedir.

Aşağıdaki grafikte, 2023 yılında anahtar enerji dönüşüm minerallerine yönelik talep artışı gösterilmektedir. Enerji dönüşümünün temel minerallerine yönelik talep, temiz enerji teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla 2023 yılında da güçlü bir şekilde artmaya devam etmiştir.

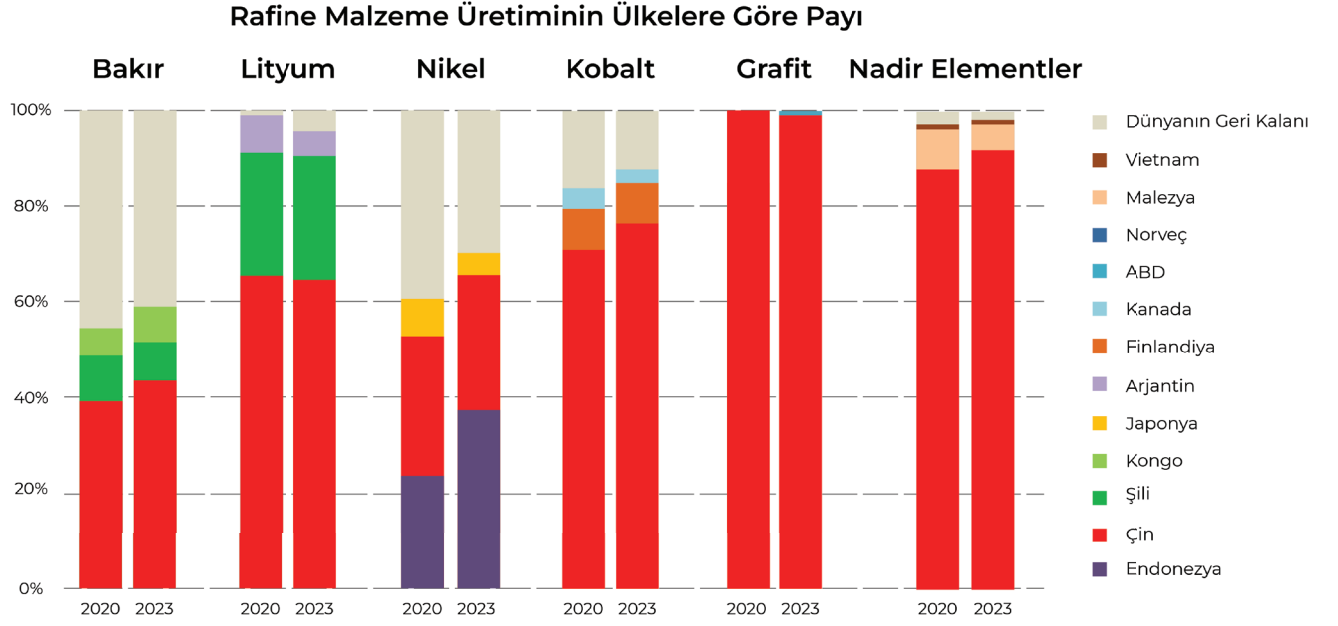
Seçilmiş mineraller için görünümü, 2021-2023



Şekil 6: Seçilmiş mineraller için talep görünümü, 2021-2023 (Kaynak: UEA)

Not: Nadir toprak elementleri dört mıknatıs elementi içerir; neodimyum, praseodim, disproyum ve terbiyum. Temiz enerji uygulamalarına yönelik talep, düşük emisyonlu enerji üretimi, elektrikli araç ve batarya depolama, şebeke ağları ve hidrojen teknolojileri için tüketimi içermektedir.

Miknatıslarda kullanılan nadir toprak elementlerinin (NTE) üretiminde, küresel madencilik faaliyetlerinin %85'i üç büyük üreticiye aittir ve Çin, bu üretimin %62'sini tek başına gerçekleştirmektedir. Anahtar enerji dönüşüm mineralleri arasında, coğrafi olarak en yoğun şekilde bir bölgeye odaklanmış olan nadir toprak elementleridir. Rafinasyon süreçlerine bakıldığında ise, 2023 yılında dünya genelinde rafine edilen nadir toprak elementlerinin %92'si Çin tarafından yapılmaktadır. Aşağıdaki tabloda, 2023 yılı itibarıyla rafine edilmiş kritik materyallerin ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir.

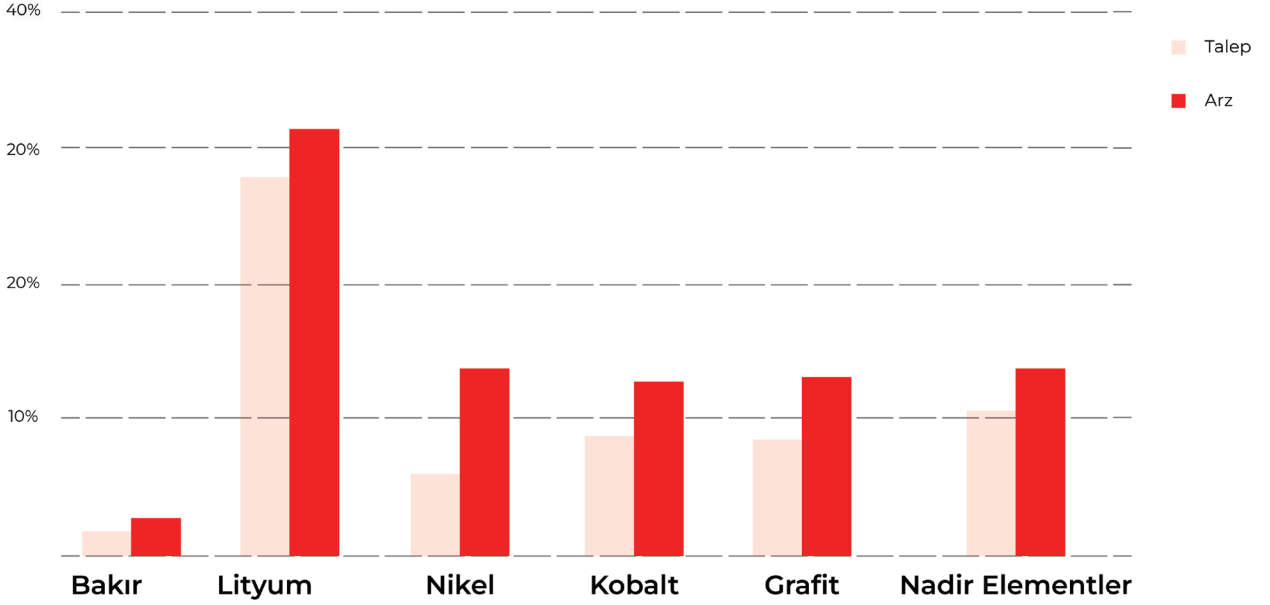


Not: Grafit, pil sınıfı için küresel grafitte dayanmaktadır. Nadir topraklar sadece miknatıslı topraklardır.

Şekil 7: Rafine Malzeme Üretiminin Ülkelere Göre Payı (Kaynak: UEA)

Piyasalar kısa vadeli talepleri karşılamak için iyi tedarik edilmiş gibi gözükse de, bazı nadir toprak elementlerinde arz talebin önüne geçmiştir. Bu durum, özellikle bazı elementlerde geçici bir fazlalık yaratsa da, uzun vadede artan talep göz önünde bulundurulduğunda bu arz fazlalığının sürdürülebilir olmayabileceği düşünülmektedir. Özellikle temiz enerji teknolojilerindeki hızlı büyüme ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan artan ihtiyaç, arz-talep dengesinin gelecekte talep lehine değişmesine neden olabilir.

Seçilmiş mineraller için 2021 ve 2023 Yılları Arasında Yıllık Ortalama Talep ve Arz Büyüme Oranları



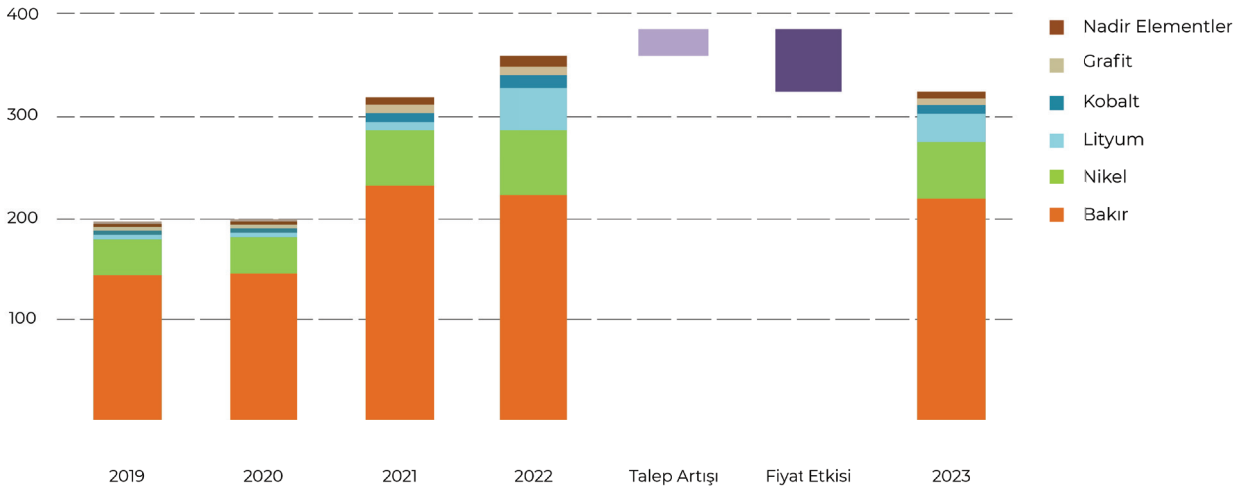
Not: Arz büyüme oranları rafine edilmiş üretime dayanmaktadır. Grafit sütunu hem doğal hem de sentetik grafiti içermektedir.

Şekil 8: Seçilmiş Mineraller İçin 2021 ve 2023 Yılları Arasında Yıllık Ortalama Talep ve Arz Büyüme Oranları (Kaynak: UEA)

Arz-talep dengesinin bozulması, kritik minerallerin fiyatlarını ciddi oranda düşürmüştür. Düşen fiyatlar nedeniyle anahtar enerji dönüşüm minerallerine olan talep artmasına rağmen, pazar %10 oranında bir küçülme yaşamıştır. Bu durum, özellikle 2020-2021 dönemlerinde fiyatlardaki dalgalanmaların bir sonucudur ve bu eğilimin 2024'te de devam etmesi beklenmektedir. Eğer fiyatlar 2022 yılındaki seviyelerde kalmış olsaydı, bu yılki pazar büyümesi %20 civarında olabilirdi.

Temel Enerji Geçiş Mineraleri İçin Pazar Büyüklüğü, 2019-2023

Milyar Dolar



Şekil 9: Temel Enerji Geçiş Mineraleri İçin Pazar Büyüklüğü (Kaynak: UEA)

Mevcut fiyatlardaki düşüşün, Çin dışındaki piyasaları çeşitlendirmeyi hedefleyen projelerin gecikmesine yol açabileceği düşünülmektedir. Bu durum, özellikle fiyatların düşük seviyelerde seyretmesi nedeniyle, yeni yatırımların ve projelerin finansal açıdan cazibesini azaltabilir.

Bir diğer kaygı ise, orta vadede ağır nadir toprak elementlerinin (HREE) arzının sıkılaşma olasılığıdır. Elektrikli araç motorlarında genellikle hafif nadir toprak elementleri (LREE) kullanılsa da, ağır elementler olan disprosyum ve terbiyum gibi bileşenler de bu teknolojinin temel yapı taşlarıdır. Ancak, ağır NTE'lerin maden yataklarında hafif NTE'lerle senkronize olmaması, gelecekteki projelerin tehlikeye girmesine yol açabilir. Bu durumu önlemek adına duyurulan tüm projelerde güven fonu oluşturulmalı ve senkronizasyon hızla sağlanmalıdır.

NTE endüstrisi hâlâ 2010-2011 NTE krizinin sonuçlarıyla mücadele etmektedir. Çin, hem hafif hem de ağır NTE'lerin lider üreticisi ve tedarikçisi olarak pazarın büyük bölümünü elinde bulundurmaktadır. Nadir toprak elementlerinin ve kalıcı mıknatısların tedarik zinciri, bölgesel ve karmaşık bir yapıya sahiptir. 2023 yılında NTE pazarında Çin'den gelen arz fazlası, küresel talebin beklentinin altında kalmasıyla birleşince, neodimyum fiyatı %45 oranında düşmüştür. Ayrıca, Çinli bir üretici firmanın yıllık kârı 5.98 milyar Yuan'dan 2.17 milyar Yuan'a kadar gerilemiştir.

5. Nadir Toprak Elementleri Gelecek Öngörüsü

5.1 NTE Gelecek Öngörüsü

G7 ülkelerinin talebi üzerine Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency - IEA), 2050 yılına kadar öngördüğü üç senaryo üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu senaryolar, çeşitli faktörlere ve en çok da hükümetlerin taahhüt ettiği politikalara dayandırılarak oluşturulmuştur. Gelecek hakkında öngörü sahibi olmak ve bugünden aksiyon almak amacıyla tasarlanan bu senaryolar, Net-Zero Emissions by 2050 (NZE Senaryosu), Stated Policies Scenario (STEPS) ve Announced Pledges Scenario (APS) olarak adlandırılmaktadır. Yazının bu kısmında belirtilen öngörüler, Uluslararası Enerji Ajansı'nın yayınladığı bu senaryolar temel alınarak oluşturulmuştur.

NZE (Sıfır Emisyon Senaryosu):

Net sıfır senaryosunda, en az %50 ihtimalle, 2100'de küresel ısınmanın artışının mevcut endüstriyel seviyenin 1.5°C üstünde sabit tutulması hedeflenmektedir. Net sıfır senaryosu, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (UN Sustainable Development Goals) kapsamında, 2030'a kadar erişilebilir temiz enerjiye ulaşma gibi enerji temelli hedefleri de içermektedir. Ancak, her geçen gün artan emisyon oranları ve sürdürülebilirlik hedeflerindeki sınırlı ilerlemeler nedeniyle, net sıfır hedeflerine ulaşma ihtimali azalmaktadır. Bununla birlikte, son dönemdeki teknolojik gelişmeler bu hedeflere ulaşma konusunda umut vermektedir.

APS (Açıklanan Taahhütler Senaryosu):

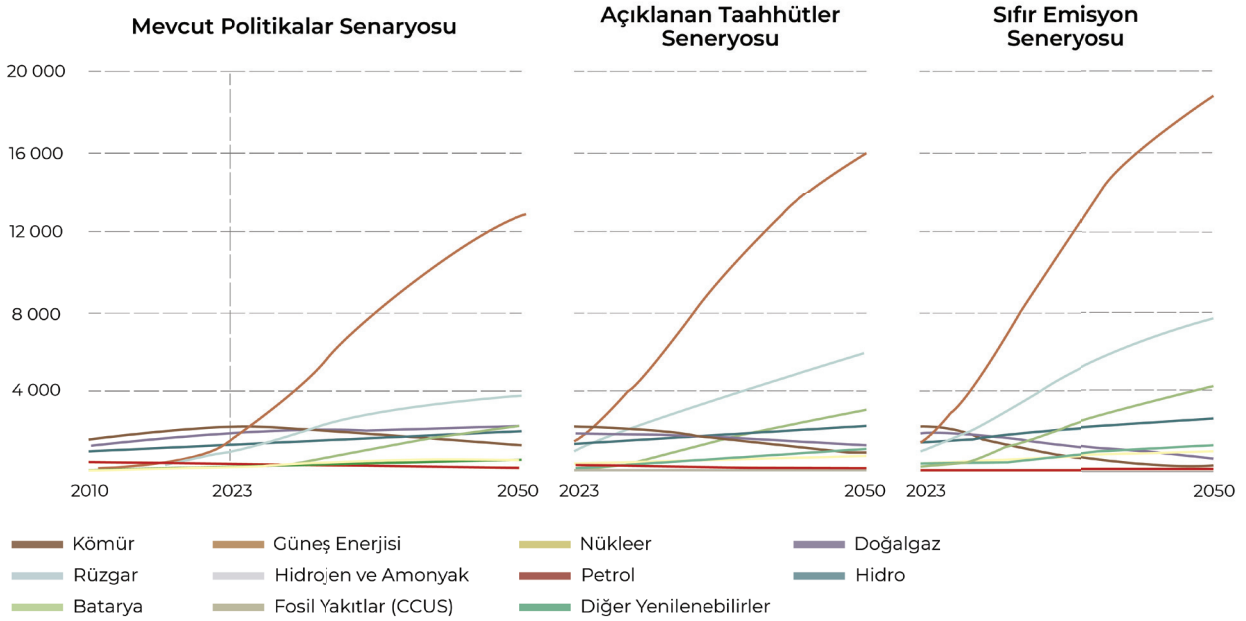
Bu senaryo, hükümetlerin iklim temelli taahhütlerini zamanında ve tam olarak yerine getireceğini varsayan bir senaryodur. Bu senaryoya Paris Anlaşması ile başlayan Ulusal Belirlenen Katkılar (NDCs) ve uzun dönem net-sıfır hedefleri dahil edilmiştir. Ayrıca, iş dünyası ve bazı paydaşların verdiği taahhütler de bu senaryoda yer almaktadır. Ancak, çoğu hükümet bu taahhütlerin gerisinde kalmaktadır. APS senaryosu, devletlerin iklim değişikliğiyle mücadelede alması gereken daha ciddi ve hızlı eylemlere dikkat çekmekte ve küresel ısınma ile savaşın güçlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu senaryoya göre, 2100 yılına kadar küresel sıcaklık artışının %50 ihtimalle 1.7°C olacağı tahmin edilmektedir.

STEPS (Mevcut Politikalar Senaryosu):

Bu senaryo, enerji sistemlerinde gerçek ilerlemeyi mevcut politikalarla göstermek amacıyla tasarlanmıştır. APS'de hükümetlerin başarıya ulaşacağı öngörülürken, STEPS senaryosu, enerji ekonomisinde gerçekte ne yapıldığını detaylıca incelemektedir. STEP senaryosu, sektörden sektöre politikaları değerlendirerek, "varsayılan" başarıları hesaba katmadan, gerçek çıktıları sunmaktadır. Güncel STEP senaryosuna göre, küresel sıcaklık artışının 2100 yılına kadar %50 ihtimalle 2.4°C olacağı öngörülmektedir.

Tüm senaryolar incelendiğinde, güneş ve rüzgâr enerjisi kurulumlarının, her bölgede ve her senaryoda en büyük kapasite artışını sağlayarak yenilenebilir enerji kurulumunda lider konumda olduğu görülmektedir. Bu durum, temiz enerji dönüşümünün hızlanmasına ve fosil yakıtlardan uzaklaşılmasına önemli katkı sağlamaktadır. Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi teknolojilerindeki maliyetlerin düşmesi, bu kaynakların daha da yaygınlaşmasını mümkün kılmaktadır.²⁹

Kaynak ve Senaryoya Göre Küresel Elektrik Kurulu Gücü



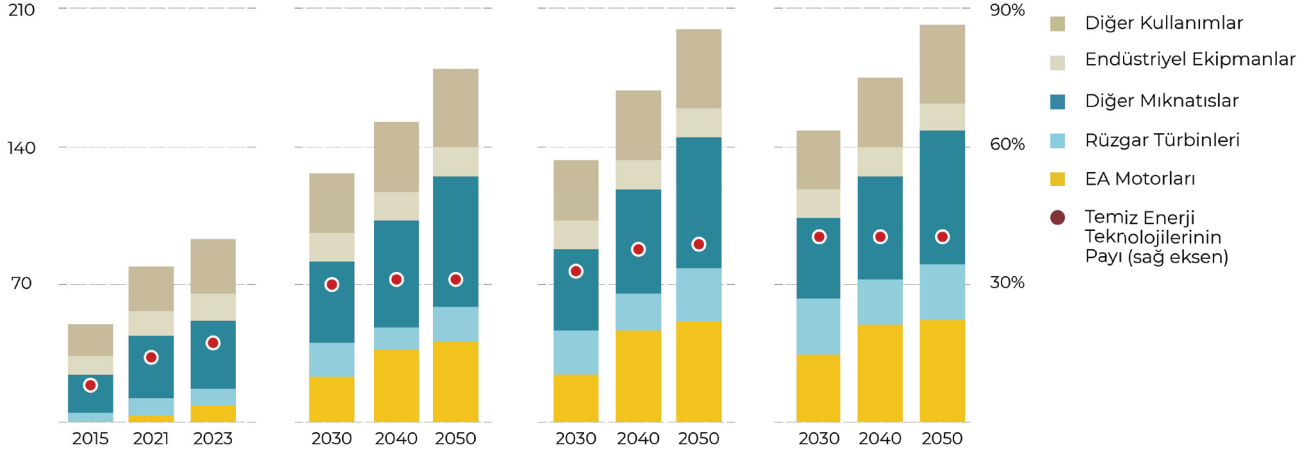
Şekil 10: Kaynak ve Senaryoya Göre Küresel Elektrik Kurulu Gücü (Kaynak: UEA)

Küresel çapta yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımlar ve özellikle rüzgâr endüstrisindeki kurulumlar arttıkça, nadir toprak elementlerine (NTE) olan talebin de bu artışa paralel olarak büyümesi beklenmektedir. Senaryolara bağlı olarak, NTE içeren kalıcı mıknatısların talebinin 2050'de iki katına çıkacağı öngörülmektedir. Aşağıdaki tabloda, kalıcı mıknatıslarda kullanılan NTE'lerin, farklı senaryolar ve sektörlere göre talep öngörüsü sunulmuştur.

Bu talep artışı, enerji dönüşümü süreçlerinin hızlanmasıyla doğru orantılıdır. Özellikle rüzgâr türbinleri ve elektrikli araç motorlarında kullanılan bu mıknatısların, sürdürülebilir enerji üretimi için stratejik önemi giderek daha belirgin hale gelmektedir.

²⁹a.g.e

Sektör ve Seneryoya Göre Küresel Mıknatıslı Nadir Toprak Elementleri Talep Görünümü



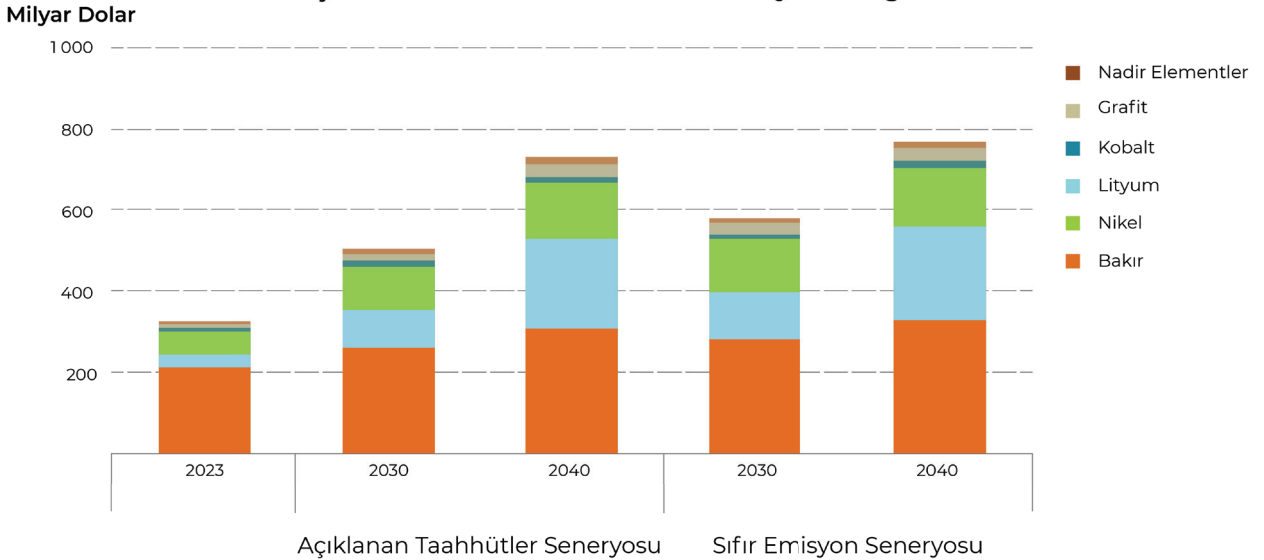
Not: Şekiller sadece mıknatıslı nadir toprak elementleri içindir.

Şekil 11: Sektör ve Senaryoya Göre Küresel Mıknatıslı Nadir Toprak Elementleri Talep Görünümü (Kaynak: UEA)

Kalıcı mıknatıs pazarının, 2024 yılında 53,5 milyar ABD dolarından 2029 yılında 80,4 milyar ABD dolarına ulaşması ve yıllık bileşik büyüme oranının (CAGR) %8,5 olması öngörülmektedir (M). Aynı zamanda, anahtar enerji dönüşüm elementlerinin pazar değerinin 2040 yılına kadar iki kattan fazla artması ve 770 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir. Bu büyüme, yenilenebilir enerji ve elektrikli araçlar gibi sektörlerdeki teknolojik gelişmelerin, özellikle NTE'lere olan talebi hızla artırmasıyla yakından ilişkilidir.

Temel enerji dönüşümü minerallerinin toplam iyasa değeri, iklim odaklı senaryolarda 2040 yılına kadar iki kattan fazla artarak Net Sıfır Emisyon senaryosunda 770 milyara ulaşmaktadır.

APS ve Net Sıfır Emisyon Senaryosunda Enerji Dönüşümünün Temel Minerallerinin Piyasa Değeri

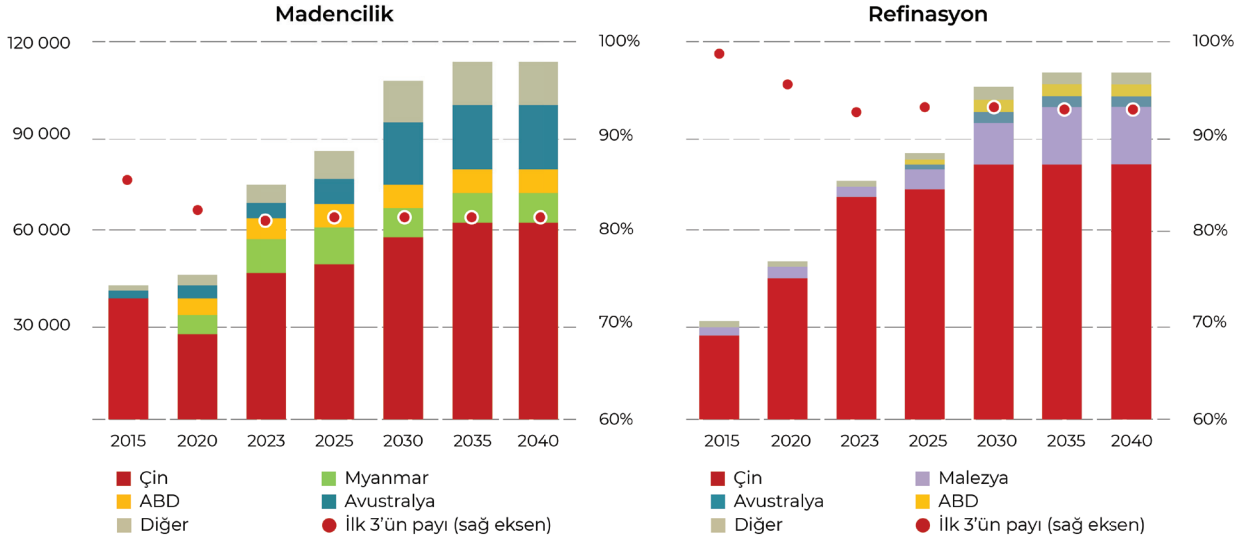


Not: 2023 projeksiyon dönemi için pazar büyüklüğünü tahmin etmek amacıyla yıllık ortalama fiyat seviyeleri varsayılmıştır.

Şekil 12: APS ve NZE Senaryosunda Enerji Dönüşümünün Temel Minerallerinin Piyasa Değeri (Kaynak: UEA)

Artan talebe karşılık madencilik ve rafinasyon süreçlerinde de hızlı bir büyüme beklenmektedir.

Baz seneryoda işletmede olan ve duyurulan projelerden Miknatıslı NTE Üretimi



Şekil 13: Baz seneryoda işletmede olan ve duyurulan projelerden Miknatıslı NTE Üretimi (Kaynak: UEA)

2030'u kadar top üç üreticinin (Nd, Pr, Dy, Tb):

Madencilikte: Çin (%54), Avustralya (%18), Burma (%9)

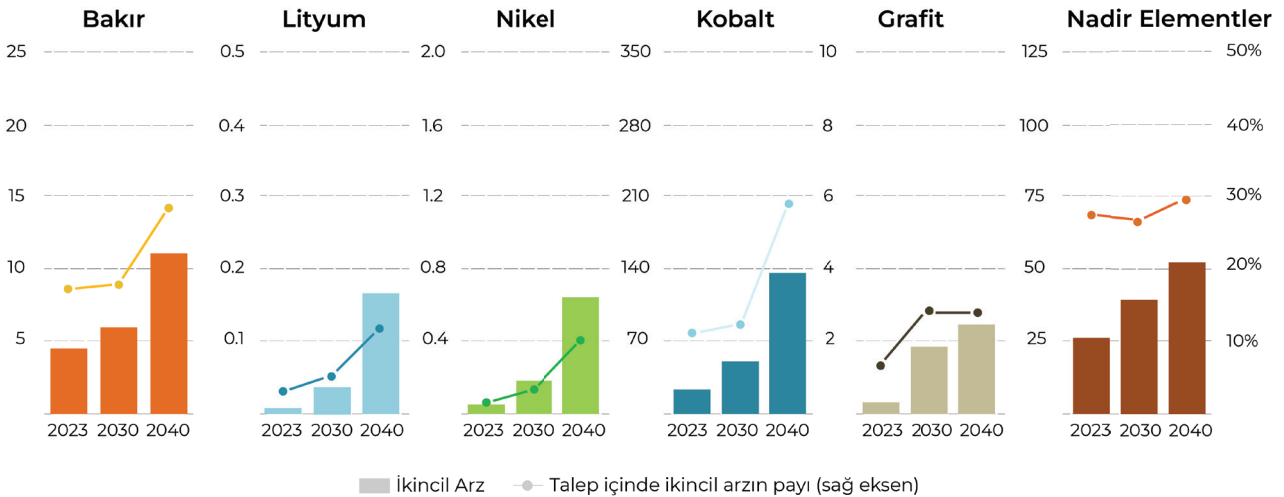
Rafinasyonda: Çin (%77), Malezya (%12), Avustralya (%3) olması beklenmektedir.

İşletmedeki ve duyurulan madencilik projelerinden beklenen miknatıslarda kullanılan nadir toprak elementi arzı, bugünkü seviyelere göre sırasıyla %44 ve %52 artarak 2030 yılında 107 kt'yi aşacak ve 2040 yılında 114 kt'ye ulaşacaktır.³⁰

Kalıcı miknatısların geri dönüşümünden elde edilen nadir toprak elementlerinin tedariğinin özellikle de 2030'dan sonra, bahsi geçen senaryolarda artan talebi karşılamada çok önemli rol alacağı düşünülmektedir.

Geri dönüşümden elde edilen ikincil arz, özellikle 2030'dan sonra iklim odaklı senaryolarda talep artışını karşılamada giderek daha önemli bir rol oynamaktadır.

Net Sıfır Emisyon senaryosunda odak mineraller için ikincil arz hacimleri ve toplam talep içindeki payı



Not: Ömrünü tamamlamış ekipmanlardan ve üretim hurdalarından geri dönüştürülen hacimleri içerir. Bakır için doğrudan hurda kullanımı hariç tutulmuştur.

Şekil 14: Net Sıfır Emisyon Senaryosunda Odak Mineraller İçin İkincil Arz Hacimleri ve Toplam Talep İçindeki Payı (Kaynak: UEA)

6. Nadir Toprak Elementleri Stratejiler, Politikalar ve Projeler

Hükümetlerin politika ajandaları; nadir toprak elementlerine (NTE) olan talep artışının yanı sıra, değişken NTE fiyatları, tedarik zincirindeki sıkıntılar ve jeopolitik endişeler nedeniyle önemli ölçüde genişlemiştir. Bu bağlamda, birçok hükümet bu riskleri en aza indirmek amacıyla çeşitli politikalar geliştirmiştir.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), ülkelerden gelen yoğun talep üzerine 2023 yılında dünyada bir ilk olan Paris Critical Minerals & Clean Energy Summit'ini düzenlemiştir. Ayrıca, IEA Kasım 2022'de lansmanını yaptığı Critical Minerals Policy Tracker ile kritik minerallerin takibi ve yönetimine yönelik kapsamlı bir rehber sunmuştur.

Arz-talep dengesinin küresel çapta sağlanması, bölgesel aksaklıkları maskeleyememektedir. Özellikle Avrupa ve ABD gibi bölgelerde, Critical Raw Materials Act (CRMA) ve Inflation Reduction Act (IRA) gibi politikalar, tedarik zincirinin çeşitlendirilmesi ve bağımsızlaştırılması yönünde önemli adımlar atmaktadır. IRA, dış kaynaklardan elde edilen ürünlerin kullanımını azaltmayı hedeflerken, CRMA, Avrupa'nın bir ülkeden yaptığı ithalatın toplam tüketimin %65'ini aşmamasını hedeflemektedir. Bu tür politikalar, büyük tüketici ülkelerin tedarik kaynaklarını çeşitlendirmeye yönelik çabalarını hızlandırmaktadır.

Bu gelişmeler doğrultusunda, nadir toprak elementleri alanında küresel stratejiler ve projeler hayata geçirilmeye devam etmektedir. Bu projeler, enerji dönüşümü, yeşil teknolojiler ve savunma sanayileri gibi kritik sektörlerde NTE'lerin stratejik kullanımını ve tedarik güvenliğini artırmayı hedeflemektedir.

6.1 Stratejiler

Haziran 2019'da Belçika'da kurulan Nadir Toprak Endüstrisi Derneği (REIA), küresel nadir toprak elementi endüstrisini temsil eden uluslararası bir kâr amacı gütmeyen kuruluş olarak, tüm büyük NTE paydaş ülkelerinden aktif üyelere sahiptir. REIA, küresel üye ağı aracılığıyla, NTE değer zincirinin daha iyi anlaşılmasına ve tanıtılmasına katkıda bulunmak için önemli bir konumda yer almaktadır. REIA'nın faaliyetleri, nadir toprak elementlerinin üretiminden işlenmesine, ticaretine ve geri dönüşümüne kadar geniş bir yelpazede yer almaktadır. (tt)

Nadir toprak elementleri piyasasında yaşanan jeopolitik ve ekonomik riskleri en aza indirmek amacıyla, G7 ülkeleri tarafından kritik madenlerin güvenliğini sağlamak için beş maddelik bir plan geliştirilmiştir:

1. Uzun Vadeli Arz-Talep Tahmini Yapılması: Kritik minerallere yönelik gelecekteki arz ve talep eğilimlerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi, piyasalardaki dengesizliklerin önüne geçmek için önemlidir.
2. Kaynak ve Tedarik Zincirlerinin Geliştirilmesi: Nadir toprak elementlerinin tedarik zincirlerini çeşitlendirmek ve tedarik güvenliğini artırmak için yeni kaynakların keşfedilmesi ve mevcut kaynakların daha verimli kullanılması gerekmektedir.
3. Daha Fazla Geri Dönüşüm: Nadir toprak elementlerinin geri kazanımını artırarak, madencilik faaliyetlerine olan bağımlılığı azaltmak ve sürdürülebilir bir tedarik zinciri oluşturmak hedeflenmektedir.
4. Yeni Teknolojilerle Tasarruf Etmek: Nadir toprak elementlerine olan talebi azaltacak yeni teknolojilerin geliştirilmesi, bu değerli minerallerin daha verimli kullanılmasını sağlayacaktır.
5. Tedarikte Oluşabilecek Kesintilere Hazırlıklı Olmak: Tedarik zincirinde oluşabilecek kesintilere karşı ülkelerin hazırlıklı olması ve alternatif tedarik yollarını önceden planlaması büyük önem taşımaktadır.

Bu stratejiler, nadir toprak elementlerinin küresel piyasadaki stratejik önemini koruyarak, güvenilir ve sürdürülebilir bir tedarik sistemi oluşturmayı hedeflemektedir.

6.2 Uygulanan Politikalar

Şeffaf olmayan nadir toprak piyasası raporlamalarına karşı, tedarik sıkıntısı yaşamamak ve piyasayı düzgün çeşitlendirebilmek adına aksiyon alınması gerekmektedir. Nadir toprak elementleri tedarik zincirlerinde yaşanan zorluklar, jeopolitik gerilimler ve fiyat dalgalanmaları, ülkeleri stratejik politikalar uygulamaya yönlendirmiştir. Bu kapsamda, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği, nadir toprak elementleri arz güvenliğini artırmak için çeşitli politikalar hayata geçirmiştir.

6.2.1 Amerika Birleşik Devletleri'nin Uyguladığı Politikalar

Amerika Birleşik Devletleri'nde, 2022'de hayata geçirilen Enflasyon Azaltma Yasası (IRA - Inflation Reduction Act), ABD tarihindeki en büyük iklim yatırımı olarak öne çıkmaktadır. Bu yasa, 2030 yılına kadar emisyonları %40 azaltmayı hedeflemekte ve bu süreçte toplamda 370 milyar dolarlık bir harcama yapılmasını öngörmektedir. Yasanın ana hedefleri arasında enerji altyapısının modernizasyonu, elektrikli araç altyapısının genişletilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması yer almaktadır. Bu tür politikalar, nadir toprak elementleri talebini ve bu elementlerin stratejik önemini daha da artırmaktadır.

Küresel olarak, 2010 ile 2023 yılları arasında yenilenebilir enerji kurulum kapasitesi yılda yaklaşık %20 büyürken, elektrikli araçların yaygınlaşması yıllık %80 bileşik büyüme oranı ile hızlı bir artış göstermiştir. Bu büyüme, nadir toprak elementlerine olan talebi de tetiklemiştir.

6.2.2 Avrupa Birliği'nin Uyguladığı Politikalar

Avrupa Birliği, 2019 yılında tanıttığı Avrupa Yeşil Mutabakatı ile 2050 yılına kadar iklim açısından nötr olmayı hedeflemektedir. Ayrıca, 55'e Uygun programı ile 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını %55 oranında azaltmayı amaçlamaktadır.

Avrupa Birliği, 14 Nisan 2024 tarihinde Kritik Ham Maddeler Yasası (CRMA - Critical Raw Materials Act) ile birlikte tedarik zinciri risklerini ve iç pazarda oluşabilecek dengesizlikleri azaltmayı hedefleyen yeni düzenlemeler getirmiştir. Bu yasanın ana amacı, stratejik ham maddelerde kapasite artırımı ve tedarik sürecinde çeşitlendirmeye yönelmek ve AB'nin kritik ham maddeler konusundaki bağımlılığını azaltmaktır.

Bu kapsamda üç ana hedef belirlenmiştir:

1. Madencilik Kapasitesinin Artırılması: Birlik, stratejik hammadde tüketiminin en az %10'unu kendi çıkarma kapasitesinden karşılamayı planlamaktadır. Ancak bu kapasitenin jeopolitik ve coğrafi koşullara bağlı olduğu unutulmamalıdır.
2. Hammadde İşleme Kapasitesinin Artırılması: Birlik, stratejik hammaddelerin işlenmesi konusunda kendi tüketiminin en az %40'ını karşılayacak bir kapasiteye ulaşmayı hedeflemektedir. Bu, tedarik zincirinin daha güvenilir ve sürdürülebilir hale gelmesine katkı sağlayacaktır.
3. Geri Dönüşüm Kapasitesinin Artırılması: Stratejik ham maddelerin geri dönüşümü, yıllık tüketimin en az %25'ini karşılayacak seviyeye getirilmelidir. Bu, hammadde tedarikinin sürdürülebilirliği ve güvenliği açısından kritik bir adım olacaktır.

Avrupa Birliği'nin 2030 yılına kadar uygulamayı planladığı bu politikalar, iç pazarda enerji ve hammadde güvenliğini sağlamaya yönelik önemli adımlar içermektedir. Bu düzenlemeler, AB'nin kritik hammaddelere sürdürülebilir, güvenilir ve dayanıklı bir erişim sağlamak amacıyla oluşturduğu genel çerçeveyi temsil etmektedir.

6.3 Projeler

2023 yılında kritik mineral madenciliğine yapılan yatırım %10 artmıştır. Bu artış, özellikle fiyatlardaki düşüş nedeniyle üreticilerin finansal baskı altında kalmasından kaynaklanmaktadır. Madencilik alanındaki büyük aktörlerin çeşitlendirilmesi, yatırım dünyasında daha dengeli bir yapı oluşturmaktadır. Uzman yatırımcılar, borçlanma olanaklarının azalmasına rağmen gelecekteki büyümeyi yakalayabilmek adına daha fazla risk almayı tercih etmektedirler.

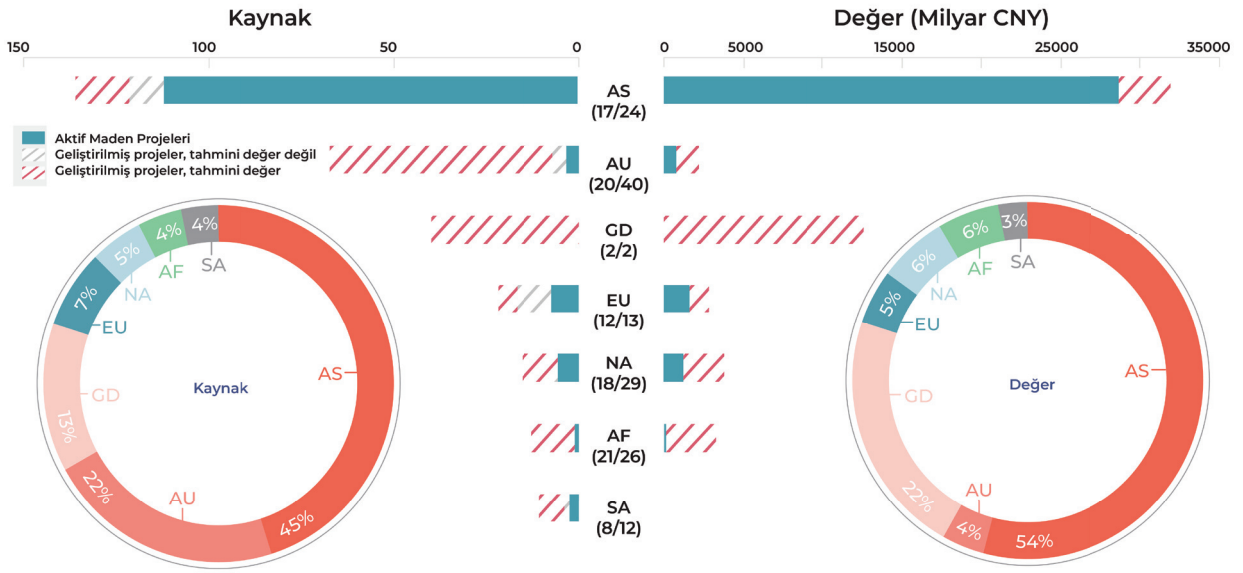
Kritik mineraller sektörüne yapılan risk sermayesi yatırımları, 2023 yılında artmaya devam etmiştir. Özellikle batarya geri dönüşümü üzerine kurulan start-up'ların desteklenmesi, bu büyümeye katkıda bulunmuştur. Bu girişimlerin yanı sıra nadir toprak elementleri tedarik zincirinde inovasyon ve sürdürülebilirliğe yönelik projeler de ön plana çıkmaktadır.

Devam eden büyük projeler ve bu projelerin coğrafi dağılımı, nadir toprak elementlerinin arz güvenliğini artırmak adına küresel ölçekte gerçekleştirilmektedir. Bu projeler, madencilikten rafineasyona kadar geniş bir yelpazede yer almakta ve hem devlet destekli hem de özel sektör girişimleri tarafından finanse edilmektedir. Dünyanın farklı bölgelerine yayılan bu projeler, enerji dönüşümü ve teknolojik gelişmelerle birlikte kritik minerallerin daha sürdürülebilir bir şekilde üretilmesini amaçlamaktadır.

Projelerin dünya üzerindeki dağılımı ve değerleri Annex bölümünde detaylı olarak sunulmuştur. Bu projeler, stratejik ham maddelerin çıkarılması, işlenmesi ve geri dönüşümüne yönelik büyük yatırımları kapsamaktadır ve küresel tedarik zincirinin gelecekteki ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik önemli adımlar olarak kabul edilmektedir.



Şekil 15: Projelerin Uygulandığı Bölgelerdeki Kaynaklar



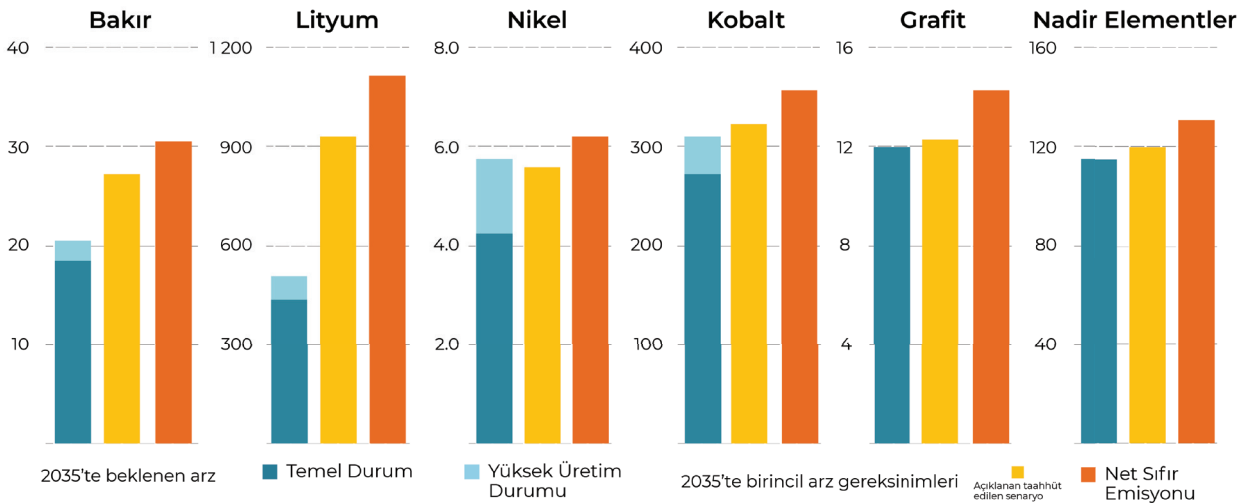
Şekil: Küresel NTE projelerinin kıtalara göre NTE kaynakları (solda) ve değeri (sağda) dağılımıdır. Merkezi ikey eksenin sayı kombinasyonu, kaynak verilere sahip NTE projelerinin sayısını (solda) ve ilgili kıtada temsil etmektedir. Camgöbeği-mavi çubuk aktif madene karşılık gelirken, pembe gölgeli çubuk geliştirilmiş projeleri temsil etmektedir. AS, Asya; AU, Avustralya; GD, Grönland; EU, Avrupa; NA, Kuzey Amerika; AF, Afrika; SA, Güney Amerika.

Şekil 16: Projelerin Tahmini Değerleri

Kritik madenlerde 2035 yılına kadar anons edilen projeler dikkate alınarak beklenen kritik maden tedarik artışı aşağıdaki gibidir.

Açıklanan projelerden beklenen arz, bakır ve lityum hariç olmak üzere, ulusal ve küresel iklim hedeflerine ulaşmak için öngörülen 2035 gereklilikleri aralığındadır.

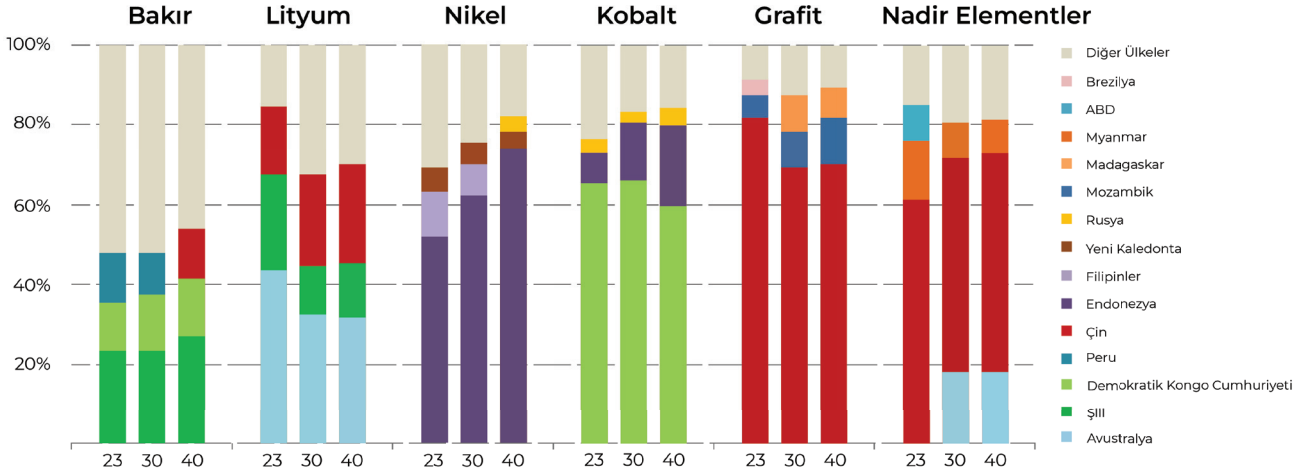
Mevcut ve duyurulan projelerden beklenen arz ve senaryo göre odak mineraller için 2035 birincil arz gereksinimleri



Şekil 16: Mevcut ve Duyurulan Projelerden Beklenen Arz ve Senaryoya Göre Odak Mineraller için 2035 Arz Gereksinimleri

Olası proje kanalları ülkelere ve elementlerin coğrafik konsantrelerine göre, madencilik projeleri aşağıda verilmektedir.

Baz seneryoda odak mineralleri için çıkarılan maden ve hammadde üretiminin coğrafi dağılımı



Not: Grafit çıkarma işlemi doğal pul grafit içindir. Nadir toprak elementleri için verilen rakamlar sadece miknatıslı toprak elementleri içindir. Şekil, belirli bir yılda ilk üç üretici ülkenin değerini göstermektedir.

Şekil 17: Baz Senaryoda odak mineraller için çıkarılan maden ve hammadde üretiminin coğrafi dağılımı (Kaynak: UEA)

Diğer bir kaynaktan NTE araştırma projeleri ve tahmini değerleri verilmiştir.

Diğer bölgelerdeki gelişmiş projelere kıyasla Avrupa'daki en gelişmiş NTE arama projeleri

Proje Başlığı (Depozito)	Bölge	Ülke	Geliştirici/İşletmeci	Mineral Kaynakları (Mt)	Not Toplam nadir toprak oksidi	Sepet Fiyatı (kg/Dolar)
Kvanedjeld	Avrupa	Grönland	Greenland Minerals and Energy Ltd.	619	1.06	23
Norra Karr	Avrupa	İsveç	Tasman Metals Ltd.	58.1	0.59	39
Ngualla	Afrika	Tanzanya	Peak Resources Ltd.	41.7	4.19	23
Songwe Hill	Afrika	Malavi	MkangoResources	31.8	0.16	28
Steenkampskraal	Afrika	Güney Amerika	Great Western Minerals Group Ltd.	0.7	14	27
Bear Lodga	Kuzey Amerika	ABD	Rare Element Resources Ltd.	52.1	2.71	28
Kipawa	Kuzey Amerika	Kanada	Matamec Explorations Inc.	27.1	0.4	37
Nechalacho	Kuzey Amerika	Kanada	Avalon Rare Metals Inc.	125.7	1.43	37
Strange Lake	Kuzey Amerika	Kanada	Quest Rare Minerals Ltd.	20	1.44	37
Browns Range	Okyanusya	Avustralya	Northern Minerals Limited	6.5	0.74	53
Hastings	Okyanusya	Avustralya	Hastings Rare Metals Limited	36.2	0.21	51
Nolans Bore	Okyanusya	Avustralya	Arafura Resources Ltd.z	47.2	2.62	28

Kaynak: Erecon, TMR'den alınan verilere dayanmaktadır. Tablo, Avrupa'da en kapsamlı şekilde araştırılan projeleri, dünyanın geri kalanında en kapsamlı şekilde araştırılan projelerle karşılaştırmalı olarak göstermektedir.

Şekil 18: Diğer Bölgelerdeki Gelişmiş Projelere Kıyasla Avrupa'daki en Gelişmiş NTE Arama Projeleri

6.3.1 Türkiye'de Planlar

Rüzgâr türbinleri, küresel yenilenebilir enerji inşasının temel yapı taşlarından biridir ve türbinlerde kullanılan kalıcı mıknatıslar, türbinlerin verimli bir şekilde çalışabilmesi için yeterli miktarda nadir toprak elementine (NTE) ihtiyaç duymaktadır. Türkiye'nin kurulu güç kapasitesi arttıkça, NTE'lere olan talebin de paralel olarak artması beklenmektedir. Bu nedenle, bu artan talebi doğru bir şekilde karşılayabilmek adına mevcut durumu ve gelecek hedeflerini titizlikle analiz etmek gerekmektedir.

Türkiye pazarında hem doğrudan tahrikli hem de dişli kutulu tahrikli rüzgâr türbinleri talep görmektedir. Özellikle doğrudan tahrikli rüzgâr türbinlerinin popüleritesi gün geçtikçe artmaktadır. Doğrudan tahrikli türbinlerde kullanılan kalıcı mıknatıslar, NTE'ler sayesinde daha yüksek verimlilikle çalışmakta ve daha az bakım gerektirmektedir. Bu tür teknolojiye olan talebin artması, Türkiye'nin enerji dönüşümünde kritik bir rol oynamaktadır.

Türkiye'de NTE'lerin yerli üretiminin artırılması, ülkenin enerji güvenliğini güçlendirecek ve dışa olan bağımlılığı azaltacaktır. Yerli üretimle birlikte Türkiye, yalnızca iç talebi karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda nadir toprak elementlerini ihracat yapabilecek kapasiteye de ulaşmayı hedeflemektedir. Bu stratejik adım, Türkiye'yi küresel NTE pazarında daha rekabetçi bir konuma getirebilir ve aynı zamanda enerji dönüşüm projelerine büyük katkı sağlayabilir.

Türkiye'nin bu alandaki gelecekteki planları, NTE'lerin çıkarılması, işlenmesi ve teknolojiye entegre edilmesiyle hem yerel hem de uluslararası pazarın ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde şekillendirilmektedir.

Tablo 30: NTE ile ilgili teknik ve detaylı çalışmaların yapıldığı önemli organizasyonlar

Organizasyon Adı	Tarihi	Yapıldığı Yer	Organizatör
Toryum ve nadir toprak elementlerinin ayrılması çalıştay	10-11.05.2018	Kuşadası/AYDIN	Ege Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü
Nadir toprak elementler ve rekrakter grubu metaller çalışma grubu	07.09.2018	ANKARA	Savunma Sanayi Başkanlığı
1.Nadir toprak elementleri çalıştay	11-12.06.2019	Kırka/ESKİŞEHİR	Eti Maden A.Ş.
Nadir toprak elementleri çalıştay	20-21.06.2019	TUNCELİ	MUNTEAM

Kaynak: Bakanlığımız çalışmaları

Şekil 19: NTE ile İlgili Teknik ve Detayları Çalışmaların Yapıldığı Organizasyonlar

Kamu kurumları ve üniversitelerin öncülüğünde yürütülen çalışmalar son yıllarda ivme kazanmıştır. Özellikle rüzgâr enerjisi ve Nadir Toprak Elementleri'nin (NTE) kullanımında, Türkiye'nin enerji stratejisinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu bağlamda, Türkiye'de rüzgâr enerjisi ve NTE'lerin kullanımında kayda değer bir büyümeyi hedefleyen önemli hükümet ve özel sektör yatırımları ve programları şunlardır:

1. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yatırımları: Türkiye'nin enerji dönüşüm hedeflerine ulaşmak adına bakanlık, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmak ve NTE'lerin yerli üretimini teşvik etmek için çeşitli teşvik

programları başlatmıştır. Bu yatırımlar, Türkiye'nin enerji güvenliğini artırmayı ve dışa bağımlılığı azaltmayı amaçlamaktadır.

2. TÜBİTAK Destekli Projeler: TÜBİTAK, yenilenebilir enerji ve nadir toprak elementleri üzerine yürütülen araştırma ve geliştirme projelerine mali destek sağlamaktadır. Üniversitelerle iş birliği içinde gerçekleştirilen bu projeler, enerji teknolojilerinde inovasyonu teşvik etmeyi ve yerli üretim kapasitesini artırmayı hedeflemektedir.

3. Yerli Üretim Teşvik Programları: Türkiye, NTE bazlı teknolojilerin geliştirilmesi ve yerli üretim kapasitelerinin artırılması için yerli firmaları teşvik etmektedir. Bu programlar, özellikle rüzgâr türbinlerinde kullanılan kalıcı mıknatısların yerli üretimi üzerine yoğunlaşmaktadır.

4. Eti Maden İşletmeleri'nin Beylikova Projesi: Türkiye'deki en büyük NTE rezervlerinden biri olan Eskişehir Beylikova sahasında yürütülen bu proje, Türkiye'nin NTE çıkarma ve işleme kapasitesini artırmaya yönelik önemli bir adım olarak kabul edilmektedir. Proje, Türkiye'nin NTE üretiminde önemli bir oyuncu olmasını sağlamayı hedeflemektedir.

5. Üniversite-Sanayi İş Birliği: Üniversiteler, enerji ve nadir toprak elementleri alanında araştırma ve geliştirme faaliyetlerini yürütmekte, özel sektörle iş birliği yaparak yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bu iş birlikleri, Türkiye'nin enerji sektörü için kritik teknolojilerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

6.Yeşil Mutabakat ve Uluslararası İş Birlikleri: Türkiye, Avrupa Yeşil Mutabakatı ve uluslararası iklim anlaşmaları çerçevesinde yenilenebilir enerji ve NTE kullanımı konusunda çeşitli iş birlikleri yapmaktadır. Bu bağlamda, Türkiye'nin enerji dönüşümü projelerine uluslararası yatırım ve teknoloji transferi sağlanması planlanmaktadır.

Bu yatırımlar ve programlar, Türkiye'nin 2030 ve 2053 net-sıfır emisyon hedeflerine ulaşmasını desteklemekle kalmayıp, aynı zamanda NTE'lerin stratejik önemi ve enerji sektöründe kullanımının artırılmasına yönelik adımlar atılmasını sağlamaktadır.

6.3.1.1 İşletmede olan NTE rezervi

Beylikova Rezervi: Türkiye'de en önemli nadir toprak elementleri (NTE) rezervlerinden biri olan Beylikova sahası, sahip olduğu stratejik önemiyle dikkat çekmektedir. Rezervin yüzeye yakın olması, çıkarma maliyetlerini düşürmekte ve madencilik faaliyetlerini daha cazip hale getirmektedir. Bu avantajlı faktörler, önümüzdeki yıllarda NTE arama ve madencilik faaliyetlerinin artmasını sağlamaktadır.

2023 yılında Eti Maden Genel Müdürlüğü tarafından Beylikova'da Türkiye'nin ilk pilot ölçekli NTE cevheri işleme tesisi açılmıştır. Bu pilot tesis, yıllık yaklaşık 1.200 ton cevher işleme kapasitesine sahiptir. Ancak, Eti Maden'in planladığı büyük çaplı yatırımlar doğrultusunda bu tesisin daha büyük bir endüstriyel ölçeğe çıkarılması hedeflenmektedir.

Yeni endüstriyel tesisin kapasitesinin yılda 570.000 tona ulaşması planlanmaktadır. Bu kapasite artışıyla birlikte işlenmiş cevherden yaklaşık 72.000 ton barit ve 10.000 ton nadir toprak oksitleri (NTO) elde edilmesi öngörülmektedir. Bu büyüme potansiyeli, Türkiye'nin NTE alanındaki küresel rekabet gücünü artıracak ve ülkenin enerji dönüşümü stratejilerine önemli katkı sağlayacaktır.

Beylikova'daki bu rezerv ve tesis, Türkiye'nin hem iç pazarda NTE ihtiyaçlarını karşılamada hem de ihracat potansiyelini artırmada kritik bir rol oynayacaktır.

7. Sonuç

Nadir Toprak Elementleri (NTE), enerji dönüşümü ve yüksek teknoloji sektörlerinde stratejik bir role sahiptir. Özellikle rüzgâr türbinlerinden elektrikli araçlara, savunma sanayisinden sağlık sektörüne kadar geniş bir kullanım alanı sunan bu elementler, yeşil enerji hedeflerine ulaşmada büyük önem taşır. 2030 yılına kadar NTE'lere olan talebin küresel ölçekte iki katına çıkması beklenmektedir.³¹ Ancak bu talebin artması, NTE tedariğinde yaşanan zorluklar ve küresel arz-talep dengesizliği gibi sorunları da beraberinde getirmektedir.³²

Dünya genelinde NTE üretiminde Çin, %60'ın üzerinde bir paya sahip olarak lider konumdadır.³³ Bu durum, tedarik zincirindeki jeopolitik riskleri artırmakta ve NTE fiyatlarında büyük dalgalanmalara yol açmaktadır. 2020-2021 yıllarında NTE fiyatlarındaki artışlar ve 2023'te gözlemlenen düşüşler, piyasanın ne kadar hassas olduğunu göstermektedir.³⁴ Özellikle ağır NTE'ler (disprosyum, terbiyum) gibi stratejik öneme sahip elementlerin arzında yaşanabilecek sıkıntılar, enerji projelerini riske atabilir.³⁵

Türkiye, dünya genelindeki bu stratejik madende rekabet gücünü artırma amacıyla önemli adımlar atmaktadır. Eskişehir Beylikova'da bulunan büyük NTE rezervleri, Türkiye'nin potansiyelini ortaya koymuştur. 2023 yılında açılan pilot tesisle yıllık 1.200 ton cevher işlenmekte olup, bu kapasitenin yıllık 570.000 tona çıkarılması planlanmaktadır.³⁶ Bu kapasite artışı ile Türkiye, enerji güvenliğini sağlamada ve ihracat potansiyelini geliştirmede önemli bir rol üstlenecektir. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan kalıcı mıknatısların üretimi için NTE'lere olan bağımlılığın Türkiye'nin stratejik planları içinde önemli bir yeri vardır.

Türkiye'nin 2030 enerji hedeflerine bakıldığında, yenilenebilir enerji kurumlarının artırılması ve NTE'lerin stratejik olarak değerlendirilmesi gerektiği açıkça görülmektedir. Türkiye, mevcut NTE rezervlerini katma değerli ürünler haline getirmeli ve bu alanlarda teknolojik yatırımları teşvik etmelidir. Özellikle rüzgâr türbinlerinde kullanılan mıknatısların üretimi gibi stratejik alanlar, Türkiye'nin hem enerji güvenliğini artıracak hem de dışa bağımlılığı azaltacaktır.³⁷

Düşük karbon hedeflerine ulaşma yolunda dünya ve Türkiye arasında hala büyük bir "boşluk" bulunmaktadır (McKinsey Raporu). Dünya, Net Sıfır Emisyon (NZO) hedeflerinde ancak %10 seviyesine ulaşabilmiş durumdadır. Bu boşluğu kapatmak için yeni, yüksek performanslı enerji sistemlerine ve NTE çalışmalarına büyük yatırım yapılmalıdır. Türkiye, hem doğrudan tahrikli türbinlerde hem de deniz üstü türbinlerde kalıcı mıknatıslara yatırım yaparak 24.6 GW'lık karasal ve 5 GW'lık deniz üstü rüzgâr kurulum hedeflerini gerçekleştirebilir (Sanayi Bakanlığı).

NTE'lerin işlenerek katma değeri yüksek ürünler haline getirilmesi, Türkiye ekonomisi açısından kritik önemdedir.³⁸ Ülkemizin sadece hammadde ihraç eden değil, aynı zamanda NTE'leri işleyerek nihai ürün haline getiren bir merkez olma hedefi, Fransa ve Japonya gibi örnekler göz önünde bulundurularak stratejik bir hedef olarak belirlenmelidir. Türkiye, dünya NTE ticaretinde daha aktif bir rol oynamak için bu alanda politikalar ve stratejiler geliştirmelidir.³⁹

³⁴Nadir toprak elementlerinin birincil ve ikincil kaynaklardan üretimi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1192199>

³⁵International Union of Pure & Applied Chemistry: <https://iupac.org/project/2018-039-3-600/>

³⁶Uranium, Thorium and Rare Earth Element Deposits of Turkey: https://www.researchgate.net/publication/330516694_Uranium_Thorium_and_Rare_Earth_Element_Deposits_of_Turkey

³⁷World Energy Outlook- IEA- 2023

³⁸The role and challenges of rare earths in the energy transition: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301420723008486>

Gelecekteki talebi karşılamak için dünya genelinde yeni madenlerin açılması ve işleme tesislerinin kurulması önerilmektedir.⁴⁰ Bu doğrultuda Türkiye de NTE'lere yönelik stratejik adımlar atarak hem enerji sektöründe dışa bağımlılığı azaltacak hem de sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlayacaktır. ⁴¹

Uluslararası çekişmelerin odağında sadece milli güvenlik değil, aynı zamanda stratejik maden ve mineral kaynaklarının paylaşımı da yer almaktadır. Bu nedenle, Türkiye, NTE gibi stratejik hammaddelerdeki potansiyelini değerlendirerek bu alanlarda lider ülkeler arasında yer almayı hedeflemelidir.

³⁹History and Future of Rare Earth Elements: <https://www.sciencehistory.org/education/classroom-activities/role-playing-games/case-of-rare-earth-elements/history-future/>

⁴⁰Global Critical Minerals Outlook 2024- IEA

⁴¹NTE Kullanım Alanları, NATEN, TENMAK: <https://naten.tenmak.gov.tr/tr/nte-hakkinda/kullanim-alanlari.html>

⁴²History and Future of Rare Earth Elements: <https://www.sciencehistory.org/education/classroom-activities/role-playing-games/case-of-rare-earth-elements/history-future/>







in turkiyeruzgarenerjisibirligi

f turkiyeruzgarenerjisibirligi

▶ turkiyeruzgarenerjisibirligi

@ turkiyeruzgarenerjisibirligi

X TUREB_TWEA

www.tureb.com.tr

info@tureb.com.tr