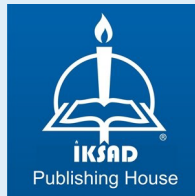
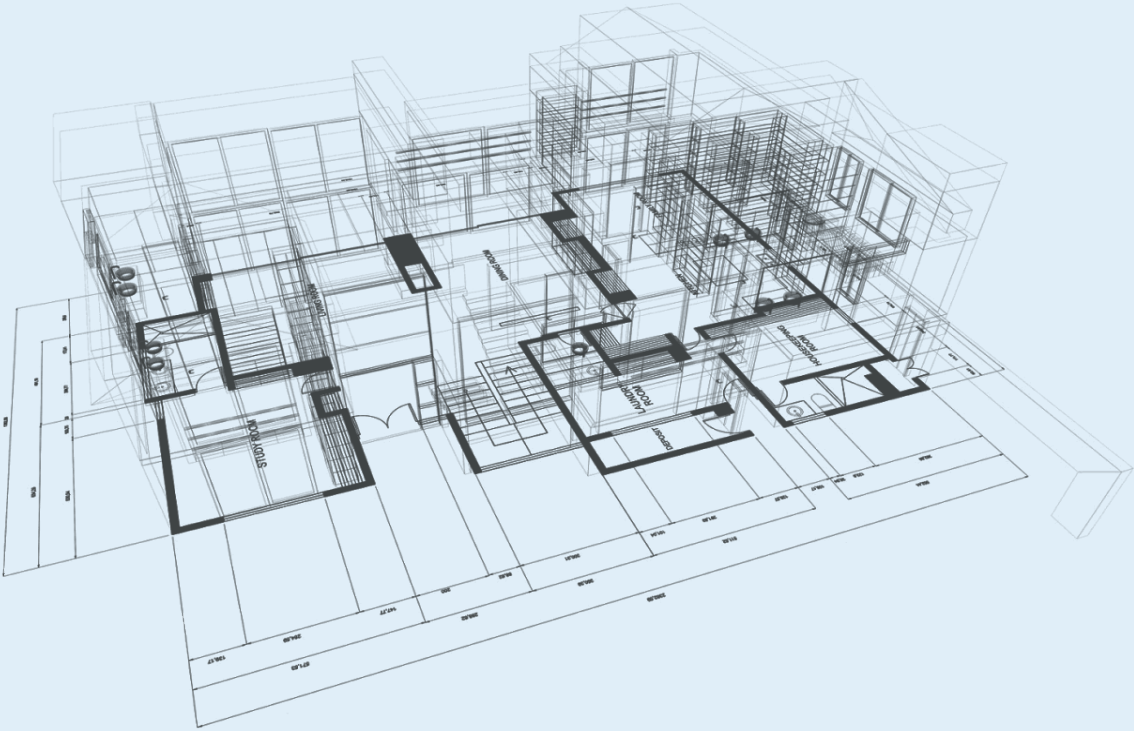


YAPI SEKTÖRÜNDE METALİK MADENLER

EDİTÖR: Dr. Öğr. Üyesi Serhan HANER



YAPI SEKTÖRÜNDE METALİK MADENLER

EDİTÖR

Dr. Öğr. Üyesi Serhan HANER

YAZARLAR

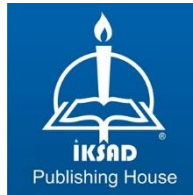
Prof. Dr. Oktay BAYAT

Dr. Öğr. Üyesi Bülent HANER

Dr. Öğr. Üyesi Serhan HANER

Öğr. Gör. Dr. Ebru BAŞPINAR TUNCAY

Öğr. Gör. Dr. Zehra ÇETİNKAYA



Copyright © 2023 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or transmitted in any form or by any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2023©

ISBN: 978-625-367-350-5

Cover Design: İbrahim KAYA

October / 2023

Ankara / Türkiye

Size = 16x24 cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ

Dr. Öğr. Üyesi Serhan HANER 1

BÖLÜM 1 ALÜMİNYUM (BOKSİT)

Öğr. Gör. Dr. Ebru BAŞPINAR TUNCAY 3

BÖLÜM 2 DEMİR

Dr. Öğr. Üyesi Serhan HANER 41

BÖLÜM 3 KROM

Dr. Öğr. Üyesi Bülent HANER 73

BÖLÜM 4 NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ

Öğr. Gör. Dr. Ebru BAŞPINAR TUNCAY 105

BÖLÜM 5 NİKEL

Öğr. Gör. Dr. Zehra ÇETİNKAYA
Prof. Dr. Oktay BAYAT 131

BÖLÜM 6 TUNGSTEN (VOLFRAM)

Dr. Öğr. Üyesi Serhan HANER 157

ÖNSÖZ

Türkiye'nin kalkınma hamlesindeki lokomotif sektörlerden birisi metal sektörüdür. Metal sektörü, inşaat, otomotiv, enerji ve kimya gibi birçok sektörde uygulama alanı bulmaktadır. Sektör, Türkiye İstatistik Kurumu sınıflandırmasına göre demir-çelik ana sanayi ve demir-çelik dışındaki ana metal sanayi alt sektörlerinden oluşmaktadır. Demir-çelik dışındaki ana metal sanayi ise değerli metal, alüminyum, kurşun, çinko, kalay, bakır ve demir dışındaki diğer metallerin üretimini içermektedir. Ana metal sanayi ekonominin genel durumuna paralel hareket eden, özellikle yapı sektörü, otomotiv sektörü ve alt yapı yatırımlarına önemli girdi sağlayan bir sektördür. Ülkemiz son dönemde paslanmaz çelik, nadir toprak elementleri, nikel, çinko ve kurşun yatırımlarında bulunmuştur. Bu sektörlerle yapılan yatırımların yanı sıra, demir çelik ürün gamında daha nitelikli ve katma değeri yüksek ürünlere yönelimin sağlanması ve belirli bir potansiyele sahip ancak işletilmeyen metalik madenlerin ekonomiye kazandırılması sayesinde ülkemizin dış ticaret açığının tamamen kapatılacağı değerlendirilmektedir.

Bu kitapta, yapı sektöründe kullanılan bazı metalik madenler, özellikleri, uygulama alanları, dünyadaki ve ülkemizdeki durumu gibi temel konular kapsamında incelenmiştir. Altı bölümden oluşan bu kitabın hazırlanmasında gösterilen titizliğe rağmen, olabilecek hatalarla ilgili uyarıları ve eleştirileri beklediğimizi belirtmek isteriz. Bu önemli eserin hazırlanmasında emeği geçenlere teşekkür eder, kitabın okuyucularına faydalı olmasını dileriz.

Dr. Öğr. Üyesi Serhan HANER

BÖLÜM 1

ALÜMİNYUM (BOKSİT)

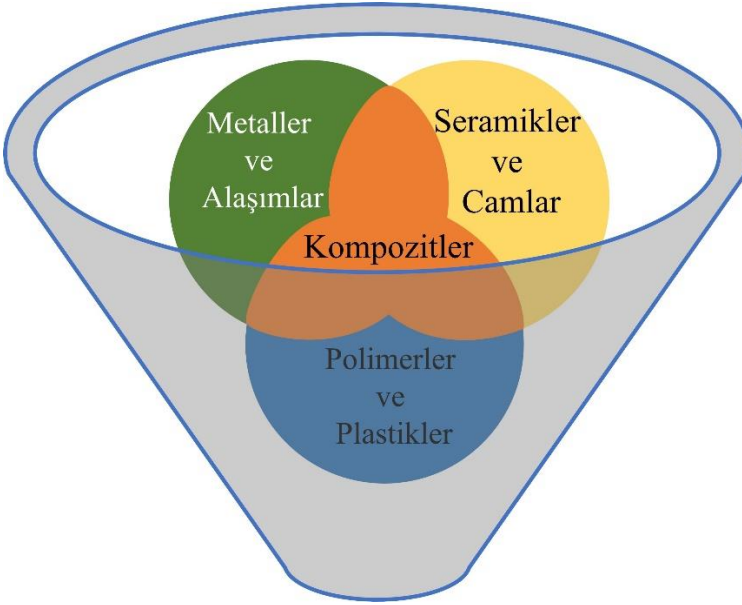
Öğr. Gör. Dr. Ebru BAŞPINAR TUNCAY¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10034876>

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye. ebrubaspinar@sdu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-9416-9576

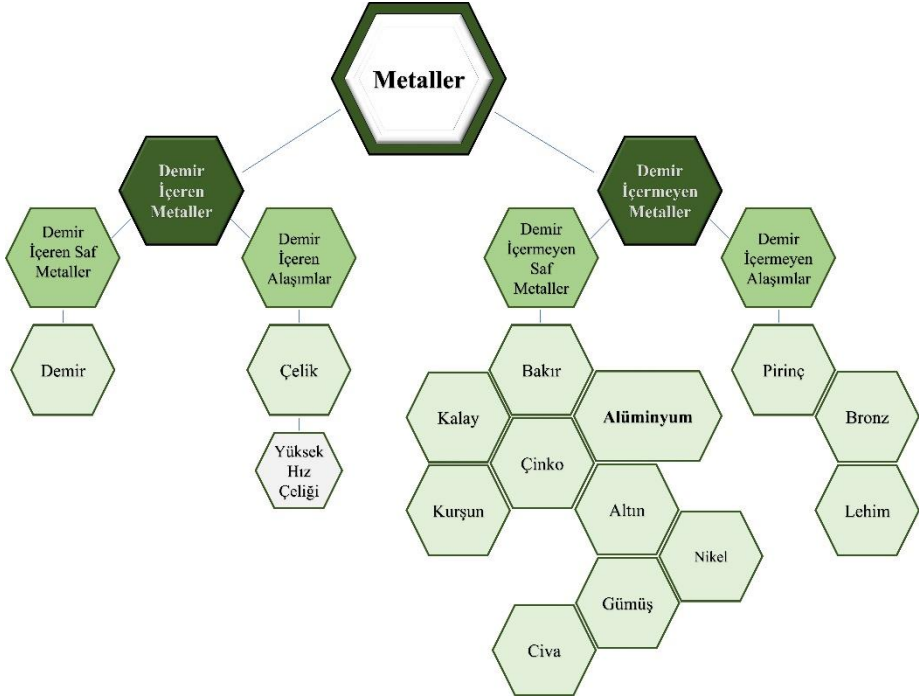
GİRİŞ

Günümüzde, ülkelerin ekonomik kalkınmasına ve istihdama destek olan sektörlerin başında yapı sektörü gelmektedir. Yapı sektörü; toplumların yaşam alanlarının gereksinimlerine göre her türlü yapının (bina, altyapı, baraj vb.) inşa edilmesini sağlayan iş kolları bütünü olarak tanımlanabilir. İhtiyaç ve beklentileri karşılayan, iyi tasarlanmış, uygunluk onayı almış ve sürdürülebilir yapılar inşa etmek için yüksek performanslı mühendislik malzemeleri kullanılmaktadır. Mühendislik malzemeleri mekanik davranışları ve diğer özelliklerine göre seramikler, metaller, polimerler ve kompozitler olmak üzere 4'e ayrılmaktadır (Almadhoni ve Khan, 2015; Huda, 2022). Şekil 1'de sınıflandırılmış mühendislik malzemeleri görülmektedir.



Şekil 1: Mühendislik malzemelerinin sınıflandırması

Metaller, demir içeren metaller ve demir içermeyen metaller olarak 2'ye ayrılır (Şekil 2). Bunlardan demir içermeyen metaller, mıknatıs tarafından çekilmez ve neme maruz kaldıklarında paslanmazlar. Çeşitli imalat ve gerekli ekipman ile eritilerek dökümü yapılan bu metaller işlenebilir ve şekillendirilebilirler. Diğer metal veya ametallerle homojen karışımlarında alaşımları oluşturarak, kullanılabilirlik açısından daha güçlü ve dayanıklı hale gelirler. Şekil 2'de görüldüğü gibi demir içermeyen metaller de demir içermeyen saf metaller ve demir içermeyen alaşımlar olarak ikiye ayrılır. Bakır (Cu), kalay (Sn), çinko (Zn), kurşun (Pb), alüminyum (Al), nikel (Ni), altın (Au), gümüş (Ag) ve civa (Hg) demir içermeyen saf metallerdir. Bununla birlikte demir içermeyen alaşımlar ise pirinç (bakır + çinko alaşımı), bronz (bakır + kalay alaşımı) ve lehimdir (kurşun + kalay alaşımı).



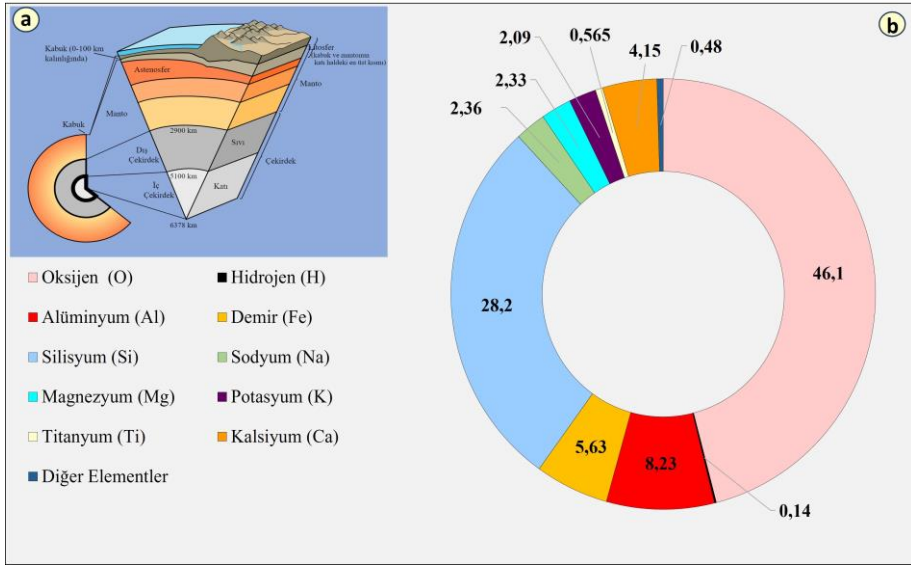
Şekil 2: Metallerin sınıflandırılması

Çalışmanın bu bölümde demir içermeyen saf metaller sınıfında yer alan alüminyumun tarihçesi, özellikleri, bulunuşu, dünya ölçeğinde üretim ve tüketimi konularına değinilmiştir.

1. ALÜMİNYUMUN TARİHÇESİ VE ÖZELLİKLERİ

Ülke ekonomilerinin gelişmesinde önemli konuma sahip olan, 120 yılı aşkın bir süredir ticari olarak üretilen ve endüstriyel yapılarda demirden sonra en çok kullanılan ikinci metal alüminyumdur (Schwarz, 2004; Recalde ve ark., 2008). Ayrıca yeryuvarının en dış kısmında bulunan yerkabuğunu ve mantonun üst kısmını içine alan litosfer, jeokimyasal bakımından iki katmana ayrılır. Yerkabuğunun kıtalarda kalın, okyanus tabanında ince olan, silisik bileşimli üst katmanında alüminyum, bolluk bakımından oksijen (O) ve silisyumdan (Si) sonra üçüncü elementtir (Wedepohl, 1995). Alüminyum ve silisyum elementlerinin bolluğundan dolayı bu katman Sial olarak adlandırılır.

Sial katmanının altında silisyum-magnezyum bileşimli daha mafik olan Sima katmanı bulunur (Parker, 1967). Yeryuvarının katmanları ve yerkabuğundaki elementlerin bolluk miktarları (%) cinsinden Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: a) Yerkabuğu ve yerin iç yapısının gösterimi (Wikimedia, 2016) b) yerkabuğunda bulunan elementlerin bolluk miktarları (%) (Mason, 1952; Fleischer, 1953)

Yerkabuğunda %8.23 oranında bulunan alüminyum elementi henüz keşfedilmemişken, alüminyum esaslı çift tuz grubu bileşiği olan şapın, antik çağlardan beri tıp alanından (kan durdurucu ve damar büzücü), savunma sanayisi alanına kadar birçok alanda kullanıldığı bilinmektedir. 19. yüzyılın başından itibaren elektrik alanındaki hızlı gelişmeler ve kimyagerlerin özverili çalışmalarıyla alüminyum keşfedilmiş ve 1854'ten 1888'e kadar nadir, değerli ve pahalı mücevherat olmaktan çıkartılıp, hemen hemen her alanda kullanılmak üzere endüstriye kazandırılmıştır (Runge, 2018; Reverdy ve Potocnik, 2020). Alüminyumun keşfinden endüstriye kazandırılmasına kadar olan tarihsel yolculuğu Tablo 1'de verilmiştir.

Alüminyum gümüş rengi veya gümüşümsü gri renkli, element simgesi Al, periyodik cetvelde 3A grubunda yer alır, atom numarası ise 13'tür ve +3 değerliklidir. Yüzey merkezli kübik sistemde kristallenmiş olup hem asitlerle hem de kuvvetli bazlarla tepkime veren bir elementtir (Şekil 4). Doğada serbest element olarak bulunmaz, genellikle silislerle ve oksitlerle bileşik yapar.

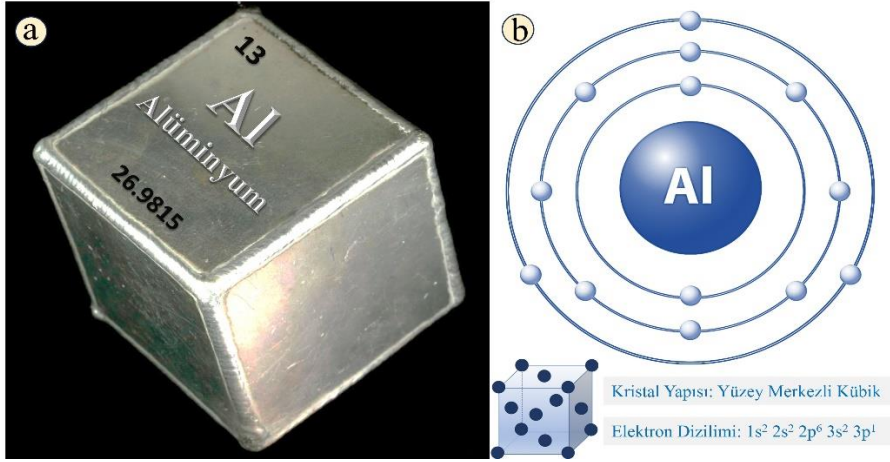
Katı haldeki yoğunluğu yaklaşık 2.70 g/cm^3 , sıvı haldeki yoğunluğu ise 2.375 g/cm^3 'dür. Katı haldeki yoğunluğu demirin katı haldeki yoğunluğu (7.86 g/cm^3) ve bakırın katı haldeki yoğunluğu (8.93 gr/cm^3) ile karşılaştırıldığında demire ve bakıra göre alüminyum yaklaşık 3.5 kat daha hafiftir. Alüminyum metalinin erime noktası 660.32°C ve kaynama noktası 2519°C 'dir. Isı ve elektriği iyi iletme, ısı gibi ışığı yansıtma özelliğine sahiptir (Selwyn, 2019). Yumuşak olduğundan dolayı işlenebilir özelliktedir. Ayrıca

yük altında kırılmadan ya da kopmadan şekil değiştirebilir (sünek) veya şekillendirilebilir. Ancak lehimleme ve kaynak yapmak zordur. 0.01 mm'nin altına kadar inceltildiğinde geçirimsizlik özelliğini korur.

Tablo 1: Alüminyumun tarihsel yolculuğu. (Runge, 2018; Reverdy ve Potocnik, 2020; Aluminiumleader, 2023)

Bilim Adamı	Yıl	Gelişmeler	
Sir Humphrey Davy	1807	Bilinmeyen bir metalin tuzu olduğunu belirterek alüminyum adını Latince 'alümen' olarak adlandırılan şaptan dolayı ismini vermiştir. Alüminadan (alüminyum oksit) elektrolitik indirgeme yoluyla üretilbileceğini teorik olarak bulmuştur.	
Jeolog Pierre Berthier	1821	Alüminyum cevherinin keşfi. Fransa'daki Les Baux bölgesindeki kırmızımsı kil yataklarını keşfetti. Bölgenin isminden esinlenerek bulunan kayalara boksit adı verilmiştir.	
Hans Christian Ørsted	1825	Alüminyum saf olmayan formda, deneylerde kullanılan elementlerle bir alüminyum alaşım üretmiş olup alüminyum bulan ilk kişi olarak adı geçer.	
Friedrich Wöhler	1827	Susuz alüminyum klorürü potasyum ile karıştırarak ayırtmıştır.	
Henri Saint-Claire Deville	1846	Wöhler'in metodunu, daha pahalı olan potasyum yerine, sodyum kullanarak geliştirmiştir. Böylelikle kimyasal alüminyum elde edilmesini endüstriyel uygulamaya aktarmayı başarmıştır.	
Charles Martin Hall	1886	Elektrolitik bir işleme alüminyumun cevherden elde edilmesini sağlayan teknik bir yöntem geliştirmiştir.	Aynı zamanda geliştirilen bu yönteme iki bilim adamının adı verilmiştir.
Fransız Paul Héroult		Avrupa'da aynı yöntemi geliştirmiştir.	
Karl Joseph Bayer	1889	Boksiti, alkali çözeltiye ekledi ve kapalı bir kaptan ısıtarak boksitin tamamı olmasa da çoğunluğunun çözüldüğünü ve alüminyumun tamamının alkali çözelti içerisinde olduğunu analiz etmiştir.	

Saf alüminyumun yüzeyinde oluşturduğu doğal oksit tabakası sayesinde korozyona (metal veya alaşım yüzeyi ile çevrenin elektrokimyasal tepkimesinden oluşan bozunma) karşı oldukça dirençlidir. Alaşımlarda kullanılan diğer elementler korozyon direncini düşürür. Kokusuz ve toksik içermeyen metallere dendir (Boaventura ve Dorea, 2003; Starke ve Rashed, 2017). Belirtilen bu özellikler, alüminyumun kullanıldığı endüstriyel ve teknolojik ürünlerde avantajlar sağlar.



2. ÜRETİM

Alüminyum, Royal Society of Chemistry'in ilk başkanı R.W. Hofman'ın fikir babası olduğu ve 1998 yılında Çin'deki bilim adamları tarafından önerilen üretim, tüketim ve geri dönüşüm süreçlerinin yeniden modellendiği döngüsel ekonominin ana malzemelerinden bir tanesidir (Medvecká ve ark., 2020; Lancaster, 2020; Liu ve ark., 2009).

Alüminyum çoğunlukla iki şekilde üretilmektedir. Birincisi, madencilik yöntemleriyle çıkartılan alüminyum oksit içeriği yüksek kayalardan ekstraktif metalurji yöntemler yardımıyla birincil alüminyum üretilmesidir. İkincisi ise alüminyum içeren ürünlerin kullanım ömürlerinin dolmasıyla birlikte, alüminyumun çeşitli yöntemlerle geri kazanım sonucunda elde edilen hurda alüminyumun işlenip, üretime geri kazandırılmasıdır.

2.1. Boksitten Biricil Alüminyum Üretimi

Alüminyum talebindeki küresel artış, düşük kaliteli cevherlerden alüminyum üretmek için alternatif teknolojiler geliştirmeye olan ilgi artsa da, birçok ülkede, başta killer olmak üzere doğal olarak bulunan çeşitli boksit dışı kaynaklardan alüminyumun çıkarılması konusunda yoğun araştırma ve mühendislik çalışmaları yapılsa da boksit, alüminyum üretimi için kullanılan birincil cevherdir (Al-Ajeel ve Al-Sindy, 2006; Al-Zahrani ve Abdul-Majid, 2009; Olaremu, 2015; Kyriakogona ve ark., 2017; Banerjee ve ark., 2023). Ayrıca Avrupa Birliği 2020 yılından itibaren kritik hammaddeler listesine de dahil edilmiştir (Blengini ve ark., 2020).

Boksit dışında diğer alüminyum ekstraksiyonu için en iyi potansiyele sahip kayalar; alünit, yüksek alümina killer (özellikle kaolinit, halloysit, dikit ve nakrit minerallerinden oluşan kaolin grubu), alüminli mağmatik kayalar (anortozit, nefelin siyenit, fonolit ve lösit içeren volkanik kayalar), daha az

potansiyele sahip olanlar, dawsonit içeren kayaçlar, alüminli fosfat kayaçları (kalsiyum fosfatın meteorik sularla yıkanmasının sonucu), saprolit (kimyasal ve mineral bileşimi bakımından yüksek alümina kiline benzer ve bazen, kaolinitin yerini alan gibsit minerali içerebilir), alüminli metamorfik kayaçlar (kiyanit, illimanit, andalusit, topaz veya dumortierit), alüminli şeyl (genellikle, bir miktar kuvars ve illit, kaolinit ve (veya) simektit kil mineralleri içerir), alüminli kömür atığı (kömür yıkama sırasında çıkarılan kıltaşı, şeyl ve kömürün üzerindeki şeyl veya arduvaz) ve kömür yakan bir elektrik santralinin yakma sisteminden toplanan uçucu küldür (Hosterman ve ark., 1990).

Bir kayaç türü olan boksitin esas bileşimini jipsit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), böhmit ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), diaspor ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) mineralleri oluştururken, hidrargilit ($\text{Al}(\text{OH})_3$), ve alümojel ($\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) mineralleri de bulunmaktadır. Tali mineraller ise limonit ($\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), götit ($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$), lepidokrozit ($\text{FeO} \cdot \text{OH}$), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), kaolinit ($\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$), opal ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), kalsedon (SiO_2), yer yer kırıntılı halde rutil (TiO_2), anataz (TiO_2) gibi mineraller de bulunur (Öztunalı, 1973; Gümüş, 1999). Alüminyum beyaz renklidir. Fakat kırmızı veya sarı bir renk çeşitliliğini demiroksit içeriği belirlemektedir. Boksitler, masif, pisolitik, oolitik, breşik, nodüler, botryoidal, hücreli, levhamsı, vermiküler veya toprağımsı yapıda bulunabilir (Patterson, 1967; Dodoo-Arhin ve ark., 2017). Şekil 5'te boksit kayaçları görülmektedir.



Şekil 5: a, b) Pisolitik yapıda boksit, c) Masif yapıda boksit

Boksit, alüminosilikat kayaçları üzerindeki lateritik boksitler ve karbonatik kayaçlar üzerindeki karstik boksitler olmak üzere alttaki ana kaya litolojisine (türemiş oldukları yer) göre iki ana kategoriye ayrılır (Bardossy ve Combes, 1995; Bárdossy, 1982; Ahmadnejad ve ark., 2017). Bu iki ana boksit türünün farklı mineral bileşimleri, işlenme şekillerini etkilemiştir (Tablo 2). Genel olarak, lateritik boksitlerin işlenmesi karst boksitlerinden daha kolaydır. Karst boksitleri büyük ölçüde Doğu Avrupa ve Kuzey Asya'da bulunur (Smith, 2009).

Tablo 2: Lateritik ve karstik boksitler arasındaki yaklaşık bileşim farklılıkları. (Smith, 2009)

Oksit	Lateritik	Karstik
Al ₂ O ₃	Gibbsit, boehmit	Böhmit, diaspor
SiO ₂	Kaolinit, kuvars	Kaolinit, kuvars, şamozit, illit
Fe ₂ O ₃	Götit, hematit	Hematit, götit, maghemit, manyetit
TiO ₂	Anataz, rutil	Anataz, rutil, ilmenit
CaO	Kalsit, apatit, Krandalit	Kalsit, apatit, krandalit

Güncel oluşuklar olan lateritik boksitler; silis ve demirce fakir, alüminyumca zengin magmatik veya metamorfik kayalar üzerinde (granit, nefelinli-siyenit, bazalt, dolerit, gnays ve şist gibi feldspat veya feldspatoid içeren) gelişmişlerdir. Yerinde lateritleşme ile oluşuklarından, kapsamını ve derecesini belirlemede, ana kaya bileşimi, iklim, topografya, drenaj, yeraltı suyu kimyası ve hareketi, su tablasının konumu, mikrobiyal aktivite ve hava koşullarının etkilerinin süresi önemli faktörler olduğu gibi, lateritik boksitlerin, dokularının ve bileşimlerinin alttaki kaynak kayalarla doğrudan ilişkili olabileceği düşünülmektedir (Bárdossy ve Aleva, 1990; Grubb, 1963; Price ve ark., 1997; Horbe ve da Costa, 1999; Mutakyahwa ve ark., 2003). Ekvatorial iklimlerde oluşan lateritik boksitler, dünyanın işletilebilir boksit rezervlerinin yaklaşık %90'ını oluşturur (Freyssinet ve ark., 2005; Ling ve ark., 2017).

Gu ve ark., (2013), Kuzey Guizhou Eyaleti, Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bölgesindeki cevher oluşum sürecini ve jeokimyasını ortaya koymaya çalışmışlardır. Üst katman gri ve kahverengi-gri renkli olup boksit ve boksitik kilden (UB), orta katman sarı-kahverengi renkli esas olarak boksitten ve az miktarda boksitik kil (MB) içerirken, alt katman kiremit kırmızısı renkli laterit ve ferritik boksitten (LB) oluşan bu yatakta başlıca mineral bileşenler diaspor, boehmit, kaolinit, simektit ve hematit olup, az miktarda da gibsit, illit, goetit, pirit, anataz, zirkon, kuvars ve feldspatır.

Bu çalışmada, lateritik boksitlerin kimyasal bileşimine örnek olarak Tablo 3'de Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bölgesindeki boksit yataklarının ana oksit ve element içeriği verilmiştir.

Karstik boksitler; boksit yataklarının ~%14'ünü temsil etmektedir. Kalkerler, killi kalkerler veya dolomitler üzerinde bulunurlar. Karstik tipteki boksitler otokton, yarı-otokton ve allokton alt tiplere ayrılmıştır ve ayrışma koşullarından kaynaklanan farklı bir tipik mineralojik bileşime sahiptirler (Bárdossy 1982; Mameli ve ark., 2007). Genellikle, karbonatlı kayalardaki alüminyum tenörü düşüktür. Karbonatlı kayaların erimesiyle geriye kil mineralleri kalır. Özellikle Akdeniz Bölgesi ülkelerinde kalkerli arazilerdeki dolinlerin içinde Terra Rossa adı verilen killer gözlenmektedir. Daha sonra Ph 5 ile 9 değerleri arasında silis çözülerek uzaklaşır ve ortamda alüminyum elementi kalır. Böylelikle otokton boksitler oluşur. Karbonatlı kayaların

erimesiyle artakalan killer sularla veya rüzgârlarla taşınarak çukurlarda veya daha alçak kotlarda birikirler. Daha sonra silisin ortamdan uzaklaşmasıyla yarı otokton boksitler oluşur. Silikatlı kayaların üzerindeki lateritler aşınmaya uğrarlar, suların yardımıyla taşınan malzeme çökerek allokton boksitler oluşur. Taşınma kırıntılı ise alüvyal boksit eriyik halinde ise sedimanter boksit oluşur. Boksitleşme, bazen çökmeden sonra da gerçekleşebilir. Karstik olaylar yataklanma şekli üzerinde etken rol oynadığından boksitler genellikle katmansız, yığın ve cep şeklinde (otokton veya yarı otokton), yer yerde katman (genellikle allokton) şeklinde yataklanmışlardır.

Tablo 3: Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bölgesindeki boksit yataklarını temsil eden örneklerin ana (ağırlıkça % olarak), eser ve nadir toprak elementlerinin (ppm olarak) en düşük, en yüksek ve ortalama değerleri. (Gu ve ark., 2013)

	Boksit ve Boksitik Kil (UB)			Boksit ve Az Miktarda Boksitik Kil (MB)			Laterit ve Ferritik Boksit (LB)		
	11 örnek			13 örnek			10 örnek		
	Min.	Mak.	Ort.	Min.	Mak.	Ort.	Min.	Mak.	Ort.
SiO ₂ (%)	1.90	43.96	16.71	1.60	47.30	26.95	23.70	43.85	37.47
Al ₂ O ₃ (%)	36.56	76.35	60.75	34.20	71.52	48.58	27.67	53.02	38.01
TiO ₂ (%)	0.57	3.12	2.44	0.64	3.10	1.74	0.38	2.04	0.99
Fe ₂ O ₃ (%)	1.32	7.75	3.64	0.60	26.58	6.33	1.48	21.10	7.70
Na ₂ O (%)	0.08	1.73	0.83	0.06	1.79	0.88	0.32	1.72	0.72
K ₂ O (%)	0.10	4.72	0.97	0.11	2.40	0.61	0.21	4.67	1.66
CaO (%)	0.11	0.44	0.26	0.15	1.06	0.41	0.13	1.59	0.57
MgO (%)	0.06	3.94	1.06	0.30	2.87	1.15	0.29	3.82	1.26
MnO (%)	0.01	0.56	0.06	0.00	0.37	0.05	0.00	0.05	0.02
P ₂ O ₅ (%)	0.06	0.12	0.08	0.04	0.14	0.09	0.04	0.15	0.09
LOI (%)	8.26	15.32	13.03	8.30	15.17	13.14	5.62	13.68	11.42
Rb (ppm)	0.48	190.00	40.43	0.15	209.00	36.46	3.54	224.00	85.83
Ba (ppm)	4.65	369.00	93.37	39.40	873.00	143.44	66.00	613.00	258.82
Th (ppm)	11.00	120.00	36.74	19.80	96.00	49.54	28.50	79.30	45.76
U (ppm)	5.47	23.60	13.02	4.12	16.80	9.15	3.33	17.63	8.58
Ta (ppm)	0.96	4.65	3.57	1.97	4.73	3.24	2.15	5.36	3.26
Nb (ppm)	13.50	63.60	48.31	28.20	59.90	43.05	28.60	63.80	42.56
Sr (ppm)	7.40	72.90	40.87	24.50	184.00	106.65	116.00	669.00	238.00
Y (ppm)	7.69	43.60	19.69	15.90	42.00	28.96	22.90	46.50	34.42
Zr (ppm)	175.00	844.00	557.18	287.00	869.00	546.69	236.00	659.00	432.30
V (ppm)	95.00	430.00	301.73	144.00	418.00	278.00	84.00	344.00	237.20
Cr (ppm)	87.00	539.00	195.09	129.00	520.00	293.62	142.00	393.00	247.10
Ni (ppm)	1.56	69.50	16.18	1.58	121.40	35.32	12.50	161.00	68.05
Ga (ppm)	9.04	116.00	53.23	17.80	106.00	56.05	26.40	87.10	42.74
Hf (ppm)	4.76	23.30	15.01	7.66	22.80	14.88	6.78	18.00	11.82
La (ppm)	0.89	5.44	3.09	5.00	14.20	9.93	12.80	124.00	66.09
Ce (ppm)	2.37	22.10	10.73	15.00	65.10	36.05	68.00	562.00	197.67
Pr (ppm)	0.23	2.06	0.99	1.91	4.06	2.98	3.70	37.40	15.78
Nd (ppm)	1.03	7.49	3.93	6.83	16.30	11.49	10.80	152.00	55.52
Sm (ppm)	0.53	1.93	1.20	1.58	4.39	2.87	2.08	25.00	9.70
Eu (ppm)	0.16	0.61	0.40	0.32	1.34	0.73	0.50	4.16	1.79
Gd (ppm)	0.83	4.11	1.96	1.89	5.21	3.41	2.94	14.10	7.55
Tb (ppm)	0.18	0.94	0.46	0.39	1.07	0.72	0.59	1.81	1.23
Dy (ppm)	1.24	6.68	3.23	2.62	7.08	4.93	4.06	9.23	6.90
Ho (ppm)	0.29	1.58	0.77	0.59	1.65	1.15	0.90	1.91	1.52
Er (ppm)	0.84	4.48	2.19	1.92	5.00	3.40	2.69	5.77	4.52
Tm (ppm)	0.12	0.64	0.33	0.31	0.84	0.53	0.41	1.01	0.70
Yb (ppm)	0.94	4.51	2.38	2.18	6.34	3.78	2.94	8.16	4.99
Lu (ppm)	0.14	0.67	0.35	0.32	0.89	0.55	0.43	1.22	0.74

Min.: En düşük değer, Mak.: En yüksek değer, Ort.: Ortalama, LOI: Ateş Kaybı

Jajarm boksit yatağı, İran'ın kuzeydoğusunda bulunan ve İran'ın büyük boksit yatağıdır. Hem bazik magmatik hem de tortul kayalardan karışık bir kökene sahiptir. Hematit, kaolinit, anatas ve diyaspör mineralleri içeren yatakta boksit dokuları mikrogranüler, oolitik, pizolitik, kolloform ve mikroplastiktir. Jajarm karstik boksitinin bileşimine bakıldığında, jeokimyasal ve mineralojik veriler orijinal bir gibbsitik bileşime işaret etmektedir (Esmaily ve ark., 2010). Bu çalışmada, karstik boksitlerin kimyasal bileşimine örnek olarak Tablo 4'te Jajarm boksit yatağı anaoksite ve element içeriği verilmiştir.

Boksitin yaklaşık %85'i alüminyum üretiminde, %8'i alümina kimyasalları üretiminde ve %7'si aşındırıcılar, refrakterler, alev geciktirici, propantlar ve çimentoda kullanılmaktadır (Plunkert, 2011; Liang ve ark., 2016; Sustainable Bauxite Mining Guidelines, 2022). Küresel olarak üretilen boksit çoğunlukla açık ocaklardan işletilmektedir (Luo ve Soria, 2008; Menzie, ve ark., 2010). Şekil 6'da Türkiye'deki bazı boksit yatakları görülmektedir.



Şekil 6: a, b) Seydişehir (Konya) karstik tip boksit ocağı c) Çarıkaraağaç-Isparta lateritik demirli boksit mostrası d) Yalvaç (Isparta) lateritik tip boksit ocağı

Tablo 4: Jajarm boksit yatağını temsil eden örneklerin ana (ağırlıkça % olarak), eser ve nadir toprak elementlerinin (ppm olarak) en düşük, en yüksek ve ortalama değerleri. (Esmacily ve ark., 2010)

	Boksitik Kil			Kırmızı renkli boksit		
	11 örnek			11 örnek		
	Min.	Mak.	Ort.	Min.	Mak.	Ort.
SiO ₂ (%)	17.8	35.3	27.3	31.9	39.3	35.5
Al ₂ O ₃ (%)	26.5	42.5	34.0	29.5	33.2	31.3
Fe ₂ O ₃ (%)	9.9	34.2	21.6	6.9	18.1	12.5
MnO (%)	0.01	0.05	0.02	0.00	0.31	0.15
MgO (%)	0.09	0.60	0.23	0.12	0.24	0.16
CaO (%)	0.05	0.52	0.20	0.24	1.03	0.67
Na ₂ O (%)	0.03	0.08	0.05	0.04	0.17	0.07
K ₂ O (%)	0.19	1.97	0.69	0.22	1.93	0.81
TiO ₂ (%)	2.6	4.5	3.6	3.5	4.0	3.8
P ₂ O ₅ (%)	0.07	0.19	0.13	0.02	0.08	0.04
LOI (%)	9.2	12.6	11.0	12.1	18.7	14.0
Ba (ppm)	32	173	73	41	925	264
Sr (ppm)	272	946	519	68	237	151
Y (ppm)	21	108	59	14	30	22
Sc (ppm)	31	57	42	26	39	34
Zr (ppm)	417	607	510	507	608	537
Be (ppm)	2	6	5	1	3	2
V (ppm)	350	574	460	402	482	421
Cr (ppm)	96	202	144	151	199	169
Co (ppm)	8	118	36	3	490	130
Ni (ppm)	30	178	114	24	101	46
Cu (ppm)	33	42	37	20	264	145
Zn (ppm)	36	124	64	46	102	74
Ga (ppm)	29	58	42	29	42	35
Ge (ppm)	2	4	3	1	1	1
As (ppm)	12	40	23	67	525	249
Rb (ppm)	4	43	15	5	34	15
Nb (ppm)	93	140	116	105	126	115
Mo (ppm)	2	8	4	4	6	4
Ag (ppm)	0.5	1.2	0.8	0.6	1.1	0.8
In (ppm)	-	-	-	0.2	0.4	0.3
Sn (ppm)	5	6	6	5	6	5
Sb (ppm)	2	9	6	3	9	4
Cs (ppm)	0.7	2.9	1.3	0.5	2.6	1.2
La (ppm)	25	268	150	6	52	19
Ce (ppm)	152	1080	330	39	157	98
Pr (ppm)	7	58	32	2	8	4
Nd (ppm)	26	221	120	7	21	13
Sm (ppm)	5	46	25	2	5	3
Eu (ppm)	1.3	14.5	6.7	0.4	1.5	1.0
Gd (ppm)	4	47	21	2	5	3
Tb (ppm)	0.7	6.3	3.1	0.3	0.8	0.6
Dy (ppm)	3	27	15	2	4	3
Ho (ppm)	0.7	4.4	2.6	0.4	0.8	0.7
Er (ppm)	2	11	8	1	2	2
Tm (ppm)	0.5	1.6	1.2	0.2	0.4	0.3
Yb (ppm)	2	10	7	1	3	2
Lu (ppm)	1	2	1	0	0	0
Hf (ppm)	11	15	13	12	15	13
Ta (ppm)	6	9	7	7	8	7
W (ppm)	10	29	18	4	15	11
Tl (ppm)	0.1	1.8	0.4	0.1	1.2	0.6
Pb (ppm)	11	48	30	18	94	36
Bi (ppm)	2	10	7	2	7	5
Th (ppm)	19	26	22	19	26	23
U (ppm)	7	40	14	8	28	16

Min.: En düşük değer, Mak.: En yüksek değer, Ort.: Ortalama, LOI: Ateş Kaybı

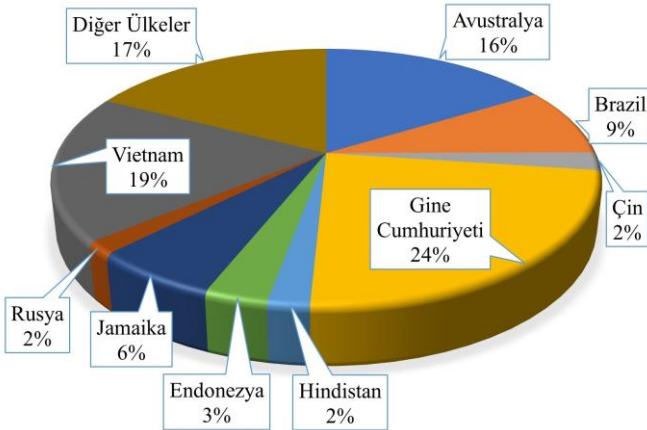
U.S. Geological Survey'in (USGS) 2023 yılı Mineral Emtia Özetlerinde (MCS) küresel olarak boksit kaynaklarının 55 milyar ton ile 75 milyar ton arasında olduğu ve Afrika (%32), Okyanusya (%23), Güney Amerika ve Karayipler (%21), Asya (%18) ve diğer bölgelerde (%6) dağıtıldığı tahmin edilmektedir. Ayrıca 2023 yılı toplam küresel boksit rezervi yaklaşık 31 milyar tondur. Dünya boksit rezervine sahip ülkeler Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5: Dünya boksit rezervleri. (U.S. Geological Survey, 2023)

Ülke	Rezerv (Megaton*)
Gine Cumhuriyeti	7400
Vietnam	5800
Avustralya	5100
Brazil	2700
Jamaika	2000
Endonezya	1000
Çin	710
Hindistan	660
Rusya	500
Diğer Ülkeler	5460

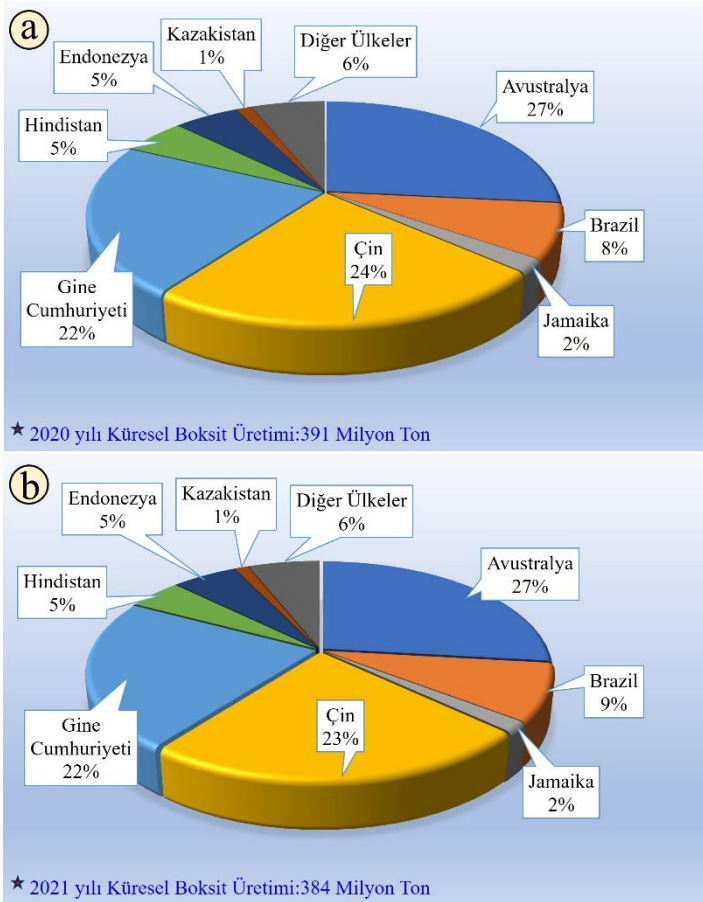
*1 Megaton=1 milyon ton

U.S. Geological Survey (USGS) (2023) Mineral Emtia özetinde belirtilen toplam rezervin %24'ü Gine Cumhuriyeti'nde, %19'u Vietnam'da, %16'sı Avustralya'da, %2'si Çin'de bulunmaktadır (Şekil 7). Diğer ülkeler içerisinde yer alan Amerika Birleşik Devletleri'nin boksit rezervi 200 megatondur.



Şekil 7: Boksit kaynaklarının % olarak küresel dağılımı

U.S. Geological Survey (USGS) (2021) Mineral Emtia özetinde 2020 yılı boksit üretimi yaklaşık 391 milyon ton olduğu belirtilmiştir. Gine Cumhuriyeti boksit üretiminin %22'sini, Avustralya %27'sini gerçekleştirmektedir. Ayrıca üretiminde Hindistan'ın payı %5 iken, Çin'in payı %24'dür (Şekil 8a). U.S. Geological Survey (USGS) (2022) Mineral Emtia Özetinde 2021 yılı boksit üretimi yaklaşık 384 milyon ton olduğu belirtilmiştir. Gine Cumhuriyeti boksit üretiminin %22'sini, Çin ise %23'ünü gerçekleştirmektedir. Ayrıca üretiminde Avustralya'nın payı %27 iken, Şekil 8b'de belirtilen 8 ülke dışındaki ülkelerin üretimdeki payı%17'dir. 2020 ve 2021 yılları U.S. Geological Survey (USGS) verilerinde Amerika Birleşik Devletleri'nin boksit üretimindeki payı bilinmemektedir.



Şekil 8: a) 2020 yılı boksit üretimi (U.S. Geological Survey, 2021), b) 2021 yılı boksit üretimi (U.S. Geological Survey, 2022)

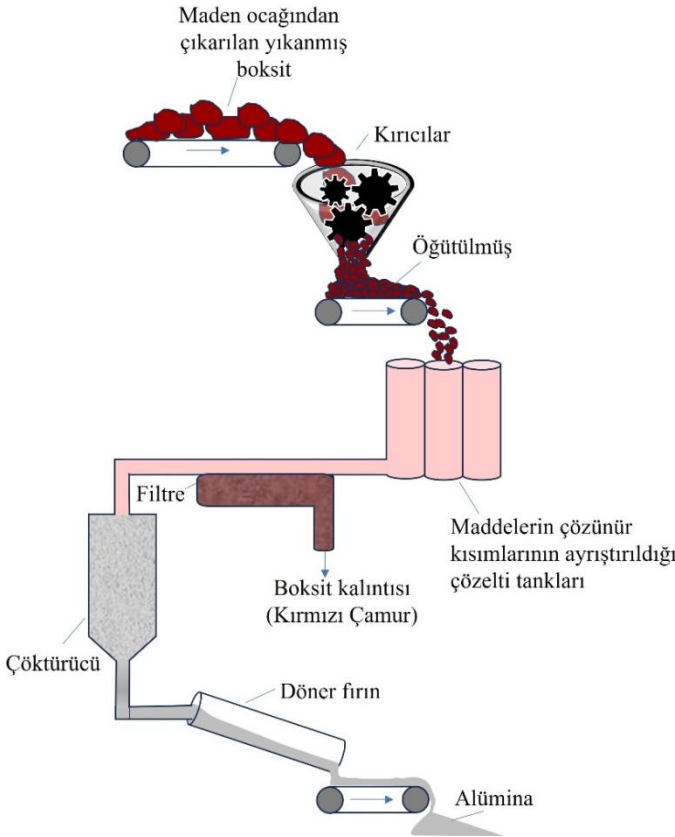
Türkiye, çok geniş boksit imkânlarına sahip bir ülkelerden bir tanesidir. Wippert (1964), Türkiye’de boksitleri, ekonomik önem taşımayan boksitler (Üst Kretase–Eosen), ekonomik önem taşıyan boksitler (Üst Kretase (Türoniyen–Senomaniyen), Diasporitler ve zımpara oluşumları (Permien–Triyas) şeklinde sınıflandırmıştır. Toplam 422 milyon ton boksit rezervi bulunmaktadır. Bunun 63 milyon tonu işletilebilir rezerv şeklindedir. Boksitler, genellikle Toros kuşağının Orta ve batı kesimlerinde yaygın olarak bulunmaktadır. Boksit yatakları; mineral ve Al_2O_3 içeriğine göre gruplandırılmıştır. Bunlar Seydişehir–Akseki Bölgesi, Silifke–Taşucu Bölgesi, Zonguldak–Kokaksu Bölgesi, Yalvaç–Şarkikaraağaç Bölgesi, Payas–İslahiye Bölgesi, Muğla–Milas Bölgesi, Alanya (Maşatdağ) Bölgesi, Bolkardağı Bölgesi, Saimbeyli Bölgesi, Antalya–Elmalı bölgesi (MTA, 1977). Bu 10 bölgeden yüksek tenöre (Al tenörünün %50’den fazla) sahip olan Seydişehir (Konya) ve Akseki (Antalya) yöresinde işletilebilir rezerv yaklaşık 31 milyon tondur (Eroğlu, ve Şahiner, 2018). Antalya–Elmalı bölgesindeki boksitler düşük Al_2O_3 ve yüksek SiO_2 içeriğine sahip olup plaser şeklinde yataklanmıştır. Ayrıca Muğla–Milas Bölgesi, Alanya Bölgesi, Bolkardağı Bölgesi, Saimbeyli Bölgesi boksitler ise diasporit ve zımpara yataklarıdır (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 1977; Bozkır, 2007). Türkiye’deki boksit yatakları ile ilgili en kapsamlı çalışmalardan bir tanesi de Hanilçi, (2019) tarafından yapılmıştır. Hanilçi (2019) çalışmasında (1) Milas-Yatağan (Muğla); (2) Yalvaç-Şarkikaraağaç (Isparta); (3) Seydişehir-Akseki; (4) Alanya; (5) Bolkardağı (Karaman); (6) Tufanbeyli–Saimbeyli–Kadirli; (7) Payas–İslahiye ve (8) Kokaksu (Zonguldak) bölgelerindeki boksit yataklarını jeoloji, mineraloji ve jeokimya açısından değerlendirmiştir. Türkiye’de ekonomik olarak işletilebilen boksit yataklarının çoğunluğu karstik tipte olduğunu, lateritik tip yataklar (örn. Yalvaç–Şarkikaraağaç) kısmen ekonomik olabileceğini vurgulamıştır. Akseki-Seydişehir ve Yalvaç–Şarkikaraağaç bölgelerindeki başlıca cevher minerali boehmit iken, geri kalan boksit bölgelerinde diasporit baskın cevher minerali olduğundan bahsetmiştir.

2.1.1. Bayer ve Hall-Heroult Yöntemleri

Alüminyumun ilk endüstriyel üretimini, Sainte-Claire Deville Fransa’daki üretim tesisinde ortaklarıyla birlikte yapmıştır. Gümüşe benzeyen, hafif ama oldukça pahalı olan metal, süs eşyaları ve lüks eşyaları yapımında kullanılmıştır ve 36 yılda sadece 200 ton üretebilmiştir (1855-1890). 1886’da Paul Héroult ve Charles Hall daha uygun maliyetli bir elektrolitik üretim yöntemi geliştirmiştir. Karl Joseph Bayer, 1889 yılında Rusya’da, boksitteki alüminyumun tamamını işlem sırasında alkali çözeltiye aktarılabilen ucuz, uygulanabilir ve alüminyum için temel hammadde olan alümina (alüminyum oksit) üretim yöntemi icat etmiştir. Böylelikle Paul Héroult, Charles Hall ve Karl Joseph Bayer ‘kil gümüşü’ hikayesini sonlandırarak, günümüz modern dünyasında halen kullanılan alüminyum ticari üretim yöntemlerini

geliştirmişlerdir (Habashi, 1998; Maria ve ark., 2021; Aluminiumleader, 2023).

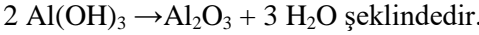
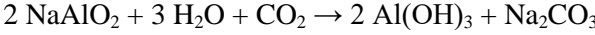
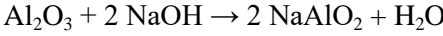
Karl Joseph Bayer tarafından icat edilen Bayer yönteminde dört süreç vardır. Şekil 9'da Bayer yönteminin şematik gösterimi verilmiştir. Öncelikle boksit, yıkanır ve öğütülür, yüksek basınç ve sıcaklıkta (150 ila 200°C) ısıtılarak, bu sürecin ana kimyasalı olan, kostik soda (NaOH) içinde alüminyum içeren mineraller (gibisit, böhmit ve diaspor) çözündürülür yani alüminyum, oksit sodyum alüminata (NaAlO_2) dönüştürülür. İkinci süreçte, demir, alüminyum, silis ve titanyum oksitlerden oluşan ve kırmızı çamur olarak bilinen, çözünmeyen boksit kalıntısı filtrelendir. Üçüncü süreçte, geriye kalan kristalin alüminyum trihidroksit veya hidrat, $\text{Al}(\text{OH})_3$ bakımından aşırı doygun olan çözelti, çöktürücü adı verilen uzun silolara aktarılır. Çöktürücü tankta sıcak çözelti soğumaya başlar ve çok küçük parçacıklar olan alüminyum hidroksit tohumları, daha büyük topaklaşmış kristaller oluşması için eklenir. Tankın dibine yerleşen alüminyum hidroksit süzülür, buharlaştırılır, geriye yoğun alüminyum hidroksit filtre keki elde edilir.



Şekil 9: Bayer yöntemi ile alümina üretiminin şematik gösterimi (Mahinroosta ve ark., 2020)

Son olarak, alüminyum hidroksit kalan kostik sodadan yıkanır ve fazla suyu uzaklaştırmak için kalsine edilir ve yaklaşık 1000°C’de ince beyaz bir toz olarak alümina oluşmuş olur (Whittington ve ark., 1997; Hind ve ark., 1999; Tabereaux, 2010). Üretilen alüminyum oksidin %90’dan fazlası (%95-96) alüminyum üretmek için Hall–Héroult işleminde kullanılır (Menzie ve ark., 2010; Kaußen ve Friedrich, 2016; Brough ve Jouhara, 2020).

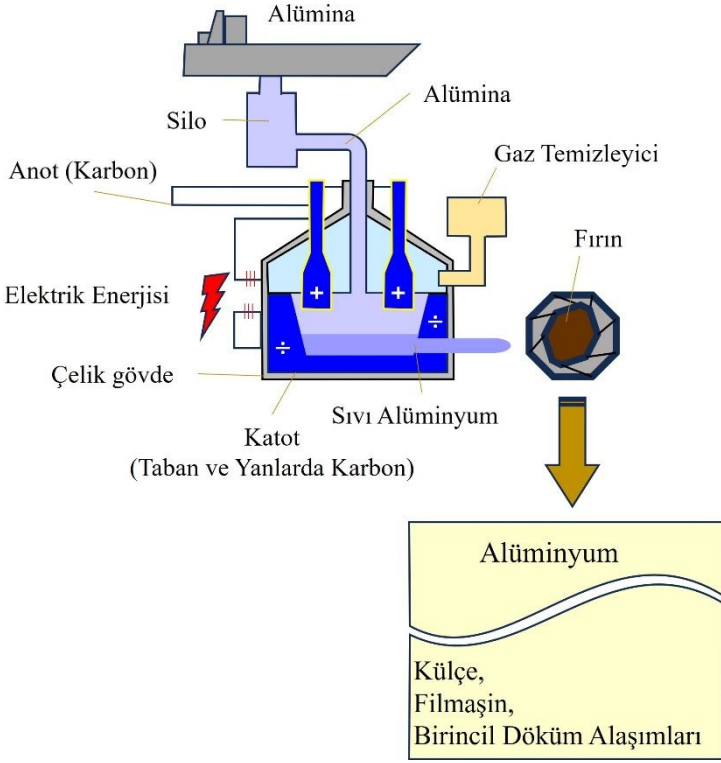
Bayer yönteminin kimyasal süreçleri;



Bayer prosesinin alüminadan sonraki ikinci önemli ürünü kırmızı çamurdur. Oldukça alkali olan kırmızı çamurun jeokimyası, orijinal boksit cevherinin jeokimyasıyla ilişkilidir. Kırmızı çamurda SiO₂ miktarı %3-50, Al₂O₃ miktarı %10-20, Fe₂O₃ miktarı %30-60, Na₂O miktarı %2-10, CaO miktarı %2-8 ve TiO₂ miktarı %25’e kadar bulundurulabilir. Ayrıca su içeriği, bazı kırmızı çamurlarda %50’ye kadar olduğu bilinmektedir (Pontikes, 2005).

Fransa’daki Paul Héroult ve Amerika Birleşik Devletleri’ndeki Charles Hall’un aynı zamanda birbirinden bağımsız geliştirdikleri için bu bilim adamlarının ismi verilen Hall-Héroult yönteminde saflığı %99’un üzerinde olan alüminyum üretilir. Bu yöntem, karbon ve grafit çubuklarla (katot) kaplı çelik bir kap, karbon anotlar, gaz temizleyici kullanılarak alüminanın, alüminyum metale dönüşürdüğü temel yöntemdir (Totten ve MacKenzie, 2003; Mandin ve ark., 2009; Cázares ve Lozano, 2018). Bu yöntemin şematik gösterimi Şekil 10’da verilmiştir.

Karbon ve grafit çubuklarla kaplı çelik bir kap içerisinde bulunan erime noktası 2072°C olan alüminyum oksidin erime noktasını 950 ve 980°C’ye düşmesini sağlamak ve elektriği iletme kabiliyetinin arttırmak için, CaF₂ veya sürecin ana bileşiği Na₃AlF₆ (kriyolit) eklenmektedir. Daha sonra karbon anotlar kullanılarak elektroliz edilmektedir. Bu süreçte, güçlü bir elektrik akımı, alüminyum ve oksijen atomları arasındaki kimyasal bağı kopar, pozitif yüklü alüminyum iyonları katottan elektron alır ve erimiş alüminyumu oluşturur. Oksit iyonları anotta elektron kaybeder ve oksijen moleküllerini oluşturur. Yani katotta alüminyum, anotta oksijen oluşur. Oksijen, karbon dioksit gazı üretmek için karbon anot ile yavaşça reaksiyona girer. Sıvı alüminyum metali kriyolit çözeltisinden yoğun ağır oldukları için dibe çöker, daha sonra dibe çöken sıvı alüminyum, genellikle billet diye adlandırılan alüminyum kütükler şeklinde büyük bloklara aktarılır (Şekil 11).



Şekil 10: Alüminyum üretim sürecinin (Hall-Heroult yöntemi) şematik gösterimi (Kvande ve Drabløs, 2014).



Şekil 11: a) Alüminyum üretim tesisi (Seydişehir-Konya) alüminyum bloklar, b) Alüminyum külçeler, c) Alüminyum kütükler (bilet) d) Alüminyum filmaşın e) Alüminyum folyo (www.alibaba.com)

Alüminyum indirgemede, çoğu üretim tesisinde önceden pişirilmiş karbon anotlar kullanılırken, Rusya’da ise Søderberg anotlar (Anot pişme işlemi, 960°C’de pişme işlemi sırasında olan) kullanılmaktadır.

Katotlar günümüzde tamamen grafitleştirilmiştir (Lorentsen, 2014; Haynes, 2015; Cázares ve Lozano, 2018).

Hall-Heroult yönteminin kimyasal süreçleri;

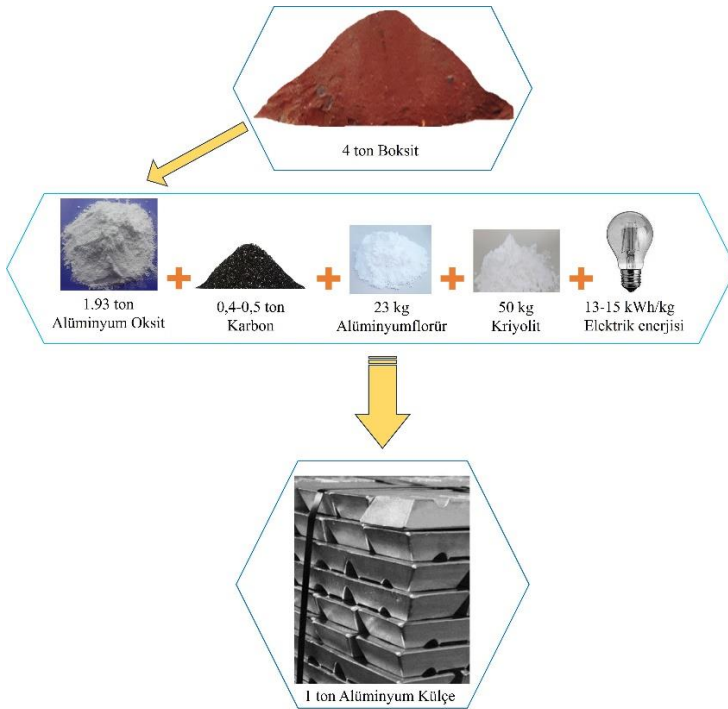
Alümina, kriyolit ile reaksiyona girer: $\text{Al}_2\text{O}_3 + 4\text{AlF}_6 \rightarrow 3 \text{Al}_2\text{OF}_6 + 6\text{F}^-$

Katot: $\text{AlF}_6 + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al} + 6\text{F}^-$

Anot: $2 \text{Al}_2\text{OF}_6 + 12\text{F}^- + \text{C} \rightarrow 4 \text{AlF}_6 + \text{CO}_2 + 4\text{e}^-$

Genel Hücre Reaksiyonu: $\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 4\text{Al} + 3 \text{CO}_2$ şeklindedir.

Hall-Héroult sürecine alternatifler olabilecek yöntemler araştırılmasına rağmen, ekonomik olarak uygulanabilir alternatif yöntem halen mevcut değildir (Lorentsen, 2014). Bayer yöntemi ve Hall-Heroult yöntemi sonunda, alüminyum oksit (alümina, Al_2O_3), tüketimi kimyasal tepkime teorik hesaplamalarda üretilen 1 ton alüminyum başına 1.89 ton’dur. Fakat %100 saf olmayan alüminyum oksit Na_2O , CaO , Fe_2O_3 ve SiO_2 gibi oksitler içerdiğinden dolayı uygulamada 1.93 ton kullanılmaktadır (Kvande ve Drabløs, 2014). Şekil 12’de 1 ton alüminyum üretmek için gerekli hammadde miktarları verilmiştir. Buna göre 4 ton boksitten 1.93 ton alüminyum oksit, 1.93 ton alüminyum oksitten 1 ton alüminyum üretilmektedir (Şekil 12).



Şekil 12: 1 ton alüminyum üretmek için gerekli hammadde miktarları (Kvande ve Drabløs, 2014)

Birincil alüminyum 5 yıllık küresel üretimi Tablo 6’da verilmiştir. 2021 yılının verilerine göre birincil alüminyum küresel üretimi 67000000 ton’dur. Rusya’nın üretimi yaklaşık 4000000 ton iken, Avustralya’nın üretimi yaklaşık 2000000 tondur. Çin küresel üretimin %50’sinden fazlasını karşılamakta olup, bu miktar 2021’de 38.5 milyar tondur.

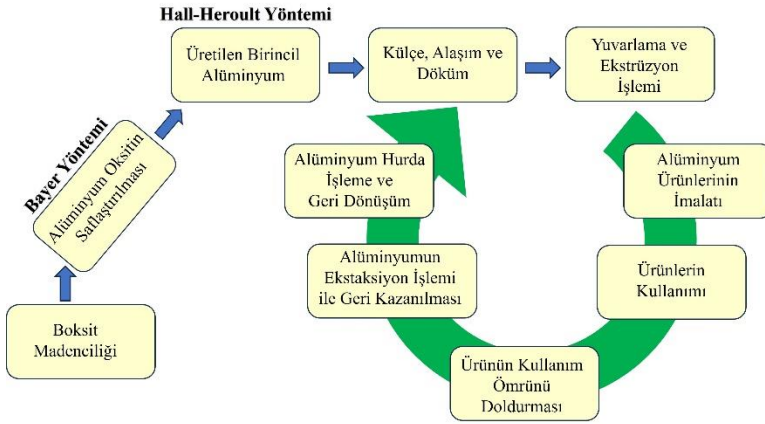
Tablo 6: Birincil alüminyum üretimi (ton) (Doine ve ark., 2023)

Ülke	2017	2018	2019	2020	2021
Azerbaycan	25.983	44.710	32.693	31.492	25.724
Bosna-Hersek	125.536	131.508	67.690	17.858	36.343
Fransa	430.000	380.000	402.000	417.000	440.000
Almanya	549.995	528.868	507.934	529.056	520.000
Yunanistan	181.630	184.800	182.100	189.036	183.775
İzlanda	763.618	733.523	689.995	728.104	729.813
Karadağ	39.379	40.163	36.522	37.208	45.214
Hollanda	29.300	41.300	81.100	70.600	46.700
Norveç	1.253.000	1.295.000	1.312.000	1.330.000	1.431.000
Romanya	282.074	282.810	280.326	271.307	293.399
Rusya	3.584.000	3.627.000	3.637.000	3.638.000	3.640.000
Slovakya	173.500	173.700	174.794	151.875	163.995
Slovenya	84.424	80.544	68.255	50.185	37.867
İsveç	123.000	125.000	120.000	117.000	124.000
Türkiye	76.000	73.300	78.100	79.900	79.200
Birleşik Krallık	48.000	44.400	39.400	35.700	37.571
Güney Afrika	716.000	714.000	717.000	717.000	714.000
Kanada	3.211.882	2.923.204	2.853.771	3.154.493	3.157.762
ABD	740.884	898.652	1.126.032	1.026.617	907.846
Arjantin	431.239	439.600	438.434	309.804	338.239
Brezilya	801.700	659.000	650.200	685.100	771.700
Bahreyn	981.016	1.011.101	1.365.005	1.548.000	1.561.222
Çin	35.189.100	36.447.290	35.043.604	37.080.401	38.502.600
Hindistan (c)	3.400.618	3.696.181	3.635.089	3.619.237	3.583.800
Endonezya	218.816	242.043	250.393	220.100	200.600
İran (d)	337.608	301.033	275.717	376.800	563.000
Kazakistan	255.090	258.400	263.300	265.000	262.500
Umman	253.000	380.000	391.000	397.000	395.000
Katar	650.000	616.000	653.000	655.000	662.000
Suudi Arabistan	916.000	932.000	967.000	1.010.563	998.000
Tacikistan	103.100	95.796	100.800	84.000	61.000
Birleşik Arap Emirlikleri	2.600.000	2.640.000	2.600.000	2.520.000	2.540.000
Avustralya	1.487.555	1.574.240	1.569.591	1.585.017	1.558.529
Yeni Zelanda	337.000	340.111	353.293	335.405	333.115
Dünya toplamı	6.260.000	64.100.000	62.900.000	65.200.000	67.000.000

2.2. Geri Dönüşümden İkincil Alüminyum Üretimi

Geri dönüşüm (ikincil alüminyum); doğanın ve çevrenin korunması, enerji tasarrufu, ekonomiye katkı, kaynakların az kullanımı göz önünde tutulduğunda, ürünün kullanım ömrünü doldurması sonrasında hurdaya ayırmanın amacı, yeniden kullanmak olmalıdır.

Yeşil metal olarak da adlandırılan alüminyum hem geri dönüştürülebilirlik açısından en iyisi, hem de geri dönüşümü yapılan malzemelerden dört kat daha değerlidir. Alüminyumun geri dönüştürülmesinde kullanım ömrünü doldurmuş alüminyum malzemeler, birincil alüminyum üretim süreçlerinde oluşan işlem artıkları, metalik alüminyum ve oksit karışımları kullanılmaktadır ve geri kazanım için kullanılan işlemler, birincil metal üretmek için kullanılanlardan çok farklı, ancak birçok açıdan aynı üretim yöntemlerini içermektedir (Schlesinger, 2007). Şekil 13'te birincil alüminyum ve ikincil alüminyumun yaşam döngüsü verilmiştir.



Şekil 13: Alüminyum üretimi ve yaşam döngüsü

Alüminyumun geri dönüştürülmesi, birincil alüminyum üretmek için kullanılan enerjinin yalnızca %5'ini gerektirir. Başka bir deyişle, enerjiden %95 tasarruf demektir. İklim değişikliği ile mücadele için imzalan Kyoto Protokolü'nden daha bağlayıcı olan Paris antlaşması (2015) ile sera gazı salınımının azaltılması ve 2050 yılına kadar net sıfır sera gazı salınımının hedeflendiği bugünlerde alüminyumun geri kazanılmasıyla enerji tasarrufuna eşdeğer olarak sera gazı salınımı da %95 daha azdır. Geri dönüştürülmüş metal üretmek için 2.8 kWh/kg gerekirken, birincil alüminyum üretimi için yaklaşık 14 kWh/kg gerekir (Tabereaux ve Peterson, 2014). Geri dönüşüm aynı zamanda işlenmemiş cevher boksitinin çıkarılmasını da azaltır (Diaz ve Warith, 2006; Deshwal ve Panjagari, 2020). Bununla birlikte hammaddenin yalnızca %20'si nihai ürüne girdiğinden büyük miktarda katı atık ve çamur oluşumu da önlenmiş olur. 1 kg alüminyumun geri dönüşümüyle yaklaşık 8

kg boksit, 4 kg kimyasal tasarrufu sağlanmakta ve bir alüminyum kutu ortalama 6-8 hafta içinde yeniden eritilip taze ürünle paketlenmektedir (Pongracz, 2007).

1886'da Hall-Heroult işleminin icat edilmesinden bu yana üretilen alüminyumun %75'i günümüzde hala kullanılmaktadır (Europeanaluminium, 2023; Bertram, 2009; Runge, 2018). Kullanılan alüminyumun yaklaşık %30-35 geri dönüştürülmüş hurdadan üretilirken bu oranın Uluslararası Alüminyum Enstitüsü'nün verilerine (2019) göre 2050 yılına kadar %50 olacağı belirtilmiştir (Graedel, 2011; International Aluminium Institute, 2019; International Aluminium Institute, 2020; Daehn ve ark., 2021). Aluminium Association yayınladığı rapora göre inşaat ve otomotiv parçalarında kullanılan alüminyumun yüzde 90'ı, içecek kutuları için %73'ü kullanım ömrünün sonunda geri dönüştürülmektedir (Medvecká ve ark., 2020; UBA, 2000; The Aluminium Association, 2019; Soo ve ark., 2018; Europeanaluminium, 2023). Şekil 14a ve Şekil 14b üretim artışı, Şekil 14'deki diğer şekiller ise kullanım ömrünü tamamlamış alüminyum ve alaşımlarıdır.



Şekil 14: İkincil alüminyum üretimi için geri dönüşüm için kullanılan hurda alüminyum atıkları (www.alibaba.com)

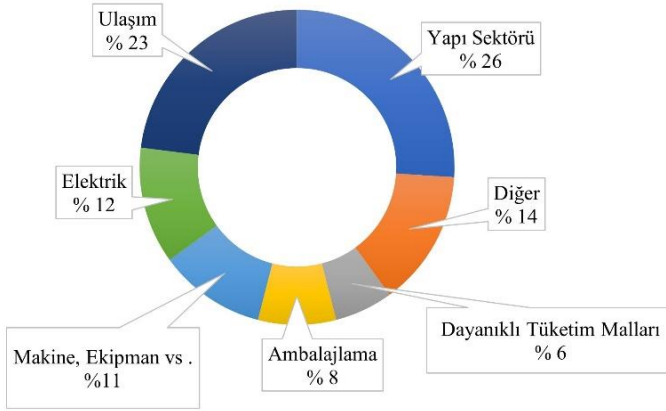
2002'den beri AB, net bir alüminyum hurdası ihracatçısı olmuştur. 2017 yılında AB, yaklaşık 902000 ton ihraç ederken, 2018 yılında 970000 ton alüminyum hurda ihraç etmiştir. 2017 yılına göre %7 artış vardır. (Europeanaluminium, 2023). Ancak alüminyum (Al), birincil Al'un enerji yoğun ve maliyetlerinin yüksek olması, ekonomik değerinin kayda değer olması ve hurda olarak değerlendirilebilir olmasıyla birlikte, geri dönüşümü yapılan Al-alaşımlarında genellikle istenmeyen safsızlık ve bazen de yararlı bir küçük alaşım elementi olarak Fe içerir. Metal ne kadar sık geri dönüştürülürse demirin alaşım içerisinde miktarı artarken kontrol edilmesi de bir o kadar zorlaşmaktadır. Otomotiv endüstrisinde alaşım içerisinde Fe'yi maksimum ağırlık olarak %0.4 olması istenmektedir (Norgate ve ark., 2007; Blomberg ve Söderholm, 2009; Logozar ve ark., 2006; Kuchariková, ve ark., 2016). Birincil Al fiyatına müdahale, potansiyel olarak Al hurdaya yönelik daha çok talep olacağı gibi, ikincil Al kalitesini elde etmek içinde hurda kullanımına olan talebi de artıracaktır (Soo, 2019).

3. KULLANIM ALANLARI

Alüminyum hafifliği, ısı ve elektriği iyi iletme, ışığı yansıtma, kolay işlenebilirlik, kopmadan şekil değiştirilebilirliği, korozyona dirençli olması gibi özellikleriyle alüminyum, 19. ve 20. yüzyılların başında çeşitli şekillerde kullanılmaya başlanmıştır.

1894 yılında ilk defa torpido botu ve alüminyum koltuklu özel hafif binek vagonlar yapılmıştır. 1899 yılında Karl Benz, alüminyum gövdeli ilk spor arabayı tanıtmıştır. 1903'te alüminyum parçalardan oluşan tamamen yeni bir motor geliştirilmiştir. Alfred Wilm tarafından 1909'da havacılıkta kullanılmaya başlayan alüminyuma bakır, magnezyum ve manganez ilavesiyle elde edilen Duralumin (hafif, ancak mukavemet, sertlik ve elastikiyet açısından alüminyumdan daha iyi olan alüminyum alaşımı) icat edilmiştir. Daha sonra ev eşyaları, özellikle mutfak eşyalarında alüminyum kullanılmaya başlanmıştır. 1907'de İsviçre'de alüminyum sarma folyo üretimi için kullanılan yöntem icat edilmiştir. İnşaat sektöründeki kullanımının yaygınlaşmaya başlamasıyla birlikte hem temel yapılarında hem de iç mekânlarında alüminyum kullanılan ilk bina Empire State Binası, 1931 yılında inşa edilmiştir. 2. Dünya Savaşı (1939-1945) sırasında alüminyum alaşımları üretilmiştir ve geliştirilerek tank, uçak, otomotiv yapımında kullanılmıştır. 1957 yılında Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği, gövdesi iki ayrı alüminyum yarı küreden oluşan yapay uyduyu uzaya fırlatmıştır. 1958 yılından itibaren sanat ve tasarım alanında alüminyum kutular üretilmeye başlanmıştır. 1964 yılında Shinkansen (Japonya) tren hattı açılmasıyla modern hızlı trenlerin protipi olan ve saatte 210 km/saat hızla giden tren hizmete girmiştir (Aydın, 1991; Lule, 1991; Polmear, 2004; Duparc, 2005; Alcan Marine, 2005; Genta ve ark., 2014; Sheller, 2014; Runge, 2018; Aluminiumleader, 2023; Bellis, 2020).

Günümüzde saf alüminyum ve mühendislik uygulamalarında (özellikle de savunma, ulaşım ve elektrifikasyon gibi endüstriyel alanlarda) saf alüminyum kullanımının yeterli olmadığı durumlarda deneysel olarak geliştirilen alüminyum alaşımları, yapı sektörü, paketleme, elektronik ve günlük ev eşyaları gibi geniş kullanım alanlarına sahiptir (Doan ve ark., 2021). Norsk Hydro 2020 yıllık raporuna göre toplam üretimin %11'i makine ekipman sektöründe kullanılırken, %26'sı (yaklaşık 23.4 milyon ton) yapı sektöründe kullanılmaktadır (Şekil 15).



Şekil 15: Alüminyumun kullanım alanları (Norsk Hydro 2020 yıllık raporu)

Alüminyum esaslı alaşımlarda, silisyum (Si), magnezyum (Mg), bakır (Cu), mangan (Mn), çinko (Zn), demir (Fe) ana alaşım elementleridir. İlave elementler ise bor (B), zirkon (Zr), nikel (Ni), bizmut (Bi), titan (Ti), krom (Cr), kurşun (Pb) elementleridir (Şekil 16).

Ana Alaşım Elementleri	Al				
	Cu	Mn	Si	Mg	Zn
Alaşım Birliklikleri	Al-Cu	Al-Cu- Mg	Al-Mg-Si		
	Al-Zn-Mg	Al-Zn-Mg-Cu	Al-Si		
	Al-Si-Cu	Al-Mn	Al-Mg		

Şekil 16: Alüminyum esaslı alaşımlardaki elementler ve alaşım birliklikleri

Dövme alaşım serileri;

a. 1xxx: Paketleme için folyo ve şerit, kimyasal ekipman gibi son derece yüksek korozyon direnci, şekillendirilebilirlik ve/veya elektrik iletkenliğinin gerekli olduğu uygulamalarda özellikle elektrik ve kimya endüstrisinde ağırlıklı olarak kullanılır. Saf alüminyum bileşimidir.

b. 2xxx: Ana alaşım elementi bakırdır. Magnezyum da bakır ve alüminyum ile alaşıma katılır. Özellikle uçaklarda ve kamyon gövdelerinde ulaşım endüstrisinde yüksek mukavemetin gerekli olduğunda kullanılır. Civatalı ve perçinli yapılarda kullanılır. Fakat atmosferik korozyona dayanıklı olmadıkları için kullanım koşullarına göre boyanır veya kaplanır. Isıl işleme tabi tutulabilir.

c. 3xxx: Manganez ana alaşım elementidir. Mükemmel korozyon direncine sahiptir ve kolayca kaynak yapılır, sert lehimlenir ve lehimlenir. Mimari uygulamalarda ve birçok gıda ve kimyasalın işlenmesinde ve inşaatçıların donanımlarında, pişirme aletlerinde, içecek kutularında alaşım serisi olarak kullanılır.

d. 4xxx: Kaynak çubukları, lehimleme levhası, buzdolabı soğutma sıvısı sirkülasyon sistemi, uçak sistemleri için kullanılan 4xxx alaşımında silisyumun ana alaşım elementidir. Orta derecede yüksek mukavemetli, ısıl işleme tabi tutulabilen bir alaşım serisidir.

e. 5xxx: Tekne gövdeleri, iskele tahtaları gibi deniz suyuna maruz kalan malzemelerde, bina, inşaatlarda, köprüler, otoyol yapılarında, otomotiv gövde paneli, otomotiv çerçeve uygulamaları, otomotiv parlak kaplama uygulamaları; kriyojenik tanklarda, depolama tankları ve basınçlı kaplar dâhil olmak üzere ve -270°C 'ye (mutlak sifıra yakın) kadar düşük sıcaklıklara yönelik sistemlerde geniş uygulama alanı bulan magnezyumun ana alaşım elementi olduğu 5xxx alaşım serisidir. Orta derecede yüksek dayanıma, tuzlu suda bile mükemmel korozyon direncine sahiptir.

f. 6xxx: Genellikle mimari ekstrüzyonlarda, arenalar ve spor salonları için çatı yapıları jeodezik kubbeler ve otomotiv bileşenlerinde, otomotiv uzay şasi elemanları, yüksek mukavemetli otomotiv gövde panelleri, darbeli ve deniz şasileri, demiryolu araçları ve boru hatları, elektrik iletken telleri yaygın olarak kullanılan, orta derecede yüksek mukavemete ve mükemmel korozyon direncine sahip olan alaşım serisinin ana alaşım elementleri magnezyum ve silisidir. Isıl işleme tabi tutulabilir. Kolayca kaynak yapılır. Benzersiz bir özellik, ekstrüde edilebilirlikleridir, bu da onları alışılmadık veya özellikle mimari ve yapısal elemanlar için ilk tercih haline getirir.

g. 7xxx: Yüksek mukavemetli uygulamalarda, özellikle havacılık (uçak yapısal bileşenlerinde) ve otomotiv uygulamaları için en güçlü alaşım olan 7xxx kullanılmaktadır. Çinko ana element ve bakır, magnezyum, krom ve zirkon elementleri de alaşımda vardır. Isıl işleme tabi tutulabilir.

h. 8xxx: Kayda değer miktarda kalay, lityum ve/veya demir içeren çeşitli bileşimleri karakterize eden alaşım serisidir. Yüksek iletkenlik,

mukavemet, sertliğe sahip alaşım serisi elektrik, havacılık, uzay ve rulman uygulamaları için kullanılır. Isıl işleme tabi tutulabilir.

i. 9xxx: Gelecekte kullanılmak üzere ayrılmıştır (Aluminium Association, 1998; Davis 2001).

Dökme alaşımlar serileri;

a. 1xx.x: Makinelerin dönen bölümlerinin yani rotor üretimi için kontrollü alaşımsız (saf) bileşimlerdir.

b. 2xx.x: Oda ve yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemete sahip alaşım serisinde ana alaşım elementi bakırdır. Diğer alaşım elementleri de alaşım serisinde olabilir. Motor piston kafaları, entegre motor blokları veya yatakları gibi otomotiv uygulamaları/motorları ve uçak endüstrisinde kullanılan 2xx.x alaşım ısıl işleme tabi tutulabilir.

c. 3xx.x: Mükemmel akışkanlık ve yüksek mukavemete sahip olan, bakır ve magnezyum alaşımında yer alırken ana alaşım elementi silis olan alaşım serisidir. Otomotiv (pistonlar, pompalar) sektöründe kullanılmaktadır. Üretilen tüm şekilli dökümlerin %90'ı 3xx.x'dir. Isıl işleme tabi tutulabilir.

d. 4xx.x: Ana alaşım elementinin silikon olduğu alaşım serisidir. Özellikle karmaşık, ince duvarlı, sızdırmaz, yorulmaya dayanıklı dökümler için uygundur. Daktilo çerçeveleri, dişçilik ekipmanları, denizcilik ve mimari alanda kullanılmaktadır.

e. 5xx.x: Magnezyumun ana alaşım elementi olduğu alaşım serisi orta mukavemete ve iyi uzama özelliğine sahiptir. Deniz suyuna veya diğer benzer aşındırıcı ortamlara maruz kalan bileşenler için uygundur. Bu alaşımlar sıklıkla kapı ve pencere bağlantılarında, pişirme aletleri, gıda işleme ekipmanlarında, uçak endüstrisinde, otoyol donanımlarında dekoratif olarak metalik bir yüzey elde etmek için veya geniş bir renk yelpazesinde anodize edilerek kullanılır.

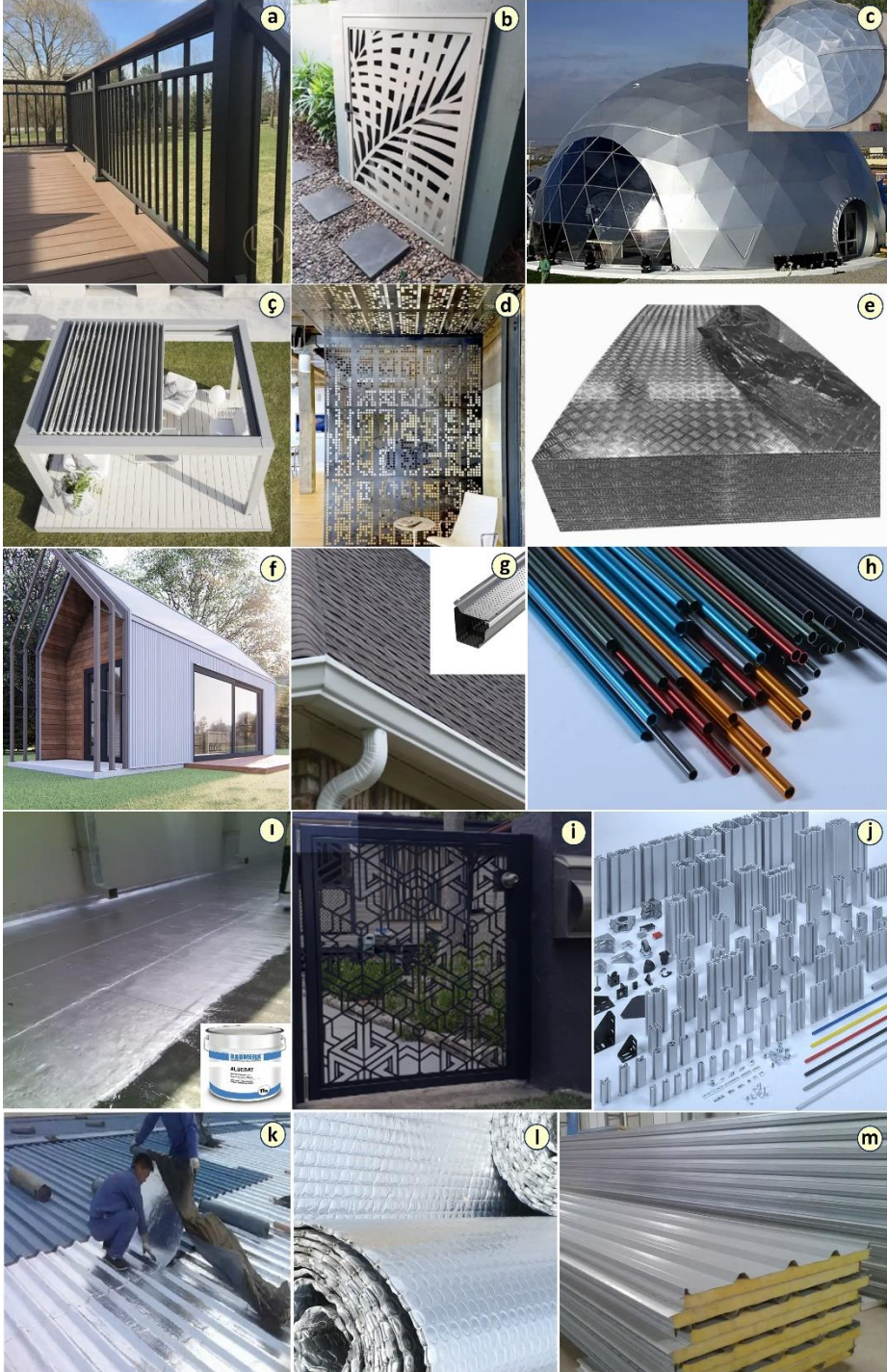
f. 6xx.x: Kullanılmamaktadır.

g. 7xx.x: Bakır ve magnezyum alaşımında yer alırken ana alaşım elementi çinko olduğu alaşım serisidir. Mobilya, bahçe aletleri, ofis makineleri, tarım, madencilik ekipmanları şeklinde kullanım alanlarına sahiptir.

h. 8xx.x: Mükemmel işlenebilirlik özelliğine kalayın ana alaşım elementi olan alaşım serisidir. Her çeşit rulmanda kullanılır.

i. 9xx.x: Kullanılmamaktadır (Aluminium Association, 1998; Davis 2001).

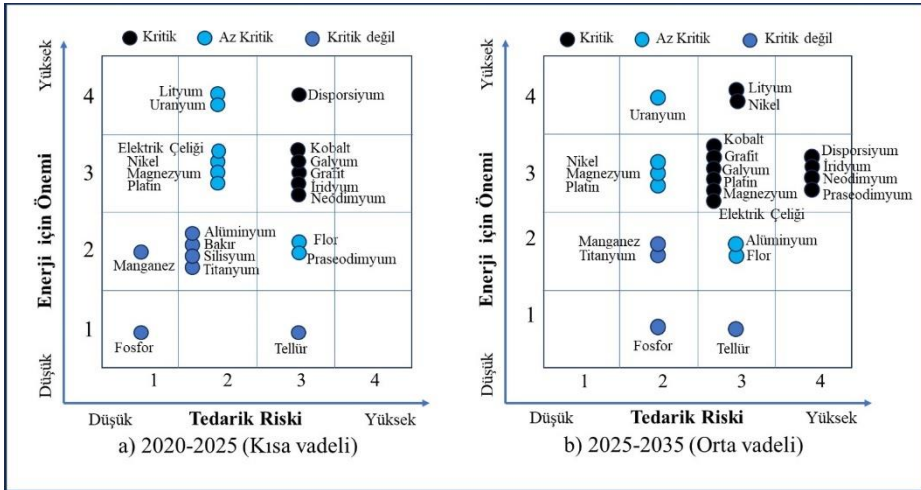
Yapı sektöründe alüminyum ve alaşımları; korkuluk ve korkuluk başlıkları, donanım ve bağlantı parçaları, dekoratif ızgaralar, ıslak zemin ızgaraları, kapı ve pencere çerçeveleri, jeodezik kubbeler, panel perde duvarları, prefabrik evler, dekoratif laminatlar, yalıtım folyoları, yansıtıcı levhalar, su geçirmez levhalar, boyalar, mutfak rafları, saçak sistemleri, kablo kanal sistemleri, asma tavanlar, seraların çatı kısımlarında, ofis bölme sistemleri olarak kullanılmaktadır (Şekil 17).



Şekil 17: Alüminyum ve alaşımlarının uygulama alanları (www.alibaba.com)

4. SONUÇLAR

Üstün özelliklerden dolayı geniş kullanım alanına sahip olan alüminyumun, küresel üretiminin yaklaşık %60'ı Çin tarafından gerçekleştirilirken, ihracat konusunda oldukça geniş pazara sahip olan Türkiye ise birinci alüminyum bakımından dışa bağımlıdır ve gereksiniminin %93'ünü ithal etmektedir (TALSAD, 2022). Küresel piyasalarda alüminyum fiyatları ton başı 2019 yılı başlarında yaklaşık 1850 dolar iken 2020 yılı ortalarında 1400 dolar seviyelerine gerilemiştir. 2023 yılında ise ton başı 2000 doların üzerinde olup Eylül 2023'de 2230 dolar seviyelerindedir (LME, 2023). Alüminyum üretiminde lider olan Çin fiyatların belirlenmesinde büyük payı vardır. Ayrıca küresel alüminyum üretiminde, COVID-19 salgınının ve Rusya'nın Ukrayna ile savaşı enerji kesintileri sebebiyle, son yıllarda alüminyum üretim tesislerindeki üretimi kısıtlamasına rağmen kısa vade de boksit rezervlerinin, talepleri karşılamaya yetecek kadar olduğu da bilinmektedir. Fakat U.S. Department of Energy tarafından hazırlanan 2023 kritik malzemelerin değerlendirilmesi raporunda her faktör için, anahtar materyallere 1 (en az kritik) ile 4 (en kritik) arasında niteliksel puanlar atanmıştır ve alüminyumun, güneş enerjisi teknolojilerine, küresel elektrifikasyona ve araçların hafifletilmesine yönelik artan talep nedeniyle orta vadede tedarik riskinin artacağı raporda belirtilmektedir (U.S. Department of Energy, 2023) (Şekil 18).



Şekil 18: Enerji ve tedarik riski (kısa ve orta vadede) element grafiği (U.S. Department of Energy, 2023)

2050 yılında, gelişmiş endüstriler, ileri teknolojiler için stratejik bir malzeme olan alüminyuma, küresel talebinin 335 milyon ton olacağı, özellikle en büyük talep artışının ulaşım (%55) sektöründe ve %28'lik artış beklentisi ile inşaat sektörü olacağı öngörülmektedir (TALSAD, 2022). Bu nedenle

Dünyada ve Türkiye’de üretim yöntemlerinde halen Bayer ve Hall-Herault yönteminin kullanılmasından dolayı boksit üretimindeki madencilik faaliyetleri ve geri dönüşüm yöntemiyle ikincil alüminyumun üretiminin artırılması gerekmektedir. Ayrıca alüminyum için alternatif doğal kaynak, araştırma ve geliştirme faaliyetlerine de önem vermelidir.

KAYNAKÇA

- Ahmadnejad, F., Zamanian, H., Taghipour, B., Zarasvandi, A., Buccione, R., ve Ellahi, S. S. (2017). Mineralogical and geochemical evolution of the Bidgol bauxite deposit, Zagros Mountain Belt, Iran: Implications for ore genesis, rare earth elements fractionation and parental affinity. *Ore Geology Reviews*, 86, 755-783.
- Alcan Marine. (2005). Aluminium, the marine metal, historical review.
- Almadhoni, K. ve Khan, S. (2015). Review of effective parameters of stir casting process on metallurgical properties of ceramics particulate Al composites. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12(6), 2278-1684.
- Aluminium Association. (1998). Aluminium Alloy: Selection and Applications, The Aluminum Association. Inc., Washington DC, USA.
- Al-Ajeel A. W. ve Al-Sindy S. I., (2006). Alumina recovery from Iraqi kaolinitic clay by hydrochloric acid route. *Iraqi Bulletin of Geology and Mining*, 2(1), 67-76.
- Al-Zahrani, A. ve Abdul-Majid A., M. H., (2009). Extraction of alumina from local clays by hydrochloric acid process. *JKAU: Eng. Sci.*, 20(2), 29-41.
- Aydın, C. (1991). Uzay araştırmaları önemi ve ülkelerin gelişimine katkısı. http://acikerisim.comu.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12428/811/Cemal_Aydin_Bildiri.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bardossy, G. (1982). *Karst Bauxites: Bauxite Deposits on Carbonate Rocks*. Elsevier Science Publishers.
- Bardossy, G. ve Aleva, G. J. J. (1990). *Lateritic Bauxites. Developments in Economic Geology*. Elsevier.
- Bardossy G. ve Combes P. J. (1995). *Karst Bauxites: Interfingering of Deposition and Palaeoweathering Palaeoweathering, Palaeosurfaces and Related Continental Deposits*. Wiley.
- Banerjee, P. K., Mankar, A. U. ve Kumar, V. (2023). Beneficiation of bauxite ores. *Mineral Processing*, 117-166.
- Blengini, G. Latunussa, C. E. L. Eynard, U., de Matos, C. T., Wittmer, D., Georgitzikis, K., Pavel, C., Carrara, S., Mancini, L., Unguru, M., Blagoeva D., Mathieux F., Pennington D. (2020). Study on the EU's List of Critical Raw Materials (2020) Final Report; European Commission: Brussels.
- Blomberg, J. ve Söderholm, P. (2009). The economics of secondary aluminium supply: An econometric analysis based on European data. *Resour Conserv Recycl*, 53, 455-63.
- Brough, D. ve Jouhara, H. (2020). The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *International Journal of Thermofluids*, 1.

- Bellis, M. (2020). The History of Aluminum and Charles Martin Hall. thoughtco.com/charles-martin-hall-aluminum-4075554.
- Boaventura, G. R. ve Dórea J. G. (2003). *Aluminum Properties and Determination*, Editor(s): Benjamin Caballero, Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition), Academic Press, Oxford.
- Bozkır, Y. (2007). Çarıkisaraylar ile Kozluçay (Şarkıkaraağaç-Isparta) Arasındaki Boksitlerin NTE'leri ve Oluşum Şartları, Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı Konya, 2007. (Yayınlanmamış)
- Bertram M., Martchek K.J., Rombach G., (2009)Material flow analysis in the aluminum industry, *J. Ind. Ecol.* 13 (2009) 650–654.
- Cázares, G. M. M. ve Lozano, D. E. (2018). Hall-Heroult Process. In *Encyclopedia of Aluminum and Its Alloys*, 1099-1103.
- Davis, J. R. (2001). *Alloying: understanding the basics*. ASM International.
- Duparc, O. (2005). Alfred Wilm and the beginnings of Duralumin. *International Journal of Materials Research*, 96(4), 398-404.
- Deshwal, G. K. ve Panjagari, N. R. (2020). Review on metal packaging: Materials, forms, food applications, safety and recyclability. *Journal of food science and technology*, 57, 2377-2392.
- Diaz, R. ve Warith, M. (2006) Life-cycle assessment of municipal solid wastes: development of the WASTED model. *Waste Manag* 26(8):886–901
- Drozdo, A., (2007). 13 Al thirteenth element Encyclopedia. The RUSAL Library, Moscow
- Daehn, K., Basuhi, R., Gregory, J., Berlinger, M., Somjit, V. ve Olivetti, EA. (2021). Innovations to decarbonize materials industries. *Nat Rev Mater* <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00376-y>.
- Duflou, J. R. (2018). Sustainable aluminium recycling of end-of-life products: A joining techniques perspective. *Journal of Cleaner Production*, 178, 119-132.
- Dodoo-Arhin, D., Nuamah, R. A., Agyei-Tuffour, B., Obada, D. O. ve Yaya, A. (2017). Awaso bauxite red mud-cement based composites: Characterisation for pavement applications. *Case studies in construction materials*, 7, 45-55.
- Doan, B. Q., Nguyen, D. T., Nguyen, M. N., Le, T. H. ve Hao, T. M. (2021). A review on properties and casting technologies of aluminum alloy in the machinery manufacturing. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 44(8), 204-217.
- Eroğlu, G. ve Şahiner, M. (2018). Dünyada ve Türkiye’de alüminyum. *MTA Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara*.
- Esmaily, D., Rahimpour-Bonab, H., Esna-Ashari, A. ve Kananian, A. (2010). Petrography and geochemistry of the Jajarm bauxite ore deposit,

- Northeast Iran: implications for source rock material and Ore Genesis. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 19(2), 267-284.
- Fleischer, M. (1953). *Recent estimates of the abundances of the elements in the earth's crust*, 285. US Department of the Interior, Geological Survey.
- Freyssinet, P. H., Butt, C. R. M., Morris, R. C. ve Plantone, P. (2005). Ore forming processes related to lateritic weathering. *Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume 1905-2005*. SEG, Colorado.
- Genta, G., Morello, L., Cavallino, F. ve Filtri, L. (2014). The motor car: Past, present and future, Ch. 4 "Powertrain", section 4.41 electric cars. New York: Springer.
- Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J. P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck B. K, Sibley, S. F. ve Sonnemann, G. (2011). What do we know about metal recycling rates? *The Journal of Industrial Ecology*, 15, 355-66.
- Grubb, P. L. C. (1963). Critical factors in the genesis, extent and grade of some residual bauxite deposits. *Econ. Geol.*, 58, 1267-1277.
- Gu, J., Huang, Z., Fan, H., Jin, Z., Yan, Z. ve Zhang, J. (2013). Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Northern Guizhou Province, China. *Journal of Geochemical exploration*, 130, 44-59.
- Gümüş, A. (1999). *Dış Olaylara Bağlı Maden Yatakları*. Dokuz Eylül Üniversitesi Basım Ünitesi.
- Habashi, F. (1998). *Handbook of Extractive Metallurgy*; Wiley-VCH: Weinheim.
- Hanilçi, N. (2019). Bauxite deposits of Turkey. Pirajno, T. Ünlü, C. Dönmez, M. Şahin (Eds.), *Mineral Resources of Turkey. Modern Approaches in Solid Earth Sciences*, vol. 16, Springer.
- Haynes, W. M. (2015). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (96th ed.). Boca Raton, FL: Taylor & Francis.
- Hind, A. R., Bhargava, S. K. ve Grocott, S. C. (1999). The surface chemistry of Bayer process solids: a review. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 146(1-3), 359-374.
- Hosterman, J. W., Patterson, S. H. ve Good, E.E. (2020). World Nonbauxite Aluminum Resources Excluding Alunite. U.S. Geological Survey Professional Paper 1076-C 1990. <https://pubs.usgs.gov/pp/1076c/report.pdf>.
- Horbe, A. M. C. ve da Costa, M. L., (1999). Geochemical evolution of a lateritic Sn-Zr-Th-Nb-Y-REE-bearing ore body derived from apogranite: the case of Pitinga, Amazonas Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, 66, 339-351.
- Huda, Z. (2022). *Mechanical Behavior of Materials Fundamentals, Analysis, and Calculations*. Mechanical Engineering Series. Springer, Cham.
- U.S. Department of Energy, (2023).

- https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/doe-critical-material-assessment_07312023.pdf.
- Europeanaluminium (2023). <https://european-aluminium.eu/activity-report-2018-2019/market-overview/>.
- Periodictable, (2007). <https://periodictable.com/Samples/013.27/s13.jpg>
- <https://www.hydro.com/globalassets/downloadcenter/investordownloads/ar20/annual-report-2020-new.pdf>
- <https://www.alibaba.com> adresinden 12 Ağustos 2023 tarihinde alınmıştır
- Idoine, N. E., Raycraft, E. R., Price, F., Hobbs, S. F., Deady, E. A., Everett, P., Shaw, R. A., Evans, E. J. ve Mills, A. J. (2023). World Mineral Production. https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/534316/1/WMP_2017_2021_FINAL.pdf
- International Aluminium Institute, Global Aluminium Cycle (2019). Alucycle 2020. <https://alucycle.international-aluminium.org/public-access/>.
- International Aluminium Institute. Prim Alum Smelt Power Consum (2020). <https://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-powerconsumption/>
- Kaußen, F. M ve Friedrich, B. (2016). Methods for alkaline recovery of aluminum from bauxite residue, *Journal of Sustainable metallurgy*, 2, 353-364.
- Kuchariková, L., Tillová, E. ve Bokuvka, O. (2016). Recycling and properties of recycled aluminium alloys used in the transportation industry, *Transp. Probl.* 11(2), 117-122.
- Kvande, H. ve Drabløs, P. A. (2014). The aluminum smelting process and innovative alternative technologies. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 56(5), 23.
- Kyriakogona, K., Giannopoulou, I. ve Pantias, D. (2017). Extraction of aluminium from kaolin: A comparative study of hydrometallurgical processes. In *Proceedings of the 3rd World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'17), Rome, Italy*, 8-10.
- Lancaster, M., (2020). Green chemistry: an introductory text. Royal society of chemistry. <https://pubs.rsc.org/en/content/ebook/978-1-78262-294-9>
- Ling, K. Y., Zhu, X. Q., Tang, H. S. ve Li, S. X. (2017). Importance of hydrogeological conditions during formation of the karstic bauxite deposits, Central Guizhou Province, Southwest China: A case study at Lindai deposit. *Ore Geology Reviews*, 82, 198-216.
- Liu, Q., Li, H.M., Zuo, X.-L., Zhang, F.-F. ve Wang, L. (2009). A Survey and Analysis on Public Awareness and Performance for Promoting Circular Economy in China: A Case Study from Tianjin, *Journal of Cleaner Production*, 17, 265-270.

- Logožar, K., Radonjič, G. ve Bastič, M. (2006). Incorporation of reverse logistics model into in-plant recycling process: A case of aluminium industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 49, 49-67.
- Lule, J. (1991). Roots of the Space Race: Sputnik and the Language of US News in 1957. *Journalism Quarterly*, 68(1-2), 76-86.
- Luo, Z. ve Soria, A. (2008). Prospective study of the world aluminium industry. EUR 22951 EN. 2008.
- Liang, F., Sayed, M., Al-Muntasheri, G. A., Chang, F. F. ve Li, L. (2016). A comprehensive review on proppant technologies, *Petroleum* 2, 26-3. doi: 10.1016/j.petlm.2015.11.001.
- Loretsen, O. A. (2014). 125 years of the Hall-Héroult Process-What Made It a Success?. *Molten salts chemistry and technology*, 103-112.
- Mahinroosta, M., Karimi, Z. ve Allahverdi, A. (2020). Recycling of red mud for value-added applications: A comprehensive Review. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, 2, 561.
- Mameli, P., Mongelli, G., Oggiano, G., ve Dinelli, E., (2007). Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits from Nurra (western Sardinia, Italy): Insights on conditions of formation and parental affinity. *International Journal of Earth Sciences*, 96, 887-902.
- Mandin, P., Wüthrich, R. ve Roustan, H. (2009). Industrial aluminium production: the Hall-Heroult process modelling. *ECS Transactions*, 19(26), 1.
- Mason, B., (1952). Principles of geochemistry, New York, John Wiley and Sons.
- Maria, B., Efthymios, B. ve Dimitrios, P. (2021). Exploitation of Kaolin as an Alternative Source in Alumina Production. *Materials Proceedings*, 5(1), 24.
- Schlesinger, M.,E. (2007) Aluminum Recycling, Taylor & Francis Group, CRC Press.
- Medvecká, D., Tillová, E., Chalupová, M., Kuchariková, L. ve Zavodská, D. (2020). Mechanical properties of self-hardening Al-Zn-Si cast alloy with higher content of Fe. *Materials Today: Proceedings*, 32, 187-193.
- Menzie W.D., Barry J.J., Bleiwas D.I., Bray E.L., Goonan T.G. ve Matos G., (2010). The Global Flow of Aluminum from 2006 Through 2025, 1-78.
- Maden Tetkik Arama Enstitüsü (1977). Türkiye Yeraltı kaynakları Envanteri. Maden Tetkik Arama Enstitüsü Yayınları, No: 168.
- Mutakyahwa, M.K.D., Ikingura, J.R. ve Mruma, A.H. (2003). Geology and geochemistry of bauxite deposits in Lushoto District, Usambara Mountains, Tanzania. *Journal of African Earth Sciences* 36, 357-369.

- Norgate, T. E., Jahanshahi, S. ve Rankin, W.J. (2007). Assessing the environmental impact of metal production processes. *J Clean Prod*, 15, 838-48. doi:10.1016/j.jclepro.2006.06.018.
- Olaremu, G. A. (2015). Sequential Leaching for the Production of Alumina from a Nigerian Clay, *IJETMAS*, 3(7).
- Öztunalı, Ö. (1973). Maden Yatakları, Oluşumları ve Değerlendirilmeleri. Latin Matbaası.
- Parker, R. L. (1967). Composition of the Earth's crust. In: Data of Geochemistry, 6th edition. U.S. Geological Survey Professional Paper 440-D, 19.
- Patterson, S. H. (1967). Bauxite reserves and potential aluminum resources of the world, *Geol. Surv. Bull.*, 176.
- Plunkert, A. P. (2001). Bauxite and Alumina, *US Geol Surv Miner Handb*.
- Pongracz, E. (2007). The environmental impacts of packaging. *Environmentally conscious materials and chemicals processing*, 2, 237.
- Pontikes, Y. (2005). Red mud-Characteristic: Red Mud Project, May 2, accessed March 8, 2010, at <http://www.redmud.org/Characteristics.html>
- Polmear, I. (2004). Aluminium alloys-A century of age hardening. *Materials Forum*, 28, 1-14.
- Price, G. D., Valdes, P. J. ve Sellwood, B. W. (1997). Prediction of modern bauxite occurrence: implications for climate reconstruction. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 131, 1-13.
- Recalde, K., Wang, J. ve Graedel, T. E. (2008). Aluminium in-use stocks in the state of Connecticut. *Resour. Conservation Recycl.* 52(11), 1271-1282. doi:10.1016/j.resconrec.2008.07.006
- Reverdy, M. ve Potocnik, V. (2020). History of Inventions and innovations for aluminum production. In *TMS 2020 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings (1895-1910)*. Springer International Publishing.
- Runge, J. M. (2018). A Brief History of Aluminum and Its Alloys, pages 1–63. Springer International Publishing, Cham, 2018.
- Schwarz, H. (2004). Aluminum production and energy. *Encyclopedia of Energy. Elsevier*, 81-95.
- Selwyn, L. (2019). Aluminum: A Modern Metal in Cultural Heritage. In: Chemello, Claudia et al. (ed.). *Aluminum: History, Technology, and Conservation. Proceedings from the 2014 International Conference*. Washington: Smithsonian Scholarly Press, Smithsonian Contributions to Museum Conservation.
- Starke, E. A. ve Rashed H. M. M. A. (2017). Alloys: Aluminum, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier.

- Sheller, M. (2014). *Aluminum dreams, the making of light modernity*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology Press Sustainable Bauxite Mining Guidelines, <https://aluminium.org.au/wp-content/uploads/2022/02/SBMG-Second-Edition-Feb-2022.pdf> Second Edition 2022
- Soo, V. K., Peeters, J., Paraskevas, D., Compston, P., Doolan, M. ve Duflou, J. R. (2018). Sustainable aluminium recycling of end-of-life products: A joining techniques perspective. *Journal of Cleaner Production*, 178, 119-132.
- Soo, V. K., Peeters, J. R., Compston, P., Doolan, M. ve Duflou, J. R. (2019). Economic and environmental evaluation of aluminium recycling based on a Belgian case study. *Procedia Manufacturing*, 33, 639-646.
- Smith, P. (2009). The processing of high silica bauxites—Review of existing and potential processes. *Hydrometallurgy*, 98(1-2), 162-176.
- UBA (German Environmental Agency) (ed) (2000): *Life Cycle Assessment for Drinks Packaging Systems II/Phase 1*. UBATexte 37/00, Berlin.
- U.S. Geological Survey. (2021). *Mineral Commodity Summaries 2021*: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-bauxite-alumina.pdf> Erişim: 02.08.2023.
- U.S. Geological Survey. (2022). *Mineral Commodity Summaries 2022*: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-bauxite-alumina.pdf>
- U.S. Geological Survey. (2023). *Mineral Commodity Summaries 2023*: Erişim: 02.08.2023. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-bauxite-alumina.pdf>.
- U.S. Department of Energy (2023). *Critical Materials Assessment*. https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/doe-critical-material-assessment_07312023.pdf.
- Rusal. *The History of Aluminium Industry* n.d. https://www.aluminiumleader.com/history/industry_history/ https://www.aluminiumleader.com/history/industry_history/. Erişim: 02.08.2023.
- The Aluminium Association. *Aluminium Recycling* n.d. <https://www.aluminum.org/industries/production/recycling> Erişim: 02.08.2023.
- Tabereaux, A. T. (2010). Hungarian Red Mud Disaster: Addressing Environmental Liabilities of Alumina. *Light Metal Age*, 22.
- Tabereaux, A. T. ve Peterson, R. D. (2014). Aluminum production. In *Treatise on Process Metallurgy* (pp. 839-917). Elsevier.
- Talsad, (2022). *Dunyada ve Turkiyede Alüminyum Sektör Raporu_Ozet* http://talsad.org.tr/wpcontent/uploads/2022/08/TALSAD_Dunyada_ve_Turkiyede_Aluminyum_Sektor_Raporu_Ozet_2021.pdf

- Totten, G. E. ve MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). *Handbook of Aluminum: Volume 2: Alloy production and materials manufacturing*. CRC press.
- Wedepohl, K.H. (1995). The composition of the continental crust, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 1217-1232.
- Whittington B. I., Fallows T. M. ve Willing M. J. (1997). Tricalcium aluminate hexahydrate (TCA) filter aid in the Bayer industry: Factors affecting TCA preparation and morphology. *International Journal of Mineral Processing*, 49(1-2), 1-29.
- Wippert, J. (1964). Türkiye'nin alüminyum hammaddeleri, *MTA Derg.*, 62, 80-87.

BÖLÜM 2

DEMİR

Dr. Öğr. Üyesi Serhan HANER¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10034898>

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Dinar Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Endüstriyel Tasarım Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye. shaner@aku.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-8579-078X

GİRİŞ

Yapı sektöründe çeşitli amaçlarla farklı özelliklere sahip çok sayıda metalik maden kullanılmaktadır. Metallerin özellikleri diğer yapı malzemelerinden oldukça farklılık göstermektedir. Ancak saf haldeki metalik madenlerin yapıda kullanılabilmesi için metallere çeşitli işlemler uygulanır ve istenilen özellikler kazandırılır. Metalik madenler içerisinde önemli bir yeri olan demirin en yüksek miktarda kullanıldığı alan inşaat sektörüdür. İnşaat sektöründe demirli metallerin birçok farklı türü kullanılmaktadır. Metalik demir ürünler hematit, manyetit, limonit, siderit gibi demir oksit içeren maden filizlerinin yüksek fırınların ergitme ocaklarında eritilmesiyle elde edilmektedir.

Gümrük Tarife İstatistik Pozisyonu'na göre "2601-Demir cevherleri ve zenginleştirilmiş demir cevherleri (kavrulmuş, demir piritleri dâhil)" üst kategorisi altında "260111-Demir cevherleri ve zenginleştirilmiş demir cevherleri; aglomere edilmemiş (kavrulmuş demir piritleri hariç), 260112-Demir cevherleri ve zenginleştirilmiş demir cevherleri; aglomere edilmiş (kavrulmuş demir piritleri hariç) ve 260120-Kavrulmuş demir piritleri" olarak sınıflandırılmaktadır.

Dünya'nın çekirdeği büyük oranda demirden oluşur ve yaklaşık olarak %4 oranında nikel içerir. Burada demir ve nikel alaşım halindedir. Aynı zamanda demir yer kabuğunda en fazla miktarda bulunan ikinci metal ve dördüncü elementtir. Demir (CASRN 7439-89-6, EINECS 231-096-4), atmosferik basınçta hacim merkezli kübik ve yüzey merkezli kübik yapıya sahip, atom numarası 26, atom ağırlığı 55.845 g/mol olan baz metal grubu bir elementtir. Demir kökenli malzemelerin mızrak ucu, süs eşyası gibi objeler halinde kullanımının yaklaşık olarak MÖ 4000 yıllarına kadar uzanmasına karşın inşaat sektöründe ankraj ve taş bağlama elemanı olarak kullanılması Roma ve Yunan uygarlıklarında olmuştur. Çeliğin taşıyıcı yapı elemanı olarak kullanılması 19. yüzyılda gerçekleşebilmiştir. Bu gecikmenin nedeni, çeliğin yapıda kullanımına olanak veren endüstriyel tekniklerin ancak 19. yüzyılda mümkün olmasıdır (Akman, 2003; European Chemicals Agency, 2023; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2017; Pepperhoff ve Acet, 2001; Tübitak Bilim Genç, 2021). Şekil 1'de solda demir cevheri örneği, sağda ise ürün hali olan nervürlü inşaat demiri görülmektedir.

Demir cevherleri, ekonomik olarak çıkarılabilir metalik demirden kayalar ve minerallerdir. Bu cevherler genellikle demir oksitler açısından zengindir ve koyu griden parlak sarıya veya koyu mordan paslı kırmızıya kadar değişik renklerde gözlenir. Doğada kendiliğinden oluşabilen 400'den fazla demir minerali olmasına karşın genellikle manyetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), götit ($FeO(OH)$), limonit ($FeO(OH) \cdot n(H_2O)$), ilmenit ($FeTiO_3$), pirit (FeS_2), psödobrokit (Fe_2TiO_5), şamozit ($(Fe,Mg)_5Al(AlSi_3O_{10})(OH)_8$) veya siderit ($FeCO_3$) şeklinde bulunur. Yaygın olarak bulunan demir mineralleri ve sahip oldukları bazı fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Çok

yüksek miktarlarda hematit veya manyetit içeren cevherler (yaklaşık %60'tan fazla demir) “doğal cevher” veya “doğrudan nakliye cevheri” olarak bilinir. Yani bu cevherler doğrudan yüksek fırınlara beslenebilir. Demir cevheri, çeliğin ana hammaddelerden biri olan pik demiri yapmak için kullanılan bir hammaddedir. Çıkarılan demir cevherinin %98'i çelik yapmak için kullanılır (Shaltami ve ark., 2020).



Şekil 1: Demir cevheri (solda) ve nervürlü inşaat demiri (sağda)

Demir oksitler düşük fiyatlı, toksik olmayan, inert, hava koşullarına dayanıklı, yüksek mukavemetli ve opak özelliklere sahip oldukları için çok değerlidirler. Demirin sahip olduğu özellikler onu inşaat, gemi ve otomotiv gibi birçok sektörlerde vazgeçilmez bir malzeme haline getirmiştir. Başlıca kullanım alanları boya, plastik, mürekkep, lastik, ilaç, seramik, harç, hayvan yemi, çimento, kâğıt ve kozmetik sanayileridir. Demir oksitler, titanyum dioksit gibi doğal kaynaklı pigmentlerden biri olmaya devam etmektedir. Demirli veya demir oksitlerin karışımı, pigmentler için sağlanan demir oksitleri oluşturur. Bunlar manganez oksitler, kil ve silis gibi safsızlıkları içerebilir. Boya sanayi, plastik sanayi, ilaç sanayi, mürekkep sanayi ve kozmetik sanayindeki ürünlerin ana bileşenini demir oksitler oluşturmaktadır. Mika içeren oksitler korozyon önleyici özellik sağlar. Bu uygulamalar için uygun olan doğal pigmentlerin oluşumu sınırlıdır. Bu nedenle, demir bileşiklerinden elde edilen sentetik demir oksitler daha iyi homojenliğe, renk saflığına, tutarlılığa ve dayanıklılığa sahiptir. Demir oksitlerin fiziksel özellikleri, kimyasal bileşimlerinden daha değerlidir. Bir malzemenin pigment uygulaması için uygunluğu, öğütülebilirliğine, renk homojenliğine ve renklendirme gücüne bağlıdır. Bu özelliklerinin yanı sıra ilaç ve kozmetik endüstrisindeki uygulamaları için kimyasal saflık da önemlidir. Piritin ve sideritin kalsinasyonu, bu uygulamalarda istenilen özelliklere sahip demir oksitlerin elde edilmesini sağlamaktadır. Pigmentlerin ticari üretimi için diğer zenginleştirme prosesleri, demir bileşiklerinin termal yöntemle ayrışmasını, demir tuzlarının oksidatif çökmesini ve organik bileşikler üzerinde

indirgeyici prosesi içerir (Egirani ve ark., 2018; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2017).

Tablo 1: Yaygın demir minerallerinin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri. (Temur, 2001)

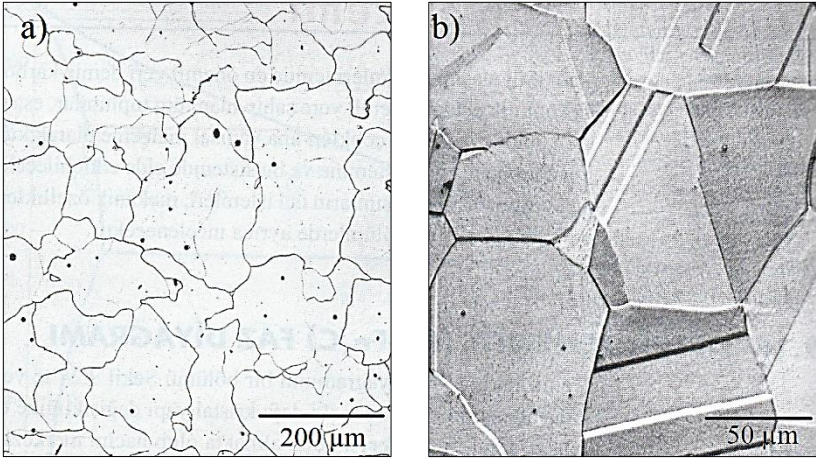
Mineral	Bileşim	Sertlik	Yoğ. g/cm ³	Renk	Çizgi Rengi
Ankerit	Ca(Mg,Fe)(CO ₂) ₂	3.5	3.3	Sarı, kahve	Beyaz, sarı
Arsenopirit	FeAsS	5.5-6	6-6.2	Gümüş beyazı	Siyah
Fe-hidroksit (limonit)	2Fe ₂ O ₃ .3H ₂ O	-	-	Kırmızımsı sarı, kahverengi	-
Franklinit	(Fe,Zn,Mn)O.(Fe, Mn) ₂ O ₃	5.2	5	Koyu kahve, kırmızımsı	Koyu kahve
Glaukonit	KMg(Fe,Al)(SiO ₃) ₆ .3H ₂ O	3	3.2	Değişken	-
Götüt	Fe ₂ O ₃ .H ₂ O	5-5.5	4.4	Rubi kırmızısı	Kırmızı
Greenallit	FeSiO ₃ .nH ₂ O	5.4	4.4	Kırmızı	Kırmızı
Hematit	Fe ₂ O ₃	1	5.2	Kırmızı	Kırmızı
Hidrotroilit	FeS.nH ₂ O	5.5	4.4	Sarı	Siyah
İlmenit	FeTiO ₃	5.5-6	4.7	Siyah	Kahve, siyah
Kalkopirit	FeCuS ₂	3.8	4.2	Tunç sarısı	Siyah
Manyetit	Fe ₃ O ₄	6	5.2	Siyah	Siyah
Markazit	FeS ₂	6-6.5	4.9	Soluk sarı	Siyah
Minnesotayit	(Fe,Mg) ₃ .Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	3.5	3.8	Kırmızı kahve	Koyu kırmızı
Pirit	FeS ₂	6-6.5	5.0	Soluk sarı	Siyah
Pirrotin	Fe _{1-x} S	4	4.6	Kahve-bronz	Siyah
Siderit	FeCO ₃	3.5-4	3.9	Kahveren.	Kahverengi
Stilpnomelan	2(Fe,Mg)O.(Fe,Al) ₂ O ₃ .5SiO ₂ .3H ₂ O	3.5	3.8	Kahveren.	Kahverengi
Şamozit	3(Fe,Mg)O.(Al,Fe) ₂ O ₃ .2(SiO ₂).nH ₂ O	3.5	3.8	Kahveren.	Kahverengi
Viviyanit	Fe ₃ (PO ₄) ₂ .8H ₂ O	4	3.4	Kahveren.	Kahverengi

1. OLUŞUM VE ÖZELLİKLER

Demiri (Fe) +2 ve +3 yüklü olarak iki farklı değerlikli iyonlar oluşturabilir. Endojen ortamlarda yani yerküre içerisinde meydana gelen iç olaylara bağlı olarak magmatizma ve metamorfizma sonucu oluşmuş yataklarda Fe⁺² yaygın olarak bulunur. Diğer taraftan eksojen ortamlarda yani

yerküre üzerinde meydana gelen dış olaylara bağlı olarak sedimantasyon, atmosferik ayrışmalar ve taşınma sonucu oluşmuş yataklarda Fe^{+3} daha yaygın olarak bulunmaktadır (Temur, 2001).

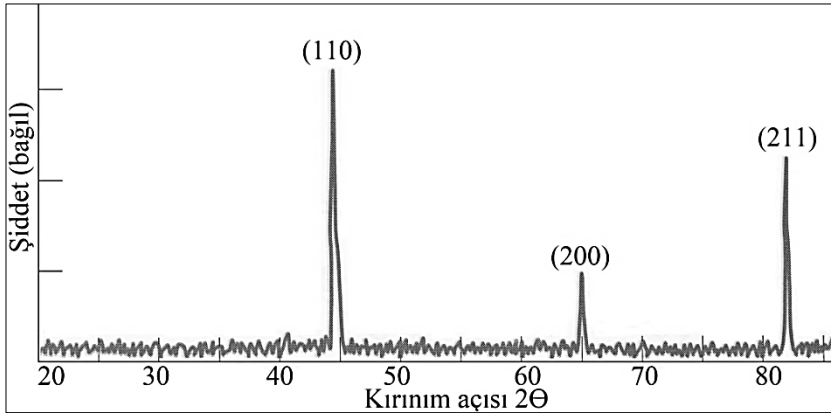
Demir, atmosferik basınçta hacim merkezli kübik (bcc) ve yüzey merkezli kübik (fcc) kristal yapılarına sahiptir. Saf demir ısıtılması sırasında ergimeden önce iki defa kristal yapı değişikliğine uğrar. Temel durumda hacim merkezli kübik α -fazı (ferrit) kararlıdır. α -Fe, $T=910.85^{\circ}C$ (A_3 noktası) sıcaklığında yüzey merkezli kübik γ -Fe'e (ostenit) dönüşür. Demirin, α -fazına (ferrit) ve γ -fazına (ostenit) ait mikroyapı fotoğrafları Şekil 2'de görülmektedir. Ostenit faz yapısı $1391.85^{\circ}C$ 'ye (A_4 noktası) kadar kararlıdır. Bu sıcaklığın üzerinde, demir tekrar hacim merkezli kübik fazına (δ -Fe) dönüşür ve erime sıcaklığı olan $T_m=1535.85^{\circ}C$ 'ye kadar bu fazda sabit kalır. α -Fe ve δ -Fe izomorfik olduğundan, ikisi genellikle hacim merkezli kübik Fe'den bahsedildiğinde ayırt edilmez. Hacim merkezli kübik ve yüzey merkezli kübik yapılar içeren çelikler genellikle sırasıyla "ferrit" ve "ostenit" olarak adlandırılır. Demirin kaynama noktası yaklaşık $3026.85^{\circ}C$ 'dir. Demirin üçüncü formu sıkı paket hegzagonal (hcp) yapıdır. Bu yapı yüksek basınç altında stabilize olabilir (Pepperhoff ve Acet, 2001). Sıkı paket hegzagonal yapı, basit hegzagonal yapının daha yoğun modifiye bir türüdür. Ergimiş demirin oda sıcaklığına soğutulması esnasında meydana gelen faz dönüşümlerinin sıcaklıkları, ısıtma esnasındaki sıcaklıklara yakın olarak gerçekleşir.



Şekil 2: a) α -Ferrit ($\times 90$) ve b) Ostenit ($\times 325$) fazlarına ait mikroyapı fotoğrafları (Callister ve Rethwisch, 2015)

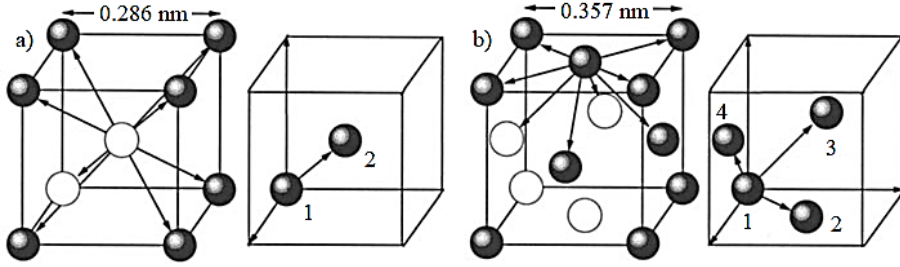
α -Fe, Curie sıcaklığı $T_C=767.85^{\circ}C$ 'ye kadar ferromanyetiktir. Şekil 3'de çok kristalli bir α -demirine ait X-Işınları kırınımı grafiği görülmektedir. Ferromanyetikten paramanyetik hale dönüşümün "sürekli" ikinci dereceden doğası eskiden A_2 dönüşümü olarak biliniyordu. A_3 ve A_4 paramanyetik demir

arası, β -Fe olarak adlandırıldı. Günümüzde α fazı ve β fazları artık ayırt edilmektedir. γ -Fe, kararlılık aralığında paramanyetiktir. Kuramsal olarak, γ -Fe kararlılık aralığının altında yaklaşık -223.15°C 'nin altında antiferromanyetik düzendedir.



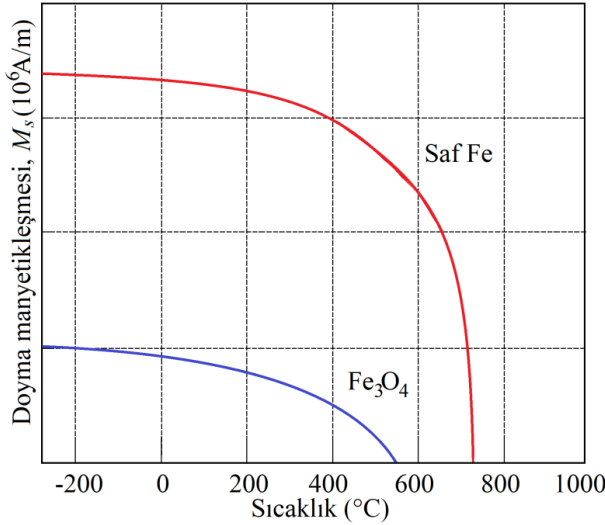
Şekil 3: Çok kristalli α -demiri için X-Işınları kırınımı diyagramı (Callister ve Rethwisch, 2015)

Metalik bağ, atomların mümkün olan en sıkı küresel paketlenmesini destekler. Bir atomun mümkün olduğu kadar çok sayıda en yakın komşuya sahip olması gerektiği ilkesine sahiptir (büyük bir koordinasyon sayısı n). Metaller dış elektronlarını kolaylıkla kaybedebilen elementler olduğundan kristal yapıları pozitif yüklü atom paketi şeklindedir. Elektronlar atomlar arasında serbestçe hareket edebildiğinden dolayı metaller iyi seviyede ısı ve elektrik iletkenliğine sahiptir. Yapının simetrisi ve atomik boşluk, atomlar arasındaki kuvvetler tarafından yönetilir. Serbest elektronlar ve çekirdekler arasında çekim kuvvetleri vardır. Elektronların ve çekirdeklerin kendileri arasında ise itici kuvvetler vardır. İtme ve çekme kuvvetlerinin dengelendiği mesafe, yaklaşık olarak en yakın komşu atomlar arasındaki mesafedir. En kararlı kristal simetrisi, atomların en güçlü biçimde bağlanmasıyla elde edilir. Mümkün olan en sıkı küresel paketleme yüzey merkezli kübik ve sıkı paket hegzagonal kristal yapılarında bulunmaktadır. Bu yapılarıdaki koordinasyon sayısı 12'dir. Diğer taraftan hacim merkezli kübik kristal yapısının koordinasyon sayısı 8'dir. Demir bu üç yapının hepsinde bulunabilir. α -Fe'in hacim merkezli kübik kafesi (21.85°C 'deki kafes sabiti a , 0.286 nm) Şekil 4a'da görülmektedir. Kafes sabiti a olan iç içe geçmiş basit kübik iki altkafesten oluşmaktadır. α -Fe'in atom yarıçapı 0.1241 nanometredir. γ -Fe'in yüzey merkezli kübik kafesi de (21.85°C 'deki kafes sabiti a , 0.357 nm) Şekil 4b'da görülmektedir (Pepperhoff ve Acet, 2001).



Şekil 4: a) Hacim merkezli kübik (bcc) kafes ve b) Yüzey merkezli kübik (fcc) kafes

Şekil 5’de saf Fe ve Fe_3O_4 için manyetikleşme-sıcaklık davranışı grafiği verilmiştir. Doyma manyetikleşmesi, ısıl titreşimlerin minimum olduğu 0 K’de maksimumdur. Sıcaklık artışı ile doyma manyetikleşmesinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Curie sıcaklığında (T_c) doyma manyetikleşmesi hızlı bir şekilde sıfıra düşmektedir. Curie sıcaklığında karşılıklı spin çifti arasındaki kuvvetler, hem ferrimanyetik hem de ferromanyetik malzemeler paramanyetik olacak şekilde tamamen etkisini yitirir. Her malzemenin kendisine özgü bir Curie sıcaklığı değeri bulunmaktadır. Fe ve Fe_3O_4 için sırasıyla 768 ve 585°C’dir (Callister ve Rethwisch, 2015).



Şekil 5: Fe ve Fe_3O_4 için doyma manyetikleşmesinin sıcaklıkla değişimi (Callister ve Rethwisch, 2015)

Demirin, 101.325 kPa (1 atm) basınç altındaki kendi kendine yanma sıcaklığı 350°C ve kaynama sıcaklığı 2861°C’dir. 20°C’deki yoğunluğu 7.87-8.20 gr/cm³, 20-22°C sıcaklıktaki suda çözünürlüğü ise 1-15 µg/L arasında değişmektedir. Demirin 20°C’deki ısıl iletkenlik katsayısı 0.18 cal/°C×cm×s,

ısı genleşme katsayısı $11.754 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, elektrik öz direnci 9.7×10^{-6} ohm \times cm, ortalama elastik modülü 29×10^6 psi değerindedir. Oda sıcaklığındaki demirin tavllanmış durumdaki akma dayanımı 130 MPa, çekme dayanımı 262 MPa, sünekliği (50 mm, %UZ) %45 ve özgül ısı 448 J/kg \cdot K değerindedir. Mohs sertliği 4, Vickers ve Brinell sertlikleri sırasıyla 608 ve 490 MPa'dır (Callister ve Rethwisch, 2015; European Chemicals Agency, 2023; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2022; Vlack, 1972).

Doğal demir oksitler yaygın olarak bulunmakta ve çeşitli türlerdeki yataklardan elde edilebilmektedir. Demir, düşük işletme tenörüne sahip olduğundan dolayı erken magmatik evreden sedimanter ve rezidüel zenginleşmeye kadar birçok ortamda derişik olarak yatak oluşturabilmektedir. Demir-çelik üretiminde kullanılan ve doğada yaygın olarak bulunan demir mineralleri hematit ve manyetittir. Bunlardan hematit esas olarak hidrotermal, metamorfik ve volkanik yatakları kapsayan tortul kökenli demir cevherinden kaynaklanır. Her yaştaki kayalarda serpilmiş konumda bulunabilen hematit, volkanik işleylemlerle sublimat olarak gelişebildiği gibi kontakt metazomatik yataklarla magmatik kayalarda ikincil mineral olarak bulunabilir. Kırmızı kumtaşlarında çimento maddesi olarak da sıkça gözlemlenir. Mafik ve ultramafik kayalar manyetit ile bağlantılıdır. Bu aynı zamanda skarn tipi metamorfik yataklarla da ilişkilidir. Manyetit, magmatik kayalar içerisinde sıklıkla serpili olarak bulunan bir mineraldir. Bu mineral magmatik ayrışmalarla yığışarak çok kıymetli maden yatakları oluşturur. Bu süreç içerisinde oluşan manyetit yataklarının çoğunlukla titan miktarının yüksek olduğu bilinmektedir. Bunun dışında manyetit, metamorfik kayalar ve kumlar arasında da bulunabilmektedir. (Cornelius ve Hurlbut, 1982; Egirani ve ark., 2018; Temur, 2001)

Demir yataklarını oluşum mekanizmaları ve bulunuş tiplerine göre gruplandırmak mümkündür. Bunlar titanlı demir yatakları, pinömatolitik demir yatakları, skarn tipi demir yatakları, hidrotermal demir yatakları, volkano-sedimanter demir yatakları, sedimanter demir yatakları, plaser demir yatakları ve kalıntı (lateritik) demir yataklarıdır. Bunlara ek olarak erken magmatik evrede ultramafik kayalarla ilişkili olarak oluşan stratiform manyetit yatakları, bataklik tipi süperjen demir yatakları ve metamorfik demir yatakları da bulunmaktadır (Temur, 2001).

Titanlı demir yatakları için Temur (2001) şöyle söylemiştir:

Titanlı demir yatakları bazik veya ultrabazik magmanın segregasyonu sırasında oluşurlar. Magmanın farklılaşması sırasında hornblendlerin kristalleşmesi halinde bünyelerine yüksek oranda demir ve titan almaktadır... Kristalleşmenin daha geç evresinde hornblendin yerine kristalleşen plajiyoklas, diyopsit, hipersten gibi mineraller ortamdaki demir ve titanın tamamını bünyelerine alamazlar. Bu yolla açığa çıkan demir ve titanyum konsantre olarak magma içinde aşağı doğru hareket eder. Silikat minerallerinin içine giremeyen bu elementler oksitler halinde kristalleşerek

titanlı demir yataklarının oluşumuna imkân verirler... Titanlı demir yataklarının ana cevher mineralleri titanomanyetit ve ilmenittir (s. 165).

Titanlı demir yatakları ince damarlar veya mercekler gibi düzenli yataklanmalar şeklinde olabildiği gibi düzensiz kütleler veya daha nadir olarak yankayaçlarla ardalı bantlar şeklinde de olabilmektedir. Cevherler genellikle masif, bantlı veya saçılımlı dokuda gözlemlenir. Büyük rezervli yatakların çoğu Prekambriyen yaşlı ultrabazik-bazik kayaçların içerisinde yer alırlar. Bu tip yataklar Baltık Kalkanı, Kanada Kalkanı, Hindistan ve Apalaşlar'da yaygındır (Temur, 2001).

Temur (2001) pinömatolitik demir yatakları için:

Genellikle asidik bileşimli sokulum kayaçlarının kenar zonlarında veya kontaktında gelişirler. Stokwork yapıları yaygındır.... Magma Benioff zonu boyunca yükselirken demiroksit ve apatit bakımından zengin eriyiklerden meydana gelen kısım siyenit ve keratofir bileşimli silikatlı kısımdan ayrılarak yankayaçların içinde demir yataklarının oluşumunu sağlamaktadır. Ortamın oksidasyon potansiyelinin düşük olması durumunda manyetit, yüksek olması durumunda ise hematit yatakları ortaya çıkmaktadır (s. 165,166).

Ülkemizdeki en önemli pinömatolitik demir yatakları örnekleri Malatya (Hekimhan-Hasançelebi) ve Sivas (Kangal-Pınargözü) illerinde bulunmaktadır.

Skarn tipi demir yatakları, kontakt-metazomatik süreçlerle gelişen yataklardır. "Genellikle asidik bileşimli sokulum kayaçlarına bağlı yüksek sıcaklıklı çözeltilerin karbonatlı yankayaçları metazomatozu ile magmatik sokulumun kontaktında veya yakın kesimlerinde ortaya çıkan demir yataklardır. Türkiye'de en önemli demir yataklarından birçoğu skarn tipindedir" (Temur, 2001, s. 166). Ortamdaki karbonatça zengin kayaçlar reaksiyonu kolaylaştırır. Bu tip yataklar ana olarak manyetit ve daha az oranda hematit içermektedir. Bol miktarda sülfütlü minerallere rastlanmasının yanı sıra titan minerallerine hemen hiç rastlanmaz. Ülkemizdeki en önemli örnekleri Ankara (Kesikköprü ve Çelebi), Antalya (Anamur-Melleç), Balıkesir (Şamlı, Yaşyer ve Ayazmant), Bolu (Yukarı Holoz), Çanakkale (Örtülüce), Elazığ (Aşvan), Erzincan (Bizmişen, Çaltı ve Ilıç), Giresun (Yağlıdere), Kayseri (Karamadazı), Kırklareli (Dereköy ve Karacadağ), Kütahya (Çatak ve Arapdede), Malatya (Hasançelebi ve Polat), Ordu (Yundalan), Rize (Kartiba), Sivas (Divriği-A Kafa ve B Kafa), Tekirdağ (Istranca-Demirköy) ve Yozgat (Karapınar ve Akçakışla) illerinde bulunmaktadır.

Genellikle mezotermal evre ürünü olarak ortaya çıkan hidrotermal demir yatakları, kontakt-metazomatik yatakların yan kolları olarak meydana gelmektedir. Hidrotermal demir yatakları, asidik bileşimli magmatik dönemin sonunda, demir içeriği zengin hidrotermal eriyiklerin ortam koşullarının değişimi (pH, Eh, soğuma, seyrelme) ile oluşturduğu yataklardır. Ülkemizdeki

en önemli örnekleri Adana (Aşılık), Batman (Tizi-Örenağıl), Malatya (Deveci ve Karakuz), Niğde (Armutbeli) ve Sivas (Pınarbaşı) illerinde bulunmaktadır.

Volcano-sedimanter demir yatakları, genellikle bazik, asidik ve nötr bileşimli denizaltı volkanizmasına bağlı olarak ortama katılan endojen demirin oksit mineralleri halinde çökmesi şeklinde oluşmuş tabakalı demir yataklarıdır. Ülkemizdeki en önemli örneği Balıkesir ilinde bulunan Büyük Eymir yatağıdır. Onun dışında Bingöl (Avnik) ve Malatya (Hekimhan-Deveci) illerinde de bulunmaktadır (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2017; Temur, 2001).

Demir rezervlerinin büyük bir kısmını sedimanter demir yatakları oluşturmaktadır. “Karalarda gelişen yüzey alterasyonu sırasında açığa çıkan demirin yüzey suları vasıtasıyla sedimantasyon havzalarına kadar taşınması ve buralarda çökelmeleriyle oluşur. Ayrıca demir metalinin kaynağı olarak daha yaşlı birincil maden yatakları, yüzey sularına veya deniz suyuna katılan hidrotermal çözeltiler gibi varsayımlar da ileri sürülmektedir” (Temur, 2001, s. 168). Sedimanter demir yatakları oluşum ortamları, yantaşları ve yaşları temel alınarak itibarlı demir yatakları, oolitik demir yatakları ve organik madde bakımından zengin ortamlarda oluşan siderit yatakları olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Ülkemizdeki en önemli örnekleri Sakarya (Çamdağ) ve Balıkesir (Edremit-Eymir) illerinde bulunmaktadır.

Plaser demir yatakları, kayaçların doğal etkenler sonucu ayrışması ve taşınması gibi yüzeysel süreçlerine dayanıklı olan demir minerallerinin akarsu yataklarında, birincil yatakların üzerinde ya da yakın kesimlerinde ve sahillerde birikmesi sonucunda oluşmuş olan yatak tipidir. Bu tip yataklarda manyetit ve hematitin yanı sıra götit, rodokrasit, şamozit ve limonit mineralleri gözlenir. Sivas ili Divriği yöresindeki C Plaseri örnek olarak verilebilir (Temur, 2001).

Tropikal veya subtropikal iklimlerde, penneplenize veya oldukça düzgün topografik yüzeylerde kimyasal ayrışmaya maruz kalan kayaç ve demir minerallerinden açığa çıkan demirin, diğer bileşenlerin yıkanarak ortamdan uzaklaşmasına bağlı olarak zenginleşmeleri sonucu ortaya çıkan ve bir miktar silis bulunduran demir hidroksit birikimlerine laterit denir. Demir bakımından ekonomik öneme sahip lateritler de lateritik yataklarını meydana getirirler (Temur, 2001, s. 173).

Ülkemizdeki en önemli örnekleri Manisa (Turgutlu-Çaldağ), Kayseri (Develi-Zileköy) ve Hatay (Dört Yol-Payas) illerinde bulunmaktadır.

Demir, gri veya gümüşü beyaz bir metaldir. Dövülebilir ve sünektir. Burada sünek terimi, ince teller şeklinde çekilebilen bir malzemeyi, dövülebilir terimi ise, ince levhalar halinde dövülebilir bir malzemeyi ifade etmektedir. Doğada bulunan üç manyetik elementten biri demirdir. Nikel ve kobalt diğer iki manyetik metaldir. Demir, güçlü çekme dayanımına ve basınç dayanımına sahip (nüfuz etmesi zor) nispeten sert bir metaldir. El aletleri, demiri kesmek, delmek, kaynak yapmak, bükme, dövme, öğütme ve

dağlamak için kullanılabilir. Daha büyük ekipman kullanılarak tormalanabilir, işlenebilir ve dökülebilir. Pratik olarak herhangi bir şekilde dönüştürülebilir ve bu şekli gerildiğinde bile koruyacaktır. Uyarlanabilir. Demirin birçok alaşımı vardır. Alaşıma ve ısıl işleme bağlı olarak çok sert ve kırılğan bir eģeden, yumuşak ve esnek bir balya teline kadar değişik ürünler elde edilebilir.

Tablo 2’de bazı demir esaslı malzemelerin kodları ve kimyasal bileşimleri verilmiştir.

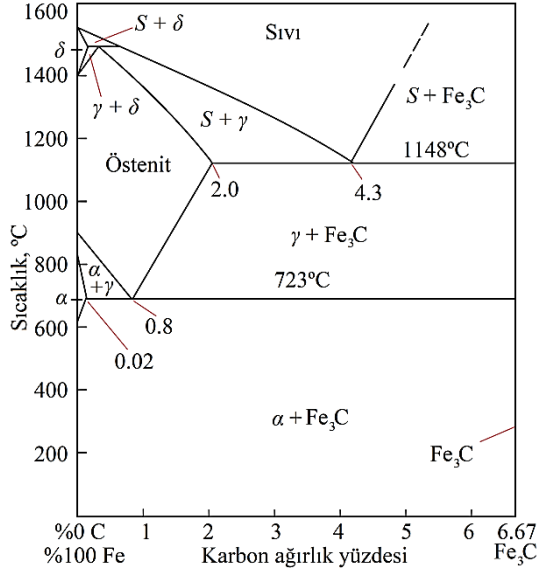
Tablo 2: Bazı demir esaslı malzemelerin kimyasal bileşimleri. (Callister ve Rethwisch, 2015)

Alaşım (UNS Kodu)	Bileşim (ağırlıkça %)
Basit Karbonlu ve Düşük Alaşımli Çelikler	
A36 (ASTM A36)	98.0 Fe (min), 0.29 C, 1.0 Mn, 0.28 Si
1020 (G10200)	99.1 Fe (min), 0.20 C, 0.45 Mn
1040 (G10400)	98.6 Fe (min), 0.40 C, 0.75 Mn
4140 (G41400)	96.8 Fe (min), 0.40 C, 0.90 Cr, 0.20 Mo, 0.90 Mn
4340 (G43400)	95.2 Fe (min), 0.40 C, 1.8 Ni, 0.80 Cr, 0.25 Mo, 0.70 Mn
Paslanmaz Çelikler	
304 (S30400)	66.4 Fe (min), 0.08 C, 19.0 Cr, 9.25 Ni, 2.0 Mn
316 (S31600)	61.9 Fe (min), 0.08 C, 17.0 Cr, 12.0 Ni, 2.5 Mo, 2.0 Mn
405 (S40500)	83.1 Fe (min), 0.08 C, 13.0 Cr, 0.20 Al, 1.0 Mn
440A (S44002)	78.4 Fe (min), 0.70 C, 17.0 Cr, 0.75 Mo, 1.0 Mn
17-7PH (S17700)	70.6 Fe (min), 0.09 C, 17.0 Cr, 7.1 Ni, 1.1 Al, 1.0 Mn
Dökme Demirler	
G1800 (F10004)	Fe (kalan), 3.4-3.7 C, 2.8-2.3 Si, 0.65 Mn, 0.15 P
G3000 (F10006)	Fe (kalan), 3.1-3.4 C, 2.3-1.9 Si, 0.75 Mn, 0.10 P
G4000 (F10008)	Fe (kalan), 3.0-3.3 C, 2.1-1.8 Si, 0.85 Mn, 0.07 P
60-40-18 (F32800)	Fe (kalan), 3.4-4.0 C, 2.0-2.8 Si, 0-1.0 Ni, 0.05 Mg
80-55-06 (F33800)	Fe (kalan), 3.3-3.8 C, 2.0-3.0 Si, 0-1.0 Ni, 0.05 Mg
120-90-02 (F36200)	Fe (kalan), 3.4-3.8 C, 2.0-2.8 Si, 0-2.5 Ni, 0-1.0 Mo, 0.05 Mg

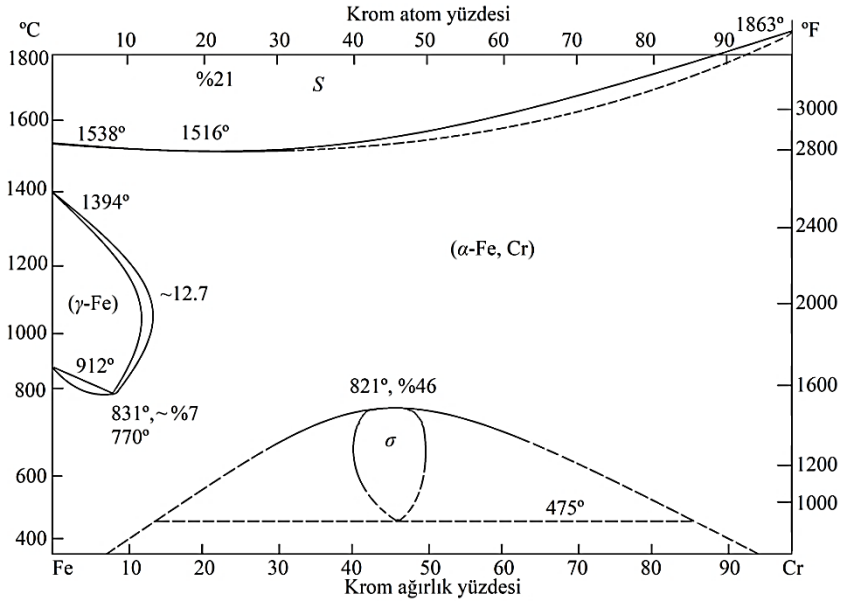
Çok yavaş soğutulmuş demir-karbon alaşımlarında çeşitli bileşim ve sıcaklıklarda %6.67 karbona kadar meydana gelen fazlar Şekil 6’daki Fe-Fe₃C faz çizelgesinde görülmektedir. Bu faz çizelgesi α ferrit, östenit (γ), sementit (Fe₃C) ve δ ferrit katı fazlarını içermektedir.

Paslanmaz çeliklerin, paslanmaz özellik gösterebilmesi için gerekli olan en az %12 oranındaki krom, bu çeliklerin birçok ortamda mükemmel şekilde yenim direnci göstermesini sağlamaktadır. Demir-krom faz çizelgesi Şekil 7’de görülmektedir. Paslanmaz çeliğin genel bir sınıflandırma ile dört türü

bulunmaktadır. Bunlar ferritli, martenzitli, östenitli ve çökeltili sertleşen olarak isimlendirilebilmektedir.



Şekil 6: Demir-demir karbür (Fe-Fe₃C) faz çizelgesi (Smith, 2001)



Şekil 7: Demir-krom faz çizelgesi (Smith, 2001)

Tablo 2’de verilen demir esaslı malzemelerin önemli özellikleri Tablo 3, 4 ve 5’te verilmiştir.

Tablo 3: Bazı demir esaslı malzemelerin oda sıcaklığındaki akma dayanımı, çekme dayanımı, yüzde kopma uzaması cinsinden süneklik değerleri. (Callister ve Rethwisch, 2015)

Malzeme/Durumu		Akma Dayanımı MPa (<i>ksi</i>)	Çekme Dayanımı MPa (<i>ksi</i>)	Kopma Uzaması (%)
A36	SH	220-250 (32-36)	400-500 (58-72.5)	23
1020	SH	210 (30) (min)	380 (55) (min)	25 (min)
	SÇ	350 (51) (min)	420 (61) (min)	15 (min)
	T (870°C)	295 (42.8)	395 (57.3)	36.5
	N (925°C)	345 (50.3)	440 (64)	38.5
1040	SH	290 (42) (min)	520 (76) (min)	18 (min)
	SÇ	490 (71) (min)	590 (85) (min)	12 (min)
	T (785°C)	355 (51.3)	520 (75.3)	30.2
	N (900°C)	375 (54.3)	590 (85)	28.0
4140	T (815°C)	417 (60.5)	655 (95)	25.7
	N (870°C)	655 (95)	1020 (148)	17.7
	YSVT/TP	1570 (228)	1720 (250)	11.5
4340	T (810°C)	472 (68.5)	745 (108)	22
	N (870°C)	862 (125)	1280 (185.5)	12.2
	YSVT/TP	1620 (235)	1760 (255)	12
304	PÇ	205 (30) (min)	515 (75) (min)	40 (min)
	SŞ/T	515 (75) (min)	860 (125) (min)	10 (min)
316	SŞ/T	205 (30) (min)	515 (75) (min)	40 (min)
	SÇ/T	310 (45) (min)	620 (90) (min)	30 (min)
405	T	170 (25)	415 (60)	20
440A	T	415 (60)	725 (105)	20
	TP	1650 (240)	1790 (260)	5
17-7PH	SoH	1210(175) (min)	1380 (200) (min)	1 (min)
	ÇS	1310(190) (min)	1450 (210) (min)	3.5(min)
G1800 (DS)		-	124 (18) (min)	-
G3000 (DS)		-	207 (30) (min)	-
G4000 (DS)		-	276 (40) (min)	-
60-40-18 (T)		276 (40) (min)	414 (60) (min)	18 (min)
80-55-06 (DS)		379 (55) (min)	552 (80) (min)	6 (min)
120-90-02 (YSVT)		621 (90) (min)	827 (120) (min)	2 (min)

SH: Sıcak haddelenmiş, SÇ: Soğuk çekilmiş, T: Tavlanmış, N: Normalleştirilmiş, YSVT: Yağda su verilmiş ve temperlenmiş, TP: 315°C'de temperlenmiş, PÇ: Paslanmaz çelikler, SŞ: Sıcak şekillendirilmiş, SoH: Soğuk haddelenmiş, ÇS: 510°C'de çökeltme sertleştirilmiş, DS: Döküm sonrası

Tablo 4: Bazı demir esaslı malzemelerin oda sıcaklığındaki yoğunluk, elastik modül, poisson oranı ve kırılma tokluğu değerleri. (Callister ve Rethwisch, 2015)

Malzeme	Yoğunluk g/cm ³	Elastik Modülü GPa	Poisson Oranı	Kırılma Tokluğu MPa
A36	7.85	207	0.30	-
1020	7.85	207	0.30	-
1040	7.85	207	0.30	54
4140	7.85	207	0.30	75-93 [#]
4340	7.85	207	0.30	87.4 ^{##}
304	8.00	193	0.30	-
316	8.00	193	0.30	-
405	7.80	200	0.30	-
440A	7.80	200	0.30	-
17-7PH	7.65	204	0.30	76 ^{###}
G1800	7.30	66-97 [*]	0.26	-
G3000	7.30	90-113 [*]	0.26	-
G4000	7.30	110-138 [*]	0.26	-
60-40-18	7.10	169	0.29	-
80-55-06	7.10	168	0.31	-
120-90-02	7.10	164	0.28	-

*Sekant modülü çekme dayanımının %25'i olarak alınmıştır, [#]482°C'de temperlenmiş, ^{##}425°C'de temperlenmiş, ^{###}510°C'de yaşlandırılmış

Demir çok çeşitli kullanım alanlarına sahip olduğu için günlük hayatımızda büyük öneme sahiptir. İnşaat sektörü, mıknatıs yapımı, katalizör olarak ve insan vücudunda çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Demir, inşaat sektörü için gerekli olan çeliğin üretiminde kullanılır. Krom, tungsten, nikel, mangan ve vanadyum gibi katkı maddeleri içeren alaşımli çelikler yapmak için kullanılır. Köprüler, elektrik direkleri, bisiklet zincirleri, kesici aletler ve tüfek namluları alaşımli çelikler ile üretilmektedir. Dökme demir %3-5 karbon içerir. Dökme demir ile borular, vanalar ve pompalar üretilir. Demir bunların yanı sıra inşaat kalıpları, betonarme, kirişler ve çeşitli inşaat malzemeleri üretmek için de kullanılır. Mıknatıs yapımında demir kullanılır. Genellikle manyetit olarak bilinen demir, doğal olarak oluşan kalıcı bir mıknatıstır. Nötr demirin her atomunun dört eşleşmemiş elektronu vardır. Her elektron çok küçük bir mıknatıstır. Ancak manyetik özelliklerin görülebilmesi için, neredeyse aynı yönde dizilmiş çok sayıda bu tür küçük mıknatıslara ihtiyaç duyulmaktadır. Demir katalizörler, çeşitli kimyasal reaksiyonlarda reaksiyonun hızını arttırmak veya iyileştirmek için kullanılır. Demir, Haber sürecinde olduğu gibi reaksiyonu hızlandırmak için katalizör olarak kullanılır. Haber süreci, amonyak yapmak için temel bileşenler olarak hidrojen ve nitrojeni kullanan endüstriyel bir süreçtir.

Tablo 5: Bazı demir esaslı malzemelerin oda sıcaklığındaki ısı genleşme katsayısı, ısı iletim katsayısı, özgül ısı, elektrik öz direnci değerleri. (Callister ve Rethwisch, 2015)

Malzeme	Isıl Genleşme Katsayısı $10^{-6}(\text{°C})^{-1}$	Isı İletim Katsayısı W/m·K	Özgül Isı J/kg·K	Elektrik Öz Direnç $\Omega \cdot \text{m}$
A36	11.7	51.9	486**	1.60×10^{-7}
1020	11.7	51.9	486**	1.60×10^{-7}
1040	11.3	51.9	486**	1.60×10^{-7}
4140	12.3	-	-	2.20×10^{-7}
4340	12.3	-	-	2.48×10^{-7}
304	17.2	16.2*	500	7.20×10^{-7}
316	16.0	15.9*	502	7.40×10^{-7}
405	10.8	27.0*	460	6.00×10^{-7}
440A	10.2	24.2*	460	6.00×10^{-7}
17-7PH	11.0	16.4*	460	8.30×10^{-7}
G1800	11.4	46.0	544	15.0×10^{-7}
G3000	11.4	46.0	544	9.50×10^{-7}
G4000	11.4	46.0	544	8.50×10^{-7}
60-40-18	11.2	36.0	544	5.50×10^{-7}
80-55-06	10.6	36.0	544	6.20×10^{-7}
120-90-02	-	36.0	544	6.20×10^{-7}

*Tavllanmış, **50°C ile 100°C arasında

2. YAPI SEKTÖRÜNDEKİ UYGULAMA ALANLARI

Metaller ilk olarak yapıların yapımından ziyade süslenmesinde kullanılmıştır. Şimdilerde ise metaller inşaat sektöründe birçok kullanım alanına sahiptir. İnşaat endüstrisinin ilerlemesi ile birlikte demir gibi metaller çivi ve menteşe gibi ürünlerin imalatında kullanılmaktadır. Metalik madenler içerisinde en çok kullanılanlardan birisi demirdir. Ülkelerin kalkınmasında önemli bir yeri olan demir, inşaat malzemeleri, çimento, demiryolu, otomotiv, vagon, gemi, uçak, cihaz, makine ve birçok eşyanın üretiminde kullanılmaktadır. Demir birçok farklı sektörde kullanılıyor olsa da günümüzde en yüksek miktarda inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Özellikle binayı meydana getiren betonun daha dayanıklı olması için demir kullanımı oldukça önemlidir. Betonarmede kullanılan çelik demirler yumuşak çelik, orta sertlikte çelik veya sert çelik özelliğinde olan düz ve nervürlü çubuklar şeklinde olmalıdır. Ülkemizde beton donatısı olarak kullanılacak çeliklerin TS 708:2016, TS 9914, TS EN 10059 ve TSE K 591 standartlarına uygun olması gerekmektedir. Bazı ülkelerin betonarme donatısı çeliği için istemekte olduğu standartlar ve kaliteler Tablo 6'da yer almaktadır.

Tablo 6: Beton donatısı olarak kullanılacak çeliklerin uluslararası standartları ve kaliteleri.

Ülke	Standart	Çelik sınıfı
Türkiye	TS 708:2016	S420, B420B, B420C, B500B, B500C
	TS 9914	
	TS EN 10059 TSE K 591	S235JR, S275 JR B600W
Almanya	DIN 488-2009/2010-01	B500B
Avustralya	AS/NZS 4671:2019	D500N
Brezilya	ABNT NBR 7480:2007	CA 50
Bulgaristan	BDS 9252:2007	B500C
Fransa	NF A 35-080-1	B500B
Hindistan	IS 1786:2008	Fe500, Fe500D, Fe500S, Fe550, Fe550D, Fe600
Hollanda	NEN 6008 BRL 0501	B500B
İngiltere	BS 4449 2005	B500B
	BS 4449 2005	B500C
Kolombiya	NTC 2289-2015	Grade 60
Kosta Rika	INTE C400:2020 (ASTM A 615M – 20) INTE C401:2020 (ASTM A 706/A 706M – 16)	Grade 40, Grade 60 S, Grade 60 W, Grade 80 W
Litvanya	LST EN 10080:2006	B500B
Malezya	MS 146 : 2014	B500B
	MS EN 10025-2 : 2011	S275
Romanya	ST 009-2011	B500C
Rusya		A500C
	R 52544-2006	A600C
Sırbistan	SRPS EN 10080:2008	B500B
Yemen	ASTM A 615	Grade 40

TS 708, Çelik-Betonarme için-Donatı çeliği başlıklı standart, betonarme yapılarda kullanım için çubuk, kangal (çubuk, tel) ve doğrultulmuş kangal biçimlerde imal ve teslim edilen kaynaklanabilir ve kaynaklanmaz donatı çeliğinin performans özelliklerine ilişkin genel gerekleri ve tarifleri kapsamaktadır. Elementlerin her birinin en yüksek değeri ve karbon eş değeri, Tablo 7’de verilen değerlerin üzerinde olmamalıdır. Bu standarda göre, mamullerin dayanıklılığı Tablo 7’de tanımlanmış kimyasal bileşime göre tayin edilir. Tablo 8’de, TS 708:2016 kapsamına giren çeliklerin sahip olması gereken mekanik özellikleri görülmektedir.

Tablo 7: TS 708:2016'ya göre kimyasal bileşim (en çok %). (Türk Standardları Enstitüsü, 2016)

Çelik sınıfı	C ^a	S	P	N ^b	Cu	Ceq ^a
S 220	0.25	0.050	0.050	-	-	-
S 420	0.45	0.050	0.050	-	-	-
B 420 - B 500	0.22	0.050	0.050	0.012	0.80	0.50
Mamuldeki en büyük sapma değeri	0.02	0.005	0.005	0.002	0.05	0.02

^a Karbon eş değeri. Kütlece %0.02 oranından az olması şartıyla, en büyük karbon değerinin kütlece %0.03 oranından fazla olmasına izin verilir.

^b Yeterli miktarda azot bağlayıcı element varsa, daha yüksek azot ihtiva etmesine izin verilir.

Tablo 8: TS 708:2016'ya göre mekanik özellikler. (Türk Standardları Enstitüsü, 2016)

Tip	Düz Yüzeyle	Nervürlü					Profilli ^a
Sınıf	S 220	S420	B 420B	B 420C	B 500B	B 500C	B 500A
Akma dayanımı (en az) R_e (N/mm ²)	220	420	420	420	500	500	500
Çekme dayanımı (en az) R_m (N/mm ²)	340	500	-	-	-	-	550
Çekme dayanımı/akma dayanımı oranı R_m/R_e	1.20 (en az)	1.15 (en az)	1.08 (en az)	g 1.15 <1.35	1.08	g 1.15 <1.35	-
DeneySEL akma dayanımı/karakteristik akma dayanımı oranı $R_{act}/R_{e\ nom}$ (max)	-	1.30	-	1.30	-	1.30	-
Kopma uzaması (en az) A_5 (%)	18	10	12	12	12	12	5
En büyük yükte toplam uzama (en az) A_{gt} (%)	-	-	5	7.5	5	7.5	2.5
Bükme açısı (°)	180		-				
Bükme açısı/geri (ters) bükme açısı	-		90/20				

^a Soğuk mekanik işlem uygulanarak da imal edilebilir.

TS 708:2016 standardı içerisinde mekanik özelliklere ilişkin deney şartları, çekme özellikleri ve bükmeye elverişlilik ile ilgili tanımlar mevcuttur. Ayrıca bu standartta çap, enkesit alanı, birim uzunluk kütlesi, toleranslar, çubukların uzunluğu, kangal kütlesi, yüzey geometrisi, B sınıf çelikler için yorulma kriterleri, ülke kodu, firma kodu vs. gibi bilgiler de bulunmaktadır.

TS 708:2016'ya göre ülke kodu, Tablo 9'de gösterildiği gibi, 1 ve 9 arasında bir rakamla belirtilmelidir.

Tablo 9: TS 708:2016'ya göre ülkenin tanıtımı. (Türk Standardları Enstitüsü, 2016)

Ülke	Kod
Avusturya, Çek Cumhuriyeti, Almanya, Polonya, Slovakya	1
Belçika, Hollanda, Lüksemburg, İsviçre	2
Fransa, Macaristan	3
İtalya, Malta, Slovenya	4
İngiltere, İrlanda, İzlanda	5
Danimarka, Estonya, Finlandiya, Letonya, Litvanya, Norveç, İsveç	6
Portekiz, İspanya	7
Güney Kıbrıs, Yunanistan	8
Türkiye ve diğer ülkeler	9

Tablo 10'da, Almanya DIN 488:2009-08 (B500B), Avustralya AS/NZS 4671:2019 (D500N), Brezilya ABNT NBR 7480:2007 (CA 50) ve Kolombiya NTC 2289-2015 (Grade 60) standartlarına göre elementlerin her birinin en yüksek değeri ve karbon eş değeri verilmiştir.

Tablo 10: DIN 488:2009-08, AS/NZS 4671:2019, ABNT NBR 7480:2007 ve NTC 2289-2015'e göre kimyasal bileşim (en çok %).

Çelik sınıfı	C	S	P	N	Cu	Mn	Si	Ceq
B500B	0.22	0.050	0.050	0.012	0.60	-	-	0.50
D500N	0.22	0.050	0.050	-	-	-	-	0.44
CA 50	0.35	0.050	0.050	-	-	1.50	0.50	0.55
Grade 60	0.30	0.045	0.035	-	0.55	1.50	0.50	0.55

Tablo 11'de, DIN 488:2009-08, AS/NZS 4671:2019, ABNT NBR 7480:2007 ve NTC 2289-2015 kapsamına giren çeliklerin sahip olması gereken mekanik özellikleri görülmektedir.

Tablo 11: DIN 488:2009-08, AS/NZS 4671:2019, ABNT NBR 7480:2007 ve NTC 2289-2015'e göre mekanik özellikler.

Sınıf	B500B	D500N	CA 50	Grade 60
Akma sınırı R_e (N/mm ²)	500-650	500-650	500 (en az)	420-540
Çekme dayanımı R_m (N/mm ²)	-	-	-	550
R_m/R_e (en az)	1.08	1.08	1.08	1.25
Uzama (en az) A_{gt} (%)	5	5	5	-
Uzama (en az) A200 (%)	2-3-4-5-6	-		14
	7-8-9-10-11			12
	14-18			10

3. DÜNYA FAALİYETLERİ

2019 yılı sonlarında başladığı tespit edilen COVID-19 salgını nedeniyle bazı ülkelerin madencilik faaliyetlerinde yavaşlamalar olduğu görülmektedir. Demir cevheri, dünyanın demir ve çelik endüstrileri için birincil demir kaynağıdır. Bu nedenle demir cevheri, güçlü bir endüstriyel temeli sürdürülebilmek için gerekli olan çelik üretiminde çok önemlidir. Demir cevherinin neredeyse tamamı (%98) çelik üretiminde kullanılmaktadır. Demir cevheri yaklaşık olarak 50 ülkede çıkarılmaktadır. Bu üretici ülkelerin en büyük üçü, 2021 yılı verilerine göre dünya toplam üretiminin üçte ikisinden fazlasını oluşturmaktadır. Avustralya ve Brezilya, dünya toplam ihracatının yaklaşık üçte birine sahip olan ülkelerdir.

3.1. Üretim

Ham demir cevherinin dünya rezervleri toplamı yaklaşık olarak 800 milyar ton civarındadır. Bu rezerv 230 milyar tondan fazla demir içeriğine sahiptir (U.S. Geological Survey, 2023). Bazı ülkelerin ham demir cevheri rezerv miktarları ve bu rezervlere ait demir miktarları Tablo 12'de verilmiştir. Birçok ülkede demir cevherine ait rezerv tespit çalışmaları yapılmadığı için bu ülkelere ait net bir rezerv miktarlarının verilebilmesi mümkün değildir.

Dünyadaki demir cevherleri rezervlerinin bazıları tenör ve safsızlık miktarı açısından yüksek fırınlarda doğrudan kullanılabilir özelliklere sahiptir. Ancak bazı rezervlerde kullanım amacına uygun olarak tüvenan cevher içerisinde bulunan safsızlıkların azaltılarak demir tenörlerinin yükseltilmesi gerekmektedir. Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , Na_2O gibi oksitler ile Cu, Ti, Pb, Zn, As, P, S gibi elementler ve bileşikleri yüksek fırınlarda sorun oluşturan ve çelik üretiminde istenmeyen safsızlıklardır. Bunun dışında demirli cevherin kırılması ve öğütülmesi işlemlerinden sonra serbest hale gelen demir dışındaki bazı minerallerin zenginleştirme işlemleri ile

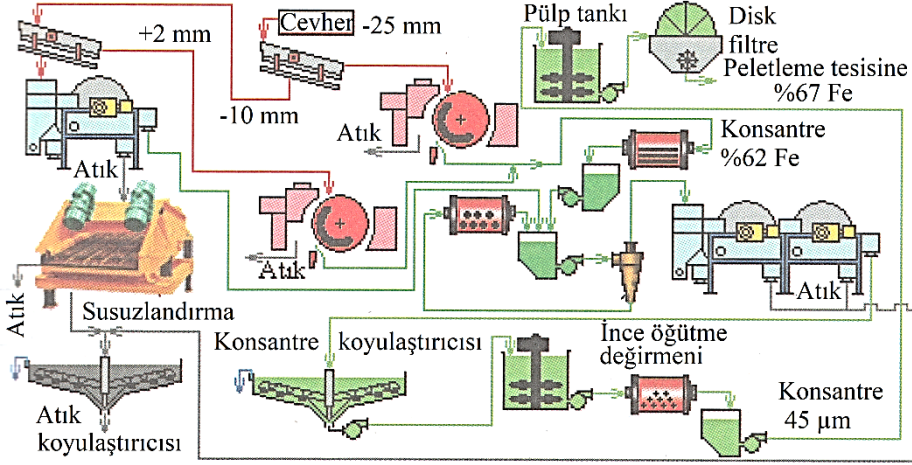
ekonomiye kazandırılması mümkündür. Örneğin apatitli demir cevherinin zenginleştirilmesi sonucu ortaya çıkan fosfor gübre üretiminde kullanılabilir.

Tablo 12: Bazı Ülkelerin Demir Rezervi (ton). (U.S. Geological Survey, 2023; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2022)

Ülkeler	Ham Cevher	Demir İçeriği
Türkiye	130000000	38000000
Avustralya	51000000000	27000000000
Brezilya	34000000000	15000000000
Rusya	29000000000	14000000000
Çin	20000000000	6900000000
Hindistan	5500000000	3400000000
Ukrayna	6500000000	2300000000
Kanada	6000000000	2300000000
İran	2700000000	1500000000
Peru	2600000000	1200000000
ABD	3000000000	1000000000
Kazakistan	2500000000	900000000
Güney Afrika	1000000000	670000000
İsveç	1300000000	600000000

Demir cevherinin yüksek fırın veya sünger demir üretiminde kullanılabilmesi için sinterleme ya da peletleme yapılmalıdır. Bu işlem esnasında arsenik ve kükürt gibi uçucu safsızlıklar cevher bünyesinden uzaklaşmaktadır. Demir cevherine ilk aşamada çeneli veya konili kırıcılar ile kırma işlemi yapılır. Kırılmış cevher bant konveyörler vasıtasıyla zenginleştirme tesisine taşınmaktadır. Daha sonra kullanım amacına uygun olarak belirli bir serbestleşme boyutuna indirilmesi amacıyla öğütme işlemi uygulanır. Demir cevherinin öğütme işleminde genellikle birinci kademede çubuklu, sonrasındaki kademelerde bilyalı değirmenler kullanılır. Zenginleştirilmiş konsantrenin peletlenebilmesi için 45 µm tane boyutuna kadar öğütülmesi gerekir. Zenginleştirme işleminde demir cevherinin yoğunluğu, manyetik ve elektriksel özellikleri ile kavurma sonrası manyetik özellikleri önemlidir. Eğer flotasyon yapılacaksa yüzey özelliklerinin de bilinmesi gerekir. Demir cevherinin zenginleştirilmesinde elle ayıklama, sarsıntılı masa, koniler, spiraller, ağır ortam ayırıcıları, jigler, manyetik ayırıcılar ve flotasyon yöntemi kullanılabilir. Şekil 8’de Divriği konsantre tesisinin kuruluş akım şeması verilmiştir. Bu tesis %54 Fe tenörlü

manyetit cevherinin zenginleştirilmesi amacıyla 4×10^6 t/yıl (670 t/s) kapasitede tasarlanmıştır (Yıldız, 2014).



Şekil 8: Divriği demir cevheri zenginleştirme tesisi akım şeması (Yıldız, 2014)

2021 yılı verilerine göre başlıca demir cevheri üreticisi ülkeler üretim miktarları göz önüne alındığında Avustralya, Çin, Brezilya, Hindistan, İran, Rusya, Ukrayna, Güney Afrika, Kazakistan, Kanada, ABD, İsveç, Meksika, Şili ve Türkiye olarak sıralanabilir. Diğer ülkelerin üretim değerleri düşük seviyelerdedir. 2021 yılı verilerine göre Türkiye, dünyadaki demir cevheri üreticisi ülkeler arasında 15. sırada yer almaktadır (Tablo 13).

Dünya demir cevheri üretim miktarı 2018 yılında 2945×10^6 ton iken 2021 yılına bakıldığında 3108×10^6 ton olduğu görülmektedir (Tablo 13). Yaklaşık olarak 163×10^6 ton kadar bir artış gözlenmiştir. 2018-2021 yılı periyodunda en yüksek üretim miktarı 2021 yılında elde edilmiştir. Üretim miktarındaki bu artışın sebebi tüketim miktarının artışına bağlı olabilir. 2021 yılındaki demir cevheri üretiminin yaklaşık olarak %77'lik kısmını Avustralya, Çin, Brezilya ve Hindistan oluşturmaktadır. Dünya demir cevheri üretimine bakıldığında, Avustralya lider konumda olan ülkedir. Onu Çin takip etmektedir. Avustralya, küresel toplamın %29'u ile dünyanın en ekonomik demir cevheri kaynaklarına sahiptir. Toplam ham rezerv miktarı 51 milyar tondur. Bu rezervin demir içeriği 27 milyar tondur. Avustralya'da bulunan demir cevheri yataklarının büyük bir kısmı Yeni Güney Galler (Broken Hill), Güney Avustralya (Eyre Yarımadası, Razorback, Port Pirie), Tazmanya, Victoria ve Batı Avustralya'da (Kimberley, Geraldton, Yilgarn, Pilbara, vs.) bulunmaktadır. Avustralya'da demir cevheri üretimi yapan en büyük firmalar Rio Tinto, BHP Group ve Fortescue Metals olarak verilebilir (Australian Government, 2020; U.S. Geological Survey, 2023).

Tablo 13’de, 2018 yılından 2021 yılına kadar olan süreçte Avustralya, Çin, İran, Rusya, Ukrayna, Kazakistan, İsveç ve Meksika’da demir cevheri üretim miktarlarının bir önceki yıla kıyasla arttığı söylenebilir. 2020 ve 2021 yılları kıyaslandığında ise Türkiye, Hindistan ve Kanada’da demir cevheri üretim miktarlarının azaldığı, Avustralya, Çin, Brezilya, İran, Rusya, Ukrayna, Güney Afrika, Kazakistan, ABD, İsveç, Meksika ve Şili’de ise demir cevheri üretim miktarlarının arttığı gözlenmiştir.

Tablo 13: Ülkelerin 2018-2021 Yılları Arasındaki Demir Cevheri Üretimi (ton). (British Geological Survey, 2023; Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, 2023; U.S. Geological Survey, 2023)

Ülkeler	2018	2019	2020	2021
Türkiye	15650305	14473363	21454649	16051308
Avustralya	907818648	917045579	918063223	922159323
Çin	763374000	844356000	845000000	850000000
Brezilya	450393000	396841000	387990000	430550725
Hindistan	206446000	246081000	204481000	198300000
İran	93365420	91778118	104818915	104900000
Rusya	96100000	97500000	100200000	100600000
Ukrayna	60549000	76134000	78837700	79000000
Güney Afrika	74263738	72430288	55635421	73090918
Kazakistan	41876500	45221900	62865000	64089700
Kanada	52358000	59013000	60059572	57491803
ABD	49500000	46900000	38100000	47500000
İsveç	35774000	38913000	39228000	41313000
Meksika	21244460	26089068	27208553	27500000
Şili	14013000	13137000	15553000	17685000
Diğer Ülkeler	62273929	70086684	69504967	77768223
Toplam	2945000000	3056000000	3029000000	3108000000

Türkiye’de 60’a yakın ilde tespit edilmiş olan 2000’in üzerinde demir cevheri yatakları ve zuhurları mevcuttur. Bu yataklar ve zuhurlar coğrafi olarak Sivas-Malatya bölgesi, Hatay-Kilis bölgesi, Çaldağ (Manisa) bölgesi, Çanakkale-Balıkesir bölgesi, Kayseri-Adana bölgesi, Giresun bölgesi, İçel bölgesi ve diğer kesimler olmak üzere sekiz bölgeye ayrılabilir. Türkiye’de 2021 yılı verilerine göre 164 adet demir sahası işletme ruhsatı verilmiştir. Bu sahaların il bazında dağılımlarına bakıldığında 9 adet Adana, 1 adet Adıyaman, 2 adet Ankara, 6 adet Balıkesir, 8 adet Bingöl, 2 adet Bitlis, 1 adet Burdur, 2 adet Çanakkale, 1 adet Diyarbakır, 6 adet Elazığ, 7 adet Erzincan, 3 adet Eskişehir, 1 adet Gaziantep, 1 adet Giresun, 2 adet Gümüşhane, 5 adet Hatay, 3 adet Kütahya, 7 adet Kahramanmaraş, 13 adet Kayseri, 1 adet Kilis, 3 adet Kırıkkale, 6 adet Kırşehir, 1 adet Kocaeli, 1 adet Konya, 26 adet Malatya, 2 adet Manisa, 5 adet Mersin, 3 adet Niğde, 4 adet

Osmaniye, 2 adet Sakarya, 1 adet Samsun, 1 adet Şırnak, 19 adet Sivas, 4 adet Uşak, 2 adet Van ve 3 adet Yozgat şeklinde oluşmaktadır (Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, 1977; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2022; Temur, 2001).

Sivas ilindeki en önemli demir yatağı, Divriği'deki %45-61 Fe tenörlü yaklaşık 65.4 milyon ton görünür+muhtemel rezervli demir yatağıdır. Adana ili Feke-Mansurlu bölgesi ise, demir rezervleri ve üretim miktarları açısından Türkiye'de ikinci önemli bölge konumundadır. Bu bölgede yer alan Attepe demir yatağında %58.38 Fe_2O_3 içerikli yaklaşık 2 milyon ton rezerv, Mağarabeli yatağında toplam 7.5 milyon ton görünür rezerv, Aşılık demir yatağında ise %52.93 Fe içerikli yaklaşık 3.1 milyon ton rezerv belirlenmiştir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2010a; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2010b).

Türkiye'de üretilen sıvı çeliğin büyük bir kısmı cevherden üretim yapan Yüksek Fırınlı Bazik Oksijen Fırınlı (BOF) entegre demir çelik tesislerinde ve hurdadan üretim yapan Elektrik Ark Fırınlı (EAF) (IF dahil) tesislerde gerçekleştirilmektedir. Türkiye'deki entegre demir çelik tesislerinde kullanılabilecek özelliklere sahip demir cevheri rezervleri Sivas-Erzincan-Malatya, Kırşehir-Kırıkkale-Ankara, Kayseri-Adana ve Balıkesir bölgelerinde bulunmaktadır. Ülkemizdeki entegre demir çelik tesislerinin en büyükleri İsdemir, Erdemir ve Kardemir'dir.

İstanbul Ticaret Odası tarafından hazırlanan Türkiye inşaat hammaddeleri haritasının uyarlanmış hali Şekil 9'da verilmiştir. Karadeniz Bölgesi'nde demir-çelik üretimi, iki entegre tesis (biri elektrik ark ocaklı) olmak üzere sekiz adet firma tarafından yapılmaktadır. Marmara, Ege ve İç Anadolu Bölgeleri'nde elektrik ark ocaklı firma sayıları sırasıyla sekiz, altı ve iki adettir. Akdeniz Bölgesi'nde bir entegre tesis, dört elektrik ark ocaklı toplamda beş adet firma bulunmaktadır. Doğu Anadolu Bölgesi'nde bir adet Demir-Çelik fabrikası vardır.



Şekil 8: Türkiye inşaat hammaddeleri haritası (Kuruoğlu, 2009)

3.2. Tüketim

Demir ve çelik endüstrileri için birincil demir kaynağı demir cevheridir. Demir cevherinin neredeyse tamamı (%98) çelik üretiminde kullanılmaktadır. Kalan %2'lik kısım çoğunlukla otomobil parçaları ve katalizörlerin belirli türleri için toz demir olarak, tıp için radyoaktif demir olarak, boyada, mükrekpte, kozmetikte ve plastikte demir mavisini olarak kullanılır.

Demir cevherinin uluslararası tanımlamada, “Demir cevherleri ve zenginleştirilmiş demir cevherleri (kavrulmuş, demir piritleri dâhil) (harmonized system code: 2601)” üst kategorisi altında, “Demir cevherleri ve zenginleştirilmiş demir cevherleri (kavrulmuş demir piritleri hariç-aglomere edilmemiş) (harmonized system code: 260111), Demir cevherleri ve zenginleştirilmiş demir cevherleri (kavrulmuş demir piritleri hariç-aglomere edilmiş) (harmonized system code: 260112) ve Kavrulmuş demir piritleri (harmonized system code: 260120)” adları altında sınıflandırıldığından bahsedilmiştir.

2601 kodlu üst kategoride bazı tanımlamalar bulunmaktadır. Bu tanımlamalara göre, çelik üretiminde demir cevherleri, pik demir üretiminde demir konsantreleri, sülfürik asit üretiminde kavrulmuş demir piritler kullanılmaktadır. 2021 yılında, 2601 kodlu demir cevheri dünyada toplam 220 milyar dolarlık ticaret değerine ulaşmış ve en çok ticareti yapılan 13. ürün olmuştur. 2020 ile 2021 yılları kıyaslandığında, dünya demir cevheri ihracatı %53.7 artarak 143 milyar dolardan 220 milyar dolara yükselmiştir. Demir cevheri ticareti toplam dünya ticaretinin %1.05'ini temsil etmektedir. 2021 yılında demir cevherinin en büyük ihracatçıları Avustralya (118 milyar dolar), Brezilya (46.2 milyar dolar), Kanada (8.31 milyar dolar), Güney Afrika (7.68 milyar dolar) ve Ukrayna (6.83 milyar dolar) olurken, en büyük ithalatçılar ise Çin (146 milyar dolar), Japonya (15.1 milyar dolar), Güney Kore (10.6 milyar dolar), Çin Taipei (4.07 milyar dolar) ve Hollanda (3.91 milyar dolar) olmuştur (OEC, 2023).

260111 kodlu demir cevheri, hematit, manyetit veya her iki demir mineralini içeren herhangi bir kayadır. Demir cevheri, üstte sıvı bir cüruf ve altta konsantre denilen katı bir demir cevheri yığını oluşturmak üzere ısıtılır. Cüruf uzaklaştırılır ve konsantre, daha sonra çelik yapmak için kullanılan erimiş demiri üretmek için yüksek fırında eritilir. 2021 yılında, 260111 kodlu ürün dünyada toplam 193 milyar dolarlık ticaret değerine ulaşmış ve en çok ticareti yapılan 12. ürün olmuştur. 2020 ile 2021 yılları kıyaslandığında, dünya ihracatı %51.7 artarak 127 milyar dolardan 193 milyar dolara yükselmiştir. 260111 kodlu ürünün ticareti toplam dünya ticaretinin %0.92'sini temsil etmektedir. 2021 yılında bu ürünün en büyük ihracatçıları Avustralya (117 milyar dolar), Brezilya (42.2 milyar dolar), Kanada (5.56 milyar dolar), Güney Afrika (4.48 milyar dolar) ve Ukrayna (3.86 milyar dolar) olurken, en büyük ithalatçılar ise Çin (142 milyar dolar), Japonya (13.4

milyar dolar), Güney Kore (9.31 milyar dolar), Çin Taipei (3.82 milyar dolar) ve Malezya (3.08 milyar dolar) olmuştur (OEC, 2023).

260112 kodlu üründe, demir cevheri ve konsantresi, çelik üretmek için kullanılan iki tür hammaddedir. Demir cevheri, demir oksitler ve silikatların bir karışımıdır. Konsantre, %63'ten daha az demir içeren daha kaliteli bir cevher türüdür. Konsantre ağırlıklı olarak çelik üretiminde kullanılırken, demir cevheri çelik, ferro alaşımlar ve diğer ürünleri yapmak için kullanılır. 2021 yılında, 260112 kodlu ürün dünyada toplam 27.1 milyar dolarlık ticaret değerine ulaşmış ve en çok ticareti yapılan 113. ürün olmuştur. 2020 ile 2021 yılları kıyaslandığında, dünya ihracatı %69.3 artarak 16 milyar dolardan 27.1 milyar dolara yükselmiştir. 260112 kodlu ürünün ticareti toplam dünya ticaretinin %0.13'ünü temsil etmektedir. 2021 yılında bu ürünün en büyük ihracatçıları Brezilya (3.96 milyar dolar), İsveç (3.55 milyar dolar), Güney Afrika (3.18 milyar dolar), Ukrayna (2.97 milyar dolar) ve Kanada (2.75 milyar dolar) olurken, en büyük ithalatçılar ise Çin (4.17 milyar dolar), Almanya (2.11 milyar dolar), Hollanda (1.85 milyar dolar), Japonya (1.75 milyar dolar) ve Güney Kore (1.33 milyar dolar) olmuştur (OEC, 2023).

260120 kodlu üründe, demir piritler, cevherlerinden bakır ve kurşunun çıkarılmasında kullanılır. Ayrıca sarı-kırmızı pigment oluşturmak için kullanılır. 2021 yılında, 260120 kodlu ürün dünyada toplam 101 milyon dolarlık ticaret değerine ulaşmış ve en çok ticareti yapılan 4092. ürün olmuştur. 2020 ile 2021 yılları kıyaslandığında, dünya ihracatı %189 artarak 35.1 milyon dolardan 101 milyon dolara yükselmiştir. Kavrulmuş demir pirit ticareti, toplam dünya ticaretinin %0.00048'ini temsil etmektedir. 2021 yılında bu ürünün en büyük ihracatçıları Finlandiya (56.5 milyon dolar), Türkiye (23.9 milyon dolar), Güney Afrika (7.76 milyon dolar), Mauritius (4.66 milyon dolar) ve Zambiya (3.88 milyon dolar), olurken, en büyük ithalatçılar ise Vietnam (59.6 milyon dolar), Endonezya (15.3 milyon dolar), Mozambik (9.17 milyon dolar), Çin (5.25 milyon dolar) ve Meksika (7.76 milyon dolar) olmuştur (OEC, 2023).

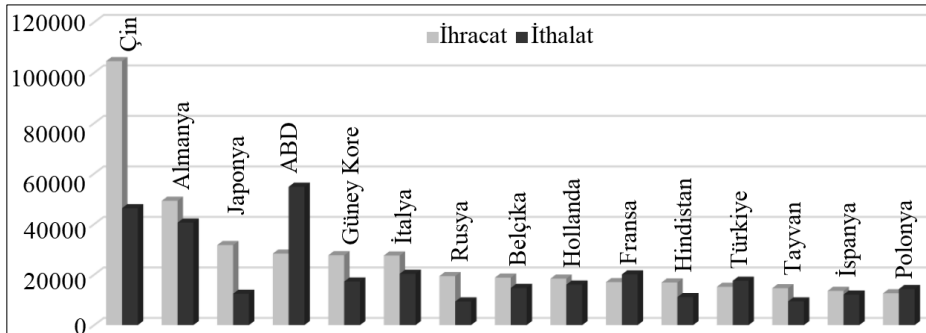
2020-2022 yılları için Türkiye'nin 260111, 260112 ve 260120 sınıflandırmaları kapsamındaki toplam ihracat ve ithalat rakamları Tablo 14'de yer almaktadır. Tablo 14'de ağırlık ve fiyat olarak ithal edilen demir cevherinin ihraç edilenden fazla olduğu görülmektedir. Türkiye 2022 yılı verilerine göre demir cevheri ihtiyacının yaklaşık olarak 9381259 tonunu ithalat yolu ile karşılamış ve yaklaşık olarak 22.7 milyar TL ödemiştir. Türkiye 2022 yılında demir cevheri ihracatından yaklaşık olarak 4.3 milyar TL kazanmıştır.

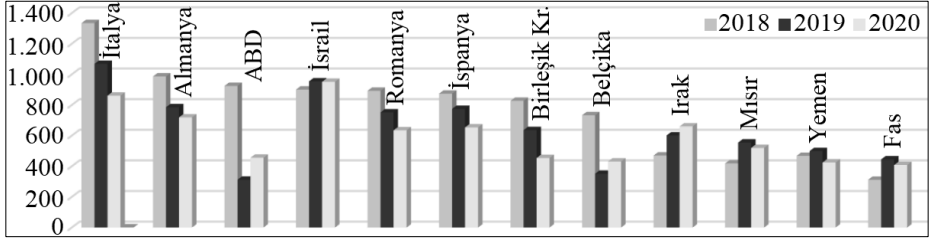
Tablo 14: Türkiye demir cevherinin dış ticaret rakamları. (Türkiye İstatistik Kurumu, 2023)

	2020	2021	2022
İthalat/kg	9872007916	11263312863	9381265515
İthalat/TL	7465535869	18098007646	22714731101
İhracat/kg	2224910841	3810145162	2820971494
İhracat/TL	1387989713	3723277116	4396211462

Demir cevherinin en büyük tüketim alanını demir-çelik sektörü oluşturmaktadır. Dünyadaki COVID-19 salgını etkisinin artması ile 2020 yılındaki demir-çelik toplam üretiminin azalmış olmasına karşın Türkiye, Avustralya, Çin, İran, Rusya, Ukrayna, Kazakistan, Kanada, İsveç, Meksika ve Şili de demir-çelik üretiminde artış gerçekleştirmiştir. Şekil 9'da 2020 yılında en yüksek ihracatçı Çin ve Almanya'nın gerçekleştirdiği, ABD'nin ise en yüksek ithalatçı gerçekleştiren ülke olduğu görülmektedir. Türkiye'nin 2020 yılında fiyat olarak ithal ettiği demir-çeliğin ihraç edilenden fazla olduğu görülmektedir.

Çelik ihracatında Türkiye'nin ana pazarları olan Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri tarafından ticarete koruma önlemleri uygulanması nedeniyle Türkiye çelik ihracatçısı firmalar farklı pazar arayışlarına girmiştir. Çin'in çelik üretimini kendi iç pazarına yönelik arttırması sayesinde Türkiye, Asya ve Uzak Doğu pazarındaki ihracat payını arttırmayı başarmıştır. 2020 yılının ikinci yarısında otomotiv ve inşaat sektörleri canlanmış ve Türkiye çelik üretim miktarı artmaya başlamıştır. Şekil 10'daki grafik incelendiğinde 2020 yılında en yüksek ihracatın İsrail ve İtalya ile gerçekleştiği, ayrıca 2019 yılına göre Irak, Belçika ve ABD ile ihracat payının arttığı söylenebilir.

**Şekil 9:** 2020 yılı küresel demir-çelik sektörü dış ticaret dengesi (milyon \$) (Şen ve Keskin, 2021)



Şekil 10: Türkiye'nin en fazla demir-çelik ihracatı yaptığı ülkeler (milyon \$) (Şen ve Keskin, 2021)

3.3. Fiyat

Genel olarak, demir cevheri için küresel fiyatlar, 2022'nin ilk 9 ayında düşüş eğilimi göstermiş ve ortalama ton başına birim değeri 128.65 \$ olmuştur. 2021 yılında ortalama 178.27 \$/t olan fiyatına göre %28 azalmış fakat 100.83 \$/t olan 2020 yılı ortalama fiyatına göre ise %28 artış göstermiştir (U.S. Geological Survey, 2023). Demir, 2022 yılı ince cevher %58 Fe yüksek kalite Çin limanları fiyatı 100.34-107.2 \$, ince cevher %62 Fe Çin limanları fiyatı 114.18 \$, pelet cevheri %65 Fe Çin limanları fiyatı 139.02 \$'dır (Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, 2023).

Türkiye'de, yer kabuğunda ve su kaynaklarında doğal olarak bulunan, ekonomik ve ticari değeri olan petrol, doğal gaz, jeotermal ve su kaynakları dışında kalan her türlü madde, 5177 sayılı kanuna göre madendir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından Maden Kanununda IV.Grup (c) bendi madenler grubunda ruhsatlandırılan demir için, 2022 yılı KDV ve nakliye hariç ocak başı satış fiyatları Tablo 15'de verilmiştir.

Tablo 15: Demir için 2022 yılı ocak başı satış fiyatı. (Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, 2022)

Demir	Parça cevher (TL/ton)	Toz cevher (TL/ton)
Tenör \geq 65	1800	1650
60 \leq Tenör < 65	1650	1300
55 \leq Tenör < 60	1150	990
50 \leq Tenör < 55	830	660
35 \leq Tenör < 50	500	330
25 \leq Tenör < 35	250	200
Tenör < 25	160	120

4. SONUÇLAR

Demir, yapı sektörünün neredeyse her alanında kullanılmaktadır. Demir cevherinin ana tüketim alanı çelik sektörüdür. Demir içerisine krom, nikel, tungsten, mangan ve vanadyum gibi maddeler katılarak alaşımli çelikler üretilmektedir. Alaşımli çelikler elektrik direklerinin, köprülerin, kesici aletlerin vs. üretiminde kullanılmaktadır. Dökme demirler (%3-5 karbon) ile

pompalar, borular ve vanalar yapılmaktadır. Demir-çelik sektörünün başını çektiği ve temel olarak NACE 24 faaliyet sınıflamasında yer alan döküm, çelik boru, alüminyum, galvaniz ve bakır gibi sektörlerin de yer aldığı ana metal sektörü; otomotiv, makine, kimya, savunma, elektronik, havacılık, ulaşım ve madencilik sektörlerine hammadde ve temel girdi sağlamaktadır. Dünya demir cevheri üretim miktarı 2021 yılında 3 milyar tonu aşmıştır. Avustralya, Çin ve Brezilya demir cevheri üretim miktarı açısından lider konumda olan ülkelerdir. 2021 yılı verilerine göre Türkiye, dünyadaki demir cevheri üreticisi ülkeler arasında 15. sırada yer almıştır. Türkiye'nin küresel rakipleri ile kıyaslanabilecek ölçüde demir cevheri rezervi bulunmamaktadır. Üretime uygun rezervlerinin yirmi yıl içerisinde tükeneceği öngörülmektedir. Önceki yıllarda yayınlanan raporlara göre günümüzde bilinen ham rezervin yaklaşık on katı kadar daha rezerv varlığından söz edilmektedir. Arama çalışmalarına devam edilmeli ve teknolojik yatırımlar yapılarak potansiyeli olan sorunlu rezervlerin üretim imkânları değerlendirilmelidir. Türkiye demir cevheri üretimi 2020 yılında yaklaşık olarak 21.4 milyon ton iken, 2021 yılında yaklaşık olarak 16 milyon tona düşmüştür. Demir cevheri üretiminde yaklaşık olarak %25'lik bir düşüş gözlenmiştir. Türkiye demir cevheri ihtiyacının yarısından fazlasını ithalat yolu ile karşılamaktadır. Ayrıca hurda demir-çelik de ithal etmektedir. 2022 yılında yapılan demir cevheri ithalatı Türkiye'nin döviz rezervlerine yaklaşık olarak 1.4 milyar \$ yük getirmiştir.

Dünya çelik üretimi 2021 yılında bir önceki yıla göre %3.7 artış göstermiş ve 1.95 milyar tona ulaşmıştır. Artan küresel enflasyon, 2022 yılında çelik üretimi ve ticaretinde hafif düşüslere neden olmuştur. Bunun sonucu olarak çelik talebi ve tüketimi azalmıştır. Bu düşüşün sebebi olarak, Rusya-Ukrayna savaşı, Çin'de devam eden koronavirüs hastalığını hafifletme önlemleri ve artan enerji maliyetleri gibi etkenler de sayılabilir. Uluslararası piyasada Türkiye'deki çelik sektörü, devlet destekli firmalara sahip olan Hindistan, Çin, Rusya ve Japonya gibi ülkeler ile rekabet edemeyecek duruma gelmiştir. Türkiye'de 2021 yılında 40.4 milyon ton çelik üretimi ile %74.8 kapasite kullanım oranına ulaşan sektörün, 2022 yılının ikinci yarısında kapasite kullanım oranı %51 seviyesine düşürmüştür. Türkiye 2022 yılında dünya çelik üretiminde sekizinci sırada yer almış ve ihracat değeri 21.1 milyar \$ olmuştur.

Ülkemiz 6 Şubat 2023 tarihinde asrın felaketini yaşamıştır. Bu felaket neticesinde yıkılan binaların bazılarında inşaat demiri olarak deprem yönetmeliğine aykırı özelliklerdeki demir malzemelerin kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu ve benzeri durumların önüne geçilmesi amacıyla, 16 Mart 2023 tarihinde Resmi Gazete'de "İnşaat Demiri İzleme Sistemi Uygulama Genel Tebliğ" yayınlanmıştır. Bu tebliğin amacı, kayıt dışı ekonomiyle mücadele kapsamında inşaat sektöründeki belirli girdilerin (inşaat demiri, çimento, hazır beton ve benzeri) takibi ve elde edilen verilerin analiz edilmesi, vergi güvenliği yanında deprem kuşağında yer alan ülkemizde yapı güvenliğinin

sağlanmasına katkı sunması bakımından da önem taşımaktadır. Darphane ve Damga Matbaası Genel Müdürlüğü tarafından “İnşaat Demiri İzleme Sistemi” (İDİS) kurularak, inşaat sektöründe faaliyet gösteren mükellefler tarafından kullanılmak üzere inşaat demirinin üretimi veya ithalatından inşaatta kullanım ve laboratuvar deneyleri dâhil geçen tüm aşamalarda takip edilmesine imkân verecektir (İnşaat Demiri İzleme Sistemi Uygulama Genel Tebliği, 2023).

TEŞEKKÜR

Çelik standartları konusunda yardımcı olan Kaptan Demir Çelik End. ve Tic. A.Ş. Çelikhane Kalite Şefi Mühendis Ali Çoker’e teşekkür ederim.

KAYNAKÇA

- Akman, S. (2003). Yapı malzemelerinin tarihsel gelişimi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426(4), 30-36.
- Australian Government. (2020). Australian Resource Reviews Iron Ore 2019. <https://ecat.ga.gov.au/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/134851>
- British Geological Survey. (2023). World Mineral Production 2017-2021. <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html>
- Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G. (2015). *Malzeme bilimi ve mühendisliği*. (K. Genel, Çev.). Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık (Orijinal eserin basım tarihi 2009, 8. Baskı).
- Cornelius, S. ve Hurlbut, Jr. (1982). *Mineraloji* (2. Cilt). (K. İnan, ve E. Tanyolu, Çev.). Doyuran Matbaası.
- Egirani D. E., Latif, M. T., Poyi, N. R., Wessey, N. ve Acharjee, S. (2018). Genesis, uses and environment implications of iron oxides and ores. V. Shatokha (Ed), *Iron ores and iron oxide materials* içinde. IntechOpen.
- European Chemicals Agency. (2023). Iron. European Union. <https://echa.europa.eu/brief-profile/-/briefprofile/100.028.270>
- İnşaat Demiri İzleme Sistemi Uygulama Genel Tebliği. (2023). *Resmî Gazete* (32134, 16 Mart 2023).
- Kuruoğlu, M. (2009). *Türkiye inşaat sektörü hammadde haritası (2009-37)*. İstanbul Ticaret Odası Yayınları.
- Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü (1977). *M.T.A. Enstitüsünce Bilinen Türkiye Yeraltı Kaynakları Envanteri No:168*. M.T.A. Enstitüsü Matbaası.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2010a). Sivas ili maden ve enerji kaynakları. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/sivas_madenler.pdf
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2010b). Adana ili maden ve enerji kaynakları. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/Adana_Madenler.pdf

- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2017). Dünyada ve Türkiye’de demir. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/dunyada_turkiyede_demir.pdf
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2022). Dünyada ve Türkiye’de demir. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/dunyada_turkiyede_demir_1.pdf
- Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü. (2022). 2022 yılı ocak başı satış fiyatları. <https://www.mapeg.gov.tr/Home/Announcement/2101>.
- Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü. (2023). Maden istatistikleri. <https://www.mapeg.gov.tr/Custom/Madenistatistik>.
- OECD. (2023). Iron Ore. <https://oec.world/en/profile/hs/iron-ore>
- Pepperhoff, W. ve Acet, M. (2001). *Constitution and Magnetism of Iron and its Alloys*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Shaltami, O. R., Morais, D., Fares, F. F., Oshebi, F. M., Errishi, H. ve Bustany, I. (2020, Eylül, 2-3). *Iron ores: A review* [Sözlü sunum]. 22th International Conference on Ore Deposits, Tanzania.
- Smith, W. F. (2001). *Malzeme bilimi ve mühendisliği*. (N. G. Kınıkoğlu Çev.). Literatür Yayınları (Orijinal eserin basım tarihi 1986, 3. Baskı).
- Şen, F. ve Keskin, B. (2021). Demir Çelik Sektörü Küresel Gelişmeler Bölgesel Riskler. https://ugm.com.tr/upload/files/content_2022-03-30_15-37-10.pdf
- Temur, S. (2001). *Metalik Maden Yatakları*. Nobel Yayın Dağıtım.
- Tübitak Bilim Genç. (2021). Demir. <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/periodyodik-tablo/demir>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2023). Dış ticaret istatistikleri. <https://www.tuik.gov.tr/>
- Türk Standardları Enstitüsü. (2016). Çelik - betonarme için - donatı çeliği (TS 708). <https://www.tse.org.tr/>
- Vlack, L. H. V. (1972). *Malzeme bilimine giriş*. (R. A. Safoğlu Çev.). Matbaa Teknisyenleri Basımevi (Orijinal eserin basım tarihi 1964, 2. Baskı).
- Yıldız, N. (2014). *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme*. Ertem Basım.
- U.S. Geological Survey. (2023). Mineral Commodity Summaries 2023: Iron Ore. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>.

BÖLÜM 3

KROM

Dr. Öğr. Üyesi Bülent HANER¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10034910>

¹ Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Zonguldak, Türkiye. b.haner@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1662-7927

GİRİŞ

Krom, yerkabuğunu teşkil eden metal bileşenlerden biri olup, metalürji ve kimya sanayisinin en önemli elementlerindedir. Ekonomik olarak üretilebildiği yegâne mineral ise kromittir. Kromitin genel formülü ise $FeCr_2O_4$ şeklindedir.

Fransız eczacı ve kimyageri olan, Louis-Nicholas Vauquelin tarafından 1797 yılında keşfedilen Cr, krokoit ($PbCrO_4$) adlı ve Sibirya kırmızı kurşunu diye bilinen parlak kırmızı bir mineral malzeme ile yapılan deney esnasında ortaya çıkarıldı. Louis-Nicholas Vauquelin aynı zamanda da berilyum metalini de keşfetmiştir. Krokoit mineralini, hidroklorik asit (HCl) ile biraraya getirerek krom oksit (CrO_3) üretimi de yapan Vauquelin, kromu saflaştırmak için herhangi bir yöntemin henüz mevcut olmamasına rağmen, 1798 tarihinde, krom oksit cevherini, yakıtı kömür olan bir fırında ısıtmak suretiyle metalik krom elde etmeye muvaffak olmuştur (JLab Science Education, 2023).

1798 yılında da Ural Dağları'nda dünyadaki ilk kromit yatakları keşfedilmiştir. Anadolu'da ise, Amerika'da Maryland yataklarında bulunan kromit rezervinin azalıp, tükenmesini takip eden 1848 yılında, Bursa yakınlarında ilk kromit oluşumları belirlenmiş ve 1850 yılında da bu bölgede üretim faaliyeti başlamıştır.

Ülkemizden, Güney Afrika'da ve Hindistan'da krom üretiminin 1906 yılında başlamasına kadar, yıllarca krom cevheri ihracatı yapılmıştır. Tarih itibarıyla, krom cevherinin kullanıldıkları alanlar da gözönüne alınarak olagelen ilerlemelere bakıldığında ise de;

- Alüminotermik reaksiyonlar sonucu ilk krom metalinin 1809 yılında elde edildiği,
- Boya sanayisinde, ilk kez katkı maddesi olarak, 1820 yılı itibarıyla potasyum bikromatın kullanıldığı,
- Çeliğin içerisinde krom kullanılmasına dayalı patentin, ilk olarak 1865 yılında alındığı,
- Fransa'daki refrakter sanayisinde 1879 yılında kromun kullanımına başlandığı,
- Deri sanayisinde de 1884 yılında kromun kullanımına başlandığı,
- Günümüzde, kromun piyasalarda %95'lere varan oranlarda kullanımının olduğu ve Amerika'da da 1897 yılında elde edilen yüksek karbonlu ferrokromun, üretilip kullanıldığı,
- İngiltere'de de ilk paslanmaz çeliğin 1912 yılında üretildiği ve ilk ticari üretimine de 1913 yılında geçildiği görülmektedir (Marmotek Madencilik, 2023).

Ekonomik olarak krom üretilebilen kromit cevherinin fiziksel özellikleri ise Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1: Kromit cevherinin fiziki özellikleri. (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2022)

Kimyasal Olarak Sınıflandırma	Oksit
Görülen renkleri	Genellikle koyu gri renkten siyaha, nadiren de kahverengi siyah karışımı renk
Parlaklığı	Submetalik ve metalik
Şeffaflığı	Opak görünümlü
Mohs sertliği	5.5-6 civarında
Kristal sistemi	Kübik sistemde
Yoğunluğu	4.0-5.1 g/cm ³ aralığında
Teşhis için bakılan özellikler	Parlaklığı, çizgi rengi
Kimyasal olarak bileşimi	Yer yer demirin yerini alan magnezyum ile birlikte olmak üzere FeCr ₂ O ₄ şeklinde

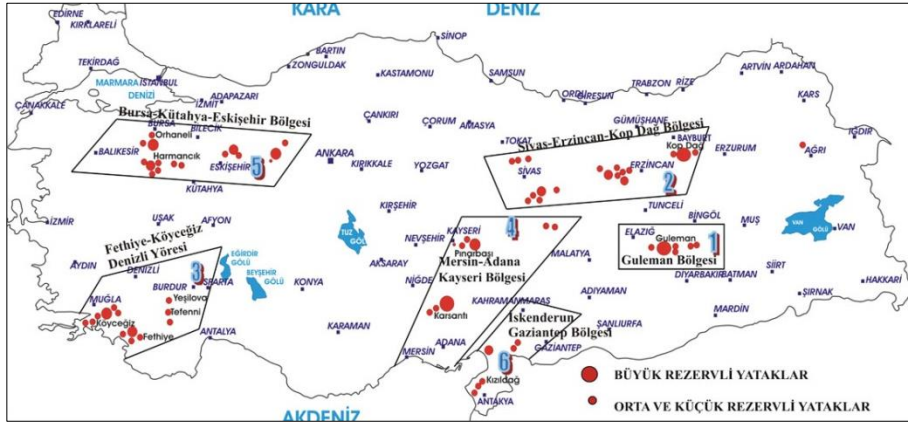
1. TÜRKİYE VE DÜNYADAKİ DURUMU

1.1. Türkiye’de Durumu

Türkiye’de krom cevheri ilk defa Bursa’nın Harmancık kazası civarında 1848 yılında bir İngiliz tarafından bulunmuştur. Bu nedenle ilk krom madencilik faaliyeti, Bursa mintikasında başlamıştır. Fethiye bölgesinde 1900, Guleman’da 1912 yılında, bulunmuş olan krom yataklarını, Hatay, Eskişehir, Kayseri, Toroslar, Erzincan ve 1959 yılında da Malatya civarında bulunan yataklar izlemiştir. Günümüzde de yeterli araştırmanın yapılmadığı birçok bölge olup, bu bölgelerde de krom yataklarının bulunabileceği varsayılmaktadır. Türkiye önemli krom yatakları itibariyle 5 bölgeye ayrılabilir. Bunlar Eskişehir-Kütahya-Bursa bölgesi, Sivas-Erzincan-Kop Dağ bölgesi, Elazığ-Guleman bölgesi, Burdur-Fethiye-Köyceğiz-Denizli bölgesi, İskenderun-Gaziantep bölgesidir (Gümüş, 1979). Resim 1’de, Türk Maadin Anonim Şirketinin Kavak Krom Tesislerine, 1974 yılında İTÜ MMF Maden Bölümünün teknik gezi yapmış olan 4. sınıf öğrencileri görülmektedir.



Resim 1: Türk Maadin Anonim Şirketinin Kavak Krom Tesislerine 1974 yılında İTÜ MMF Maden Bölümü 4. sınıf öğrencilerinin yaptığı teknik gezinin bir fotoğrafı.



Şekil 1: Türkiye’de krom madenlerinin bulunduğu yerler (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2022)

Türkiye’de 2017-2022 yılları arasındaki tüvenan krom üretimi miktarı Tablo 2’de verilmiştir. 2021 yılı için Türkiye’nin krom ihraç ettiği ülkeler Tablo 3’de gösterilmektedir.

Tablo 2: Yıllara göre Türkiye tüvenan krom üretimi miktarı (ton). (Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, 2023)

2017	2018	2019	2020	2021	2022
7849500	10757199	8666114	6164598	6960683	5410034

Tablo 3: 2021 yılında Türkiye’den krom cevheri ihraç eden ülkeler. (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2022)

Ülkeler	İhracat Miktarı (ton)	İhracat Değeri (USD)
Avusturya	2350	1167750
Belçika	45521	9488960
Çin	1073481	191007625
Endonezya	43494	7365323
Fransa	10114	2002624
Hong Kong	8000	1200000
İsveç	253215	48886668
Japonya	3208	955197
Rusya Federasyonu	3117	802735
Diğ er ülkeler (18)	13893	3377913
Toplam ihracat miktarı	1456395	266254795

2019-2021 yıllarına ait Türkiye’nin ihracat ve ithalat bilgileri ise Tablo 4’te verilmektedir. Tablo 5’te, 2021 yılında ülkemizde, en fazla krom üretimi yapan şirketler ve yaptıkları üretim miktarları ton olarak görülmektedir.

Tablo 6’da 2021 yılı için krom madeni ocak başı fiyatları görülmektedir. Tabloda, tüvenan (parça) cevhere ait tenör aralığı gözönünde bulundurulurken saptanan katsayının, cevherin tenörü ile çarpımı neticesi oluşan fiyat ile tüvenan (parça) cevhere ait tenör aralığı için saptanan ocak başı satış fiyatı, nakliye hariç olmak üzere ocak başı satış fiyatı olarak esas alınmaktadır.

Tablo 4: Türkiye’nin ferrokrom ihracatı ve ithalatı verileri. (Türkiye İstatistik Kurumu, 2023)

	2019	2020	2021
İhracat/ton	105064	106850	166478
İhracat /USD	165662424	136244921	295226445
İthalat/ton	9636	10016	9598
İthalat /USD	14186643	13401147	19249320

Tablo 5: Türkiye’de 2021 yılında en fazla krom üretimi yapan şirketlerin üretim miktarları. (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2022)

Şirket Adı	Üretim Miktarı (ton)
Aksu Madencilik Sanayi ve Tic. A.Ş.	2056621
Akmetal Madencilik Sanayi ve Tic. A.Ş.	689737
Çeltik Ticaret Madencilik ve Sanayi Ltd. Şti.	290789
Dedeman Madencilik Sanayi Tic. A.Ş.	471000
Global Madencilik Turizm Sanayi ve Tic. A.Ş.	255728
Ege Petrol Türk A.Ş.	931033
Eti Krom A.Ş.	812059
Koyunoğlu Madencilik Tic. Ve San. Ltd. Şti.	379818
Manolya Madencilik A.Ş.	626380
Pınar Madencilik ve Turizm A.Ş.	440709
Türk Maadin A.Ş.	234604

Tablo 6: 2021 yılı krom madeni nakliye hariç ocak başı satış fiyatları (Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, 2021).

Tenör aralığı (%Cr ₂ O ₃)	Satış fiyatı (TL/ton)	Tenör aralığı (%Cr ₂ O ₃)	Satış fiyatı (TL/ton)
Tenör ≥ 52	2851	40 > Tenör ≥ 38	1559
52 > Tenör ≥ 50	2673	38 > Tenör ≥ 36	1292
50 > Tenör ≥ 48	2495	36 > Tenör ≥ 34	1114
48 > Tenör ≥ 46	2317	34 > Tenör ≥ 32	936
46 > Tenör ≥ 44	2183	32 > Tenör ≥ 30	802
44 > Tenör ≥ 42	1916	30 > Tenör ≥ 20	27
42 > Tenör ≥ 40	1737	Tenör < 20	22

1.2. Dünyada Durumu

Şekil 2’de, krom cevherinin bulunduğu ve üretildiği ülkelerin, stratiform ve alpin (podiform) yatak tipinde olmalarına göre rezerv miktarı aralıkları görülmektedir. Dünyadaki kromit rezervinin toplam varlığı, 7.6 milyar ton düzeyindedir. Bu miktarın 3.6 milyar tonu, rezerv sınıfında görülmektedir. Dünya krom kaynaklarına bakıldığında, bu kaynakların büyük bir kısmının stratiform yataklara ait olduğu görülmektedir. Dünya geneline bakıldığında, ekonomik olarak üretim yapılabilen büyük krom cevheri yataklarının, Güney Afrika Cumhuriyeti başta olmak üzere, Kazakistan, Finlandiya, Zimbabve, Hindistan, Türkiye, Filipinler, İran, Brezilya ve Küba’da olduğu görülmektedir.



Şekil 2: Stratiform ve alpin (podiform) kromit yataklarının ülkelere göre rezerv durumları (Kastamonu Madencilik, 2019)

Güney Afrika’daki Bushveld, ABD’deki Stilwater gibi duraylı kıtasal bölgelerde (kraton) karşılaşılan stratiform oluşumlara bağlı krom yatakları, kilometrelerce devamlılık gösteren ve büyük boyutlu olan tabakalanmış yataklanmalardır. Yapısal olarak incelendiğinde büyük bir karmaşıklık sergilemedikleri görülmektedir. Düzenli kristal şekilli, tane boyutu büyük, yüksek demirli cevher içeren ve Cr/Fe oranı düşük olan cevherlerdir.

Alpin tip diye anılan ve daha ziyade Alp dağoluşum kuşakları boyunca görülen ultrabazik-bazik kayaç topluluklarına (ofiyolit istiflenmesi) bağlı krom yatakları (podiform tipinde) ise, düzensiz şekilli veya mercek, genelde boyutu küçük, yapısal olarak karmaşık ilişkiler sergileyen yataklardır. Tane boyutu iri ve kristal şekli düzensiz olan, yüksek kromlu ve Cr/Fe oranı da yüksek olan cevheri erirler.

Üçüncü tip olarak görülen gruplandırmada, bir iç düzene sahip eş merkezli konsantrik ultrabazik-bazik kayaç topluluklarına bağlı krom

yataklarının ise, günümüzde ekonomik olarak önemi yoktur. Daha ziyade Alaska'da görülen bu tip yataklardan henüz bir üretim yapılmamaktadır. Ancak, bununla beraber ABD'de, bu kromitlerin zenginleştirilmesi deneyleri ve bunların ekonomikliğinin belirlenmesi konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Bu tip yatakların genellikle yüksek demirli krom cevheri içerdikleri belirlenmiştir.

Tablo 7'de, yukarda belirtilmiş bulunan ülkelerin ve diğerlerinin, dünyada, 2019-2021 yılları arasındaki krom cevheri ve konsantresi üretimi değerleri görülmektedir.

Tablo 7: Dünyada 2019-2021 yılları arasında krom cevheri ve konsantresi üretimi (metrik ton). (British Geological Survey, 2023)

Ülke	2019	2020	2021
Afganistan	4500	4500	4000
Arnavutluk	1288315	626627	650200
Brezilya	199300	226800	200000
Çin	30000	30000	30000
Filipinler (d)	36423	35112	30721
Finlandiya (a)	1183862	1131336	1141184
Güney Afrika	17664239	13196880	18435250
Hindistan (c)	3929691	2863869	2560000
İran (d) (e)	244656	252292	250000
Kazakistan	7019000	6327000	6192000
Madagaskar	76100 (b)	12400 (b)	13500 (b)
Pakistan (f)	467400	404800	467100
Papua Yeni Gine (b)	112749	113000	113000
Rusya	698000	689000	689000
Sudan	12728	9000	4600
Türkiye	3363791	2128669	2779467
Umman	732600	456800	269000
Zimbabwe	1550064	1272139	1244300
Dünya toplamı	38600000	29800000	35100000

a) Konsantre b) İhracat c) Yıl bu durumu takiben 31 martta bitti d) Dökümhane kumu ve/veya parçalı cevher dahil e) Belirtilenden sonra 20 martta sona eren yıllar f) Belirtilen tarihin 30 haziranında sona eren yıllar.

Tablo 8'de, dünyadaki krom cevherleri ve konsantrelerinin 2021 yılına ait ihracat ve ithalat bilgileri görülmektedir.

Tablo 8: Dünya krom cevherleri ve konsantreleri 2021 yılı ihracat ve ithalat bilgileri (Trendeconomy, 2023).

Ülkeler	İhracat Değeri (ABD \$)	Dünya Payı (%)	İthalat Değeri (ABD \$)	Dünya Payı (%)
ABD	5260661	0.21	29876717	0.96
Almanya	12068100	0.49	29983702	0.97
BAE	1722726	0.06	805662	0.02
Brezilya	5223364	0.21	5636030	0.18
Çin	4571101	0.18	2607410924	84.51
Filipinler	11809868	0.47	47114	0.00
Fransa	2025235	0.08	4261806	0.13
Güney Afrika	1945479580	79.01	411433	0.01
Hindistan	1546760	0.06	55458831	1.79
Hollanda	29421568	1.19	25914063	0.83
İspanya	1531957	0.06	7416720	0.24
İtalya	1755820	0.07	5705183	0.18
Kanada	382358	0.01	4533833	0.14
Madagaskar	2762870	0.11	-	-
Nijerya	1205177	0.04	145106	0.00
Pakistan	94384876	3.83	3075570	0.09
Türkiye	266254795	10.81	32355154	1.04
Umman	27929331	1.13	2825711	0.09
Zimbabve	44810794	1.81	11709	0.00
Diğer ülkeler	2118013	0.02	269217333	8.47

2. KROMUN YATAKLANMA TİPLERİ VE ÇEŞİTLERİ

Kromit cevherinin yan kayaçları, oluşum şekilleri, cevher geometrisi ve coğrafik olarak dağılımları arasında önemli ilişkiler bulunmaktadır. Bu ilişkilere dayanarak kromitleri, alpin (podiform) ve stratiform tipi kromitler olmak üzere iki tipe ayırmak mümkündür (Temur, 2001).

Doğada bulunup yararlanılabilen krom elementinin cevheri, $FeO.Cr_2O_3$ bileşiminde olan kromit mineralidir. Kromitin oluştuğu yataklar, yalnızca erken magmatik dönemdeki fraksiyonel kristalleşme evresinde ortaya çıkmışlardır. Kromit yataklarının tümü, ofiyolit komplekslerinin ultrabazik ve bazik kayaçlarının içinde bulunurlar. İdeal olarak tanımlanan bir ofiyolit dizisi, üstten alta doğru sedimanter kayaçlar, yastık lavları, diyabaz daykları, gabroyik kayaçlar ultramafik kayaçlardan oluşmuştur. Bunların içindeki ultramafik kayaçlar kümülat ve tektonit olmak üzere iki bölüme ayrılırlar. Kümülatlar dünit, troktolit, piroksenit ve verlit ile, tektonitler ise, hazırbujit ve dünit bantları ile temsil edilir. Genellikle altındaki ultramafik kayaçlardan daha az deforme olmuş olan gabroyik kayaçlar, gabroyik bileşimli kümülatlardan meydana gelmişlerdir. Bu oluşumlar incelendiğinde, dereceli olarak diyabaz dayklarına geçiş yaptıkları görülmektedir. Öte yandan bunların

üzerinde de bazaltik bileşimli pillow lav adı da verilen, volkanik lav akıntıları bulunmaktadır. Bunun da üstünde ise kireçtaşları, çört, radiolarit ve ince detritiklerden oluşmuş derin deniz sedimanları vardır. Bu şekildeki bir ofiyolitik dizi içinde kromitleri ultramafik kayaların (peridotitlerin) kümülat ve tektonit bölümlerinde gözlemlenmek mümkündür (Temur, 2001). Kromit yatakları incelendiğinde belirli bir yatak geometrisi olmadığı görülmektedir. Bellibaşlı saçılımlar, podiform (torba, kese, yığın, bezelye şekilli), damarlar ve tabakamsı şekiller halinde bulunurlar. Podiform özellikteki kromitlerin genellikle ard arda dizilmiş kütlelerle temsil edildiği ve dünitik bir kılıfla sarıldığı görülmektedir. Bunun yanısıra, fay zonlarına yerleşmiş kromit kütlelerine de rastlanılmaktadır. Kromit yataklarında leopar tipi, saçılımlı, nodüler, yollu, bantlı ve masif cevher tipleri gözlemlenmektedir. Saçılımlı cevherler, yan kayaç içine dağılmış kromit taneleri halinde görülmektedir. Tenörleri oldukça düşüktür. Kromitin yantaşları Tablo 9’da görülmektedir.

Tablo 9: Kromitin yantaşları. (Yıldız, 2014)

Yantaşların Adı	Formülü
Serpantin	$3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Olivin	$2(\text{Mg, Fe})\text{O} \cdot \text{SiO}_2$
Kloritler	$5(\text{Mg, Fe})\text{O}, \text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{SiO}_2, 4\text{H}_2\text{O}$
Feldispat	$\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$
Piroksen Diopsit	$\text{CaO}, \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$
Enstatit	$\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$
Bronzit	$(\text{Mg, Fe})\text{O} \cdot \text{SiO}_2$

Bandlı tip cevherlerde, boyutları birkaç santimetre olan kromit kümeleri birbirine temas etmeyen halkalar şeklinde bulunur. Şekil 3’te sağda da, leopar tipli kromitten bir örnek görülmektedir. Nodüler cevherlerde halkaların içinin dolu olduğu görülmektedir. Halkalar ve nodüller, yan kayaçlara bağlı olarak bantlaşma yönünde uzamışlardır. Bantlı ve yollu cevherlerin de, kromit içeriği bakımından zengin ve fakir zonların ardalanması şeklinde olduğu görülür. Bantların kalınlıkları milimetreden birkaç santimetreye kadar değişmektedir. Yine Şekil 3’te solda, bandlı kromitten bir örnek görülmektedir.



Şekil 3: Bandlı kromit ve leopar tipi kromit

Şekil 4'te solda görülen masif kromit cevherleri ise, tamamen saf kromit kristallerinin kümelenmesinden meydana gelirler. Yanındaki saçılımlı kromit ise, kayaç içinde küçük kromit kitleleri halinde bulunmaktadır.



Şekil 4: Masif kromit ve saçılımlı kromit

3. KROM CEVHERİNİN ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

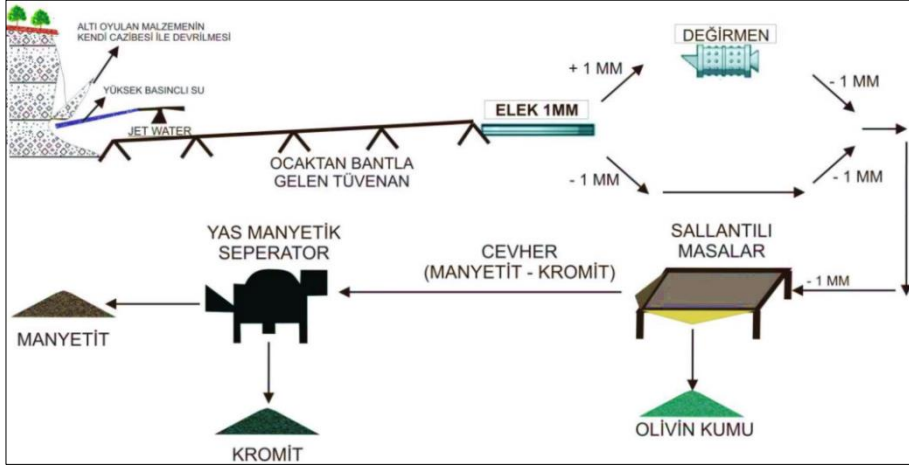
Krom cevherinin zenginleştirilmesi, tesisi kurmadan evvel, cevherin yapısı ile ilgili gereken incelemeler ve testler yapıldığı takdirde, karmaşık bir işlem olarak görülmez. Aynı yöredeki krom yataklarının oluşumları da birbirine benzemektedir. Bu nedenle zenginleştirme işlemlerinde de benzer yöntemler uygulanmaktadır. Cevher hazırlama ve zenginleştirme tesisleri tasarlanırken, daha önce bu nedenle kurulmuş olan tesislerin olumlu ve olumsuz yönleri gözönünde bulundurulmalıdır. Bu verileri incelerken dikkatli bir şekilde analiz yapılmalıdır. Örneğin cevher, darbeli ve çeneli kırıcılarla aynı boyutlarda kırıldığında, kırılmış cevherin boyutu dışındaki fiziki yapısı farklıdır. Diğer taraftan öğütmede kullanılan iki değirmenin aynı olabilmesi için marka, güç, çap ve uzunluklarının aynı olması yeterli olmayıp, dönüş hareketi, kritik hızı, iç çapı, astar şekli gibi özelliklerinin de aynı olması gerekmektedir. Masa ile zenginleştirme işlemi masanın basit iler-geri hareketi ile gerçekleşmemektedir. Çok farklı firmalar tarafından kromit cevherinin zenginleştirilmesinde kullanılmak üzere sarsıntılı masalar üretilmektedir. Masaların fiziksel şekli, eni ve boyu, hareket genliği, ileri-geri hareket sıklığı, masa üzerindeki çıkıntılarının uzunluğu, yüksekliği farklı olabilmektedir. Masalar kurulduğunda, en ve boy tarafının yatayla yaptığı açı da değişiktir. İki masanın aynı olabilmesi için, masaların fiziksel özelliklerinin aynı olması gerekmektedir. Benzer sonuçların alınabilmesi için de masalara cevher, aynı şartlarda beslenmelidir. Sallantılı masaya gelmeden önce cevher, genellikle hidrolik ayırıcılardan benzer sonuçlar alınabilmesi için, hidrolik ayırıcıların fiziksel boyutları yanısıra, kullanılan suyun debi ve basıncının da en azından birbirine yakın olması gerekmektedir. Öte yandan her cevherin manyetik ayırıcılarla zenginleştirilmesi imkânı bulunmamaktadır. Cevherin yapısı incelenmeden ve laboratuvarında gerekli zenginleştirme testleri yapılmadan bu konuda bir başka tesisi örnek olarak uygulamaya gidilmesine karar verilmemelidir. Bu nedenle birbirine benzer cevherlerin zenginleştirilmesinde

kurulu bir tesisin, kurulması tasarımılanan bir tesise örnek olarak alınması durumunda gerekli araştırmalar yapılmadan uygulamaya geçilmemelidir. Krom tesislerinde tavana değirmenler ve masalar öncelikli olmak üzere, diğer makinelerin bakımı için yararlanılabilecek hareketlilik ve boyutlarda vinç konulmasında yarar bulunmaktadır. Yine diğer küçük makinaların da bakım ve onarımında kullanılabilecek platform gibi alanların da başlangıçta tasarlanması gerekir. İşleyen kromit zenginleştirme tesislerinde hangi işlemin sonucunun, ne olacağını, yaklaşık olarak bilmek önemlidir. Tesise beslenen cevherin kimyasal özelliklerinin yanısıra, fiziksel özellikleri de belli aralıklarla değişim gösterebilmektedir. Tesise beslenen cevhere göre, üretilen konsantre ve atığın özelliklerinde de değişiklikler olabilmektedir. Tesisin işletim koşullarının etkisi de dikkate alındığında, giren cevher ile çıkan ürün arasındaki ilişkinin sürekli olarak izlenmesi önem arz etmektedir. Bu nedenle de her tesise öncelikle tenör, tane boyutu, nem ve yoğunluk gibi cevher özelliklerinin belirlenip, ölçülebildiği araç ve gereçle donatılmış uygun büyüklükte bir laboratuvarın kurulması gerekmektedir.

Krom cevherinin zenginleştirilmesi için, uygulanan belli başlı yöntemler; elle ayıklama, yerçekimi yöntemiyle zenginleştirme, manyetik yöntemle ayırma, elektrostatik yöntemle ayırtma, flotasyon yöntemiyle zenginleştirme, ekstraksiyon (özütleme) yöntemiyle zenginleştirilmiştir.

Şekil 5'de de, Çamköy plaserlerinde yapılacak bir cevher üretiminde, uygun olduğu belirlenen akım şeması görülmektedir. Bu şemaya göre, plaserlerden yapılması düşünülen kazı sonucu üretilen ve içinde ağır mineral bulunan çimentolanmamış tüvenan tortullar, ilk önce 1 mm'lik elekten geçirildikten sonra, doğrudan doğruya sallantılı masaya yönlendirilmektedir. Öte yandan, arta kalan ve çoğunluğu dünitlerden meydana gelen, 1mm'den iri olan kaba malzeme, değirmene beslenip, öğütüldükten sonra aynı şekilde sallantılı masa sistemine gönderilmektedir. Sallantılı masadan elde edilen konsantre cevher ise, yaş manyetik seperatörden geçirilerek manyetik ve manyetik olmayan cevher fraksiyonları elde edilir. Yaş manyetik seperatörden elde edilen manyetik fraksiyona ait konsantre cevher, büyük bölümü ile manyetik minerallerce zengin olmasına karşın, manyetik olmayan fraksiyona ait cevherin de çok büyük bir kısmının kromitten meydana geldiği saptanmıştır. Manyetik seperatörden çıkan manyetik cevher fraksiyonu yaklaşık %45-50 ve bunun yanısıra, manyetik olmayan fraksiyonun miktarının ise %50-55 arasında değiştiiği görülür. Konsantre cevher, sallantılı masalardan elde edildikten sonra, yaş manyetik seperatöre beslendiğinde, manyetik olmayan ve manyetik olan cevher fraksiyonu oranının eşit olduğu belirlenmiştir. Buna göre, Çamköy yöresinde bulunan 20 milyon ton dolayındaki ağır mineral rezervinin yaklaşık olarak yarısının kromit, diğer yarısının ise vanadyum içeren titanomanyetitlerden meydana geldiği anlaşılmaktadır. Buna göre elde edilmiş olan yaş manyetik seperatör analiz sonuçlarından, Çamköy yöresindeki plaserlerde bulunan vanadyumlu

titanomanyetit ve kromit rezervlerinin, her birinin miktarının, bu sonuca dayanarak, yaklaşık 10 milyon ton civarında olabileceği söylenebilir (Yağmurlu ve ark., 2017).



Şekil 5: Kromit ve manyetit minerallerin kazanılmasını Çamköy'deki plaserlerde öngören akım şeması (Yağmurlu ve ark., 2017)

Şekil 6 ve Şekil 7'de sırasıyla Kef Kromit Zenginleştirme Tesisi akım şeması ve çoklu ortam sınıflandırıcılarının kullanıldığı tesisin akım şeması görülmektedir.

Sallantılı masadaki işlem sonucunda elde edilmiş bulunan kimyasal analiz sonuçlarına bakılırsa, bu aşama sonucunda elde edilen manyetik fraksiyona ait konsantre cevherin, 1850 ppm civarında vanadyum içerdiğini söylemek mümkündür. Manyetit mineraline bağlı olarak bulunan vanadyumun kazanılması için, cevherin NaCl ile birlikte 900°C civarında kavrulması (roasting) ve yapısındaki vanadyumun oksitlendirilmesi gerekmektedir. Daha sonrasında ise, manyetit minerallerine ait tanelerin çeperlerinde oluşan V_2O_5 'in kazanılması için bu karışım, H_2SO_4 ile yıkanmaktadır (leaching). Bu işlem sonucu, sıvı faza geçen V_2O_5 , daha sonra uygun kimyasal prosesler uygulanarak çöktürülüp kazanılmaktadır (Freeman ve ark., 2003).

Kavak Krom Tesislerinde ise, günde 450 ton %35 Cr_2O_3 tenörlü krom cevheri yıkanarak, %54-55 Cr_2O_3 tenöründe, %70-75 metal randımanı ile konsantre elde edilir. Tesiste atılan kısım ince şlam ve kumdur. Şlamın tenörü, %11-12 Cr_2O_3 , kumun tenörü % 5-6 Cr_2O_3 olup, günlük artık miktarı 150 tonu bulmaktadır. Tesis, ilk kuruluşundan bu yana sürekli olarak kapasitesini artırmak gayesiyle ekler yapılmış olduğundan, ilk bakışta karmaşık bir yapı göstermektedir. Kırma işlemi Blake Çeneli kırıcısı ve Symons Konili kırıcı ile yapılır. Daha ince kırma yapmak için, çubuklu değirmenlerden yararlanır. Kromitin zenginleştirilmesinde gang mineralleri (serpantin, olivin, 2.5-3.3

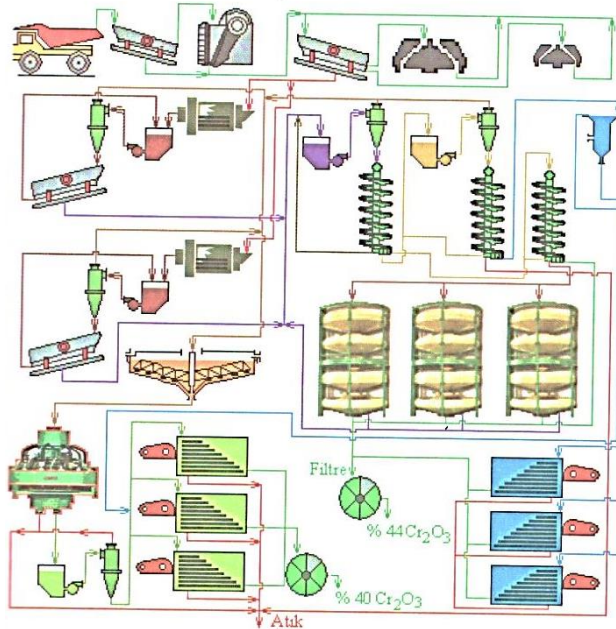
g/cm^3) ve kromit (4.5 g/cm^3) arasındaki yoğunluk farkından faydalanarak gravite yöntemleri uygulanır. Kavak İşletmesinde üç değişik gravite yönteminden yararlanılır:

Ayırıcı Oluk: İri tane büyüklüğünde (roş), yıkamada ayırıcı oluk kullanılır. Bu cihazda ayırıcı ortam olarak ince kromit konsantresi ile suyun karışımından meydana getirilen ve yoğunluğu $2.7-4.5 \text{ g/cm}^3$ arasında olan bir süspansiyon kullanılır. Oluk titreşim hareketi yapar ve ortamın çökmesini önlemek için oluk dibindeki deliklerden su püskürtülür. Hafif gang parçaları bu ortamda yüzerken, kromit parçaları dibe çöker.

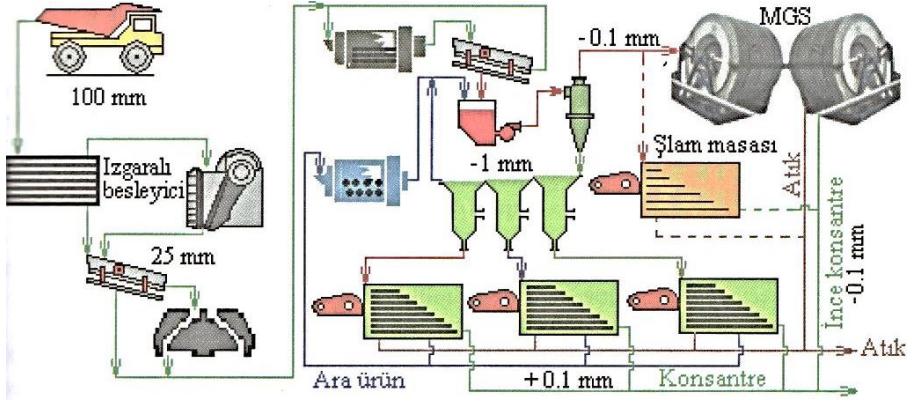
Humprey Spirali: Orta büyüklükteki kromitin yıkanması, bu spiral vasıtasıyla usulüne uygun olarak yapılır.

Sarsıntılı Tabla: İnce kromitin yıkanmasında kullanılır. Kromitle gangın yoğunluk farkları fazla olmadığından, hidro klasifikatörden geçerek çeşitli tane büyüklüklerine ayrılmış cevher ayrı tablolara beslenir. Çok ince kısımdaki (şlamdaki) kromitin kazanılması için, şlam siklonlara püskürtülerek su kısmından ayrılır ve şlam tablalarına beslenir. Konsantre ve artık, çeşitli kurutucu cihazlardan geçirildikten sonra, konsantre ve artık silolarına gönderilir (Atak, 1974).

Kromit, ekonomik olarak değer taşıyan en önemli krom minerali olup, alaşımli çelik, paslanmaz çelik ve diğer metal alaşımlarında da kullanılmaktadır. Krom alaşımli metaller de, demir-çelik sanayisinin yanısıra, nükleer reaktör, petrokimya, buhar, gaz tribünlerinde, petrol rafinerisinde ve diğer endüstri alanlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır (Yıldız, 2014).



Şekil 6: Kef kromit zenginleştirme tesisi akım şeması (Yıldız, 2014)



Şekil 7: Çoklu ortam sınıflandırıcılarının kullanıldığı tesisin akım şeması (Yıldız, 2014)

Kromit cevheri, alaşımlı metal üretimi yanısıra, bu metallerin üretildiği fırınlar için refrakter tuğla yapımında da tüketilmektedir.

Kromitin kimyasal formülü FeCr_2O_4 olup, doğada en çok rastlanan kromit mineralinin formülü ise $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al,Fe})_2\text{O}_4$ şeklindedir. Krom cevherin kullanım alanları, kimyasal bileşimine göre belirlenmektedir.

Ticari olarak yalnızca Cr_2O_3 içeriğine bakılarak sınıflandırılan kromit, bunun yanısıra, fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimleri gözönünde bulundurularak da sınıflandırılabilir. Sadece Cr_2O_3 içeriğine bakıldığında kromit cevheri,

I. Kalite metalürjik krom: $\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq \%46$; $\text{Cr/Fe} > 2/1$,

II. Kalite yüksek demirli kimyasal krom: $\text{Cr}_2\text{O}_3 \%40-46$,

III. Kalite yüksek alüminyumlu refrakter krom: $\text{Cr/Fe} = 1.5-2.1$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq \%30$; $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \geq \%60$ şeklinde gruplandırılmaktadır.

Kromitin içerdiği Cr_2O_3 , Al_2O_3 ve SiO_2 miktarları ile Cr/Fe oranı da krom cevherinin kullanım alanına göre önem taşımaktadır. Teknolojideki gelişmelere uyumlu olarak cevherin kimyasal bileşiminden kaynaklanan kullanıma dayalı sınırlamalar zaman içinde gittikçe daha da esnek hale gelmektedir. Kimyasal cevher olarak ayrımlanan yüksek demir içeriğine sahip krom cevherinden metalürji sanayisinde de yararlanılmaktadır.

Ferrokrom üretimi için, Cr/Fe oranının 2.0'den ve Cr_2O_3 içeriği $\%46$ 'dan yüksek olan metalürjik kalite parça cevher rezervleri günümüzde azalmıştır. Artık daha düşük tenörlü krom cevherlerinden, zenginleştirip bazı ön işlemlerden geçirilerek ferro krom üretilmektedir.

Ferrokrom, korozyona karşı dayanıklı $\%50-65$ arasında krom içeren Fe-Cr alaşımıdır. Metalürjide kromun yaklaşık $\%90$ 'ını ferrokrom olarak, ısıya dayanıklı ve paslanmaz çelik üretiminde kullanılmaktadır. Kaliteli çelikler, $\%12-40$ arasında krom içermektedir. Paslanmaz çeliğin içinde ise krom oranı yaklaşık $\%18$ 'dir. Kromdan çeliğe sertlik ile kırılma ve darbelere karşı direnç kazandırmada yararlanıldığı gibi, oksitlenme ve aşınmaya karşı da koruma

sağlamaktadır. Kaliteli çelik üretiminde düşük karbon içerikli ferrokrom kullanılmakta, değişik oranda Ni ilavesi de üretilen çeliğe daha da üstün özellikler kazandırmaktadır.

Tablo 10: Bir ton ferrokrom üretimi için (yüksek karbonlu) fırına girdi miktarları (Çınar, 2018)

Fırın girdisinin cinsi	Girdi miktarı
Parça kromit	1030 kg
Metalürjik kok	465 kg
Konsantre kromit	1260 kg
Kuarsit	277 kg
Boksit	63 kg
Soderberg (kalsine edilmiş antrasitin zift ile karışımı)	25 kg
Elektrik enerjisi	3930 kWh/ton

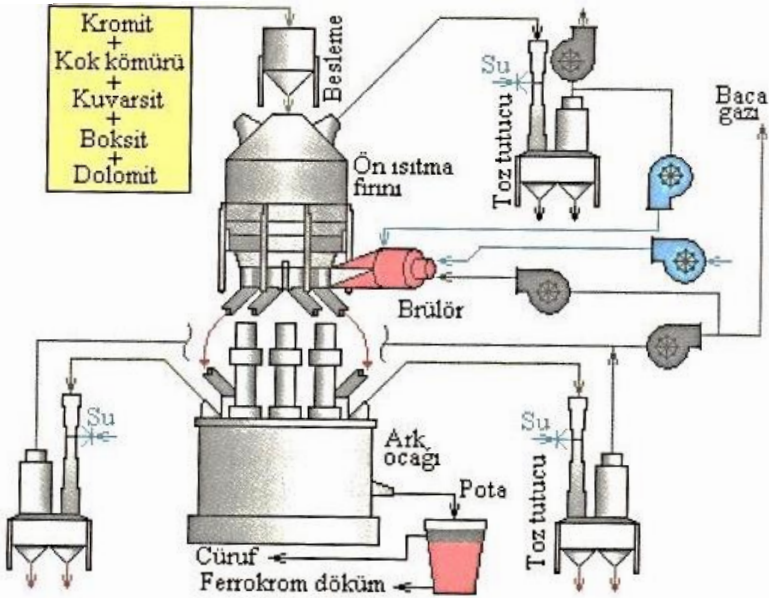
Şekil 8’de ferrokrom üretimi esnasında elektrik ark fırınının iç görüntüsü bulunmaktadır. Fırın içindeki reaksiyonlar şu şekildedir:

- $FeO + C \rightarrow Fe + CO$
- $Fe_2O_3 + 3C \rightarrow 2Fe + 3CO$
- $Cr_2O_3 + 3C \rightarrow 2Cr + 3CO$
- $SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO$



Şekil 8: Elektrik ark fırını ve ferrokrom üretimi (Çınar, 2018)

Şekil 9’da, ark ocağının kullanıldığı klasik bir ferrokrom üretim süreci ve sistemi görülmektedir.



Şekil 9: Ark ocağının kullanıldığı klasik bir ferrokrom üretim süreci (Yıldız, 2014)

Paslanmaz çelik, insan sağlığının, korozyonun, aşınmanın, dekorasyonun söz konusu olduğu her sektörde kullanılmaktadır. Krom metalinden, çeliğin yanısıra, titanyum, bakır ve alüminyum alaşımlarında, ısıya ve elektriğe karşı dirençli kaliteli metal üretiminde yararlanılmaktadır.

Ferrokrom üretiminde en önemli maliyet girdisi elektrik enerjisidir. Ferrokrom, kromitin yüksek sıcaklıktaki kömür ile indirgenmesi sonucu üretilmektedir. İndirgeme ortamı için gerekli sıcaklık elektrikli ark ocaklarından sağlanmaktadır. Ark ocaklarındaki sıcaklık, yaklaşık 2800°C'e kadar çıkabilmektedir (Yıldız, 2014).

4. KROMUN TEMEL UYGULAMA ALANLARI

Kromun kullanıldığı temel uygulama alanları, kimya sanayisi, metalürji, refrakter (ateşe dayanıklı muhtelif malzemelerin üretimi), döküm sanayisi yanısıra, mutfak, banyo metalleri ve otomotiv sanayisidir. Ayrıca, krom kimyasalları kullanılarak boya hammaddesi yapımı, kromu süper alaşımlarla yüksek sıcaklıklara dayanım kazandırarak verimi yüksek türbin motorlarının yapımı da gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 10'da, kromit cevherinin ağırlıklı olarak kullanıldığı sektörler ve Tablo 11'de de kullanım alanına göre istenen özellikler görülmektedir.

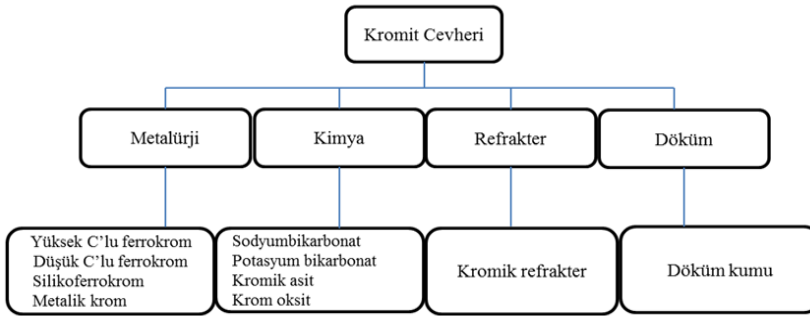
Krom metalinin ekonomik olarak üretilebildiği tek mineral olan kromit, yararlanıldığı endüstri dalına göre belli başlı dört alanda kullanılmaktadır:

1. Metalürjik Kromitler: Ferrokrom üretiminde kullanılan kromitler en az %46 Cr_2O_3 içerirler. Alaşımın kalitesini belirleyen Cr/Fe oranının 2'nin üzerinde olması gerekmektedir.

2. Kimyasal Kromitler: Yüksek oranda demir içermektedirler. Cr_2O_3 içerikleri, %40-60 arasında değişmektedir. Bikromatların üretiminde kullanılmaktadır.

3. Refrakter Kromitler: Isıya karşı yüksek mukavemetlerinden dolayı, ateşe dayanıklı tuğla yapımında kullanılmaktadır. İçeriğinde, %20'den fazla Al_2O_3 bulunmaktadır.

4. Döküm kromit kumu olarak değerlendirilir. $Cr_2O_3 \geq$ %46 değerinde olabilir.



Şekil 10: Kromit cevherinin ağırlıklı olarak kullanıldığı sektörler (Yıldız, 2014)

Tablo 11: Kromit cevherinin kullanım alanlarına göre özellikleri. (Yıldız, 2014)

Sektörün adı	Kromitin içeriği	Kromitin oranı	Özelliği
Metalürji	Cr_2O_3	= %34-40	Cr/Fe > 2.5, parça
	Cr_2O_3	> %40	Cr/Fe > 2.0, parça
	Cr_2O_3	= %40-46	Cr/Fe > 2.6, konsantre
	Cr_2O_3	> %36	-25 mm, yıkanmış
Kimya	Cr_2O_3	> %40	Cr/Fe > 2.5, konsantre
Refrakter	Cr_2O_3	> %48	$SiO_2 < %4$, parça
	$Cr_2O_3 + Al_2O_3$	> %60	$SiO_2 < %4$, parça
	Cr_2O_3	> %46	$SiO_2 < %1$, konsantre
	Cr_2O_3	> %50	$SiO_2 < %2$, konsantre
Döküm Kumu	Cr_2O_3	> %44	$SiO_2 < %4$
	Fe_2O_3	> %26	CaO < %0.5, konsantre

Kromun, geniş kapsamlı olarak kullanıldığı alanlar ise paslanmaz çelik üretimi için metalürji sanayisinde, banyo ve mutfak armatürlerinin metalllerinde, kimya sanayisinde, ateşe dayanıklı çeşitli malzemeler üretimi için refrakter sanayisinde, otomotiv sanayisinde kullanmak için, gemi, denizaltı, mermi, uçak, top ve silahlarla ilgili destek sistemlerinde, verimi yüksek türbin motorlarının yapımında (kromun süper alaşımları ile yüksek sıcaklıklara dayanımlı), kromun kimyasallarını kullanarak boya hammaddesi

yapımında, deri tabaklama, metal kaplama, seramikler, boya maddeleri (pigment), parlatıcı gereçler, boyalar, katalizör, konserve kutulama (canning agents), su temizleme (water treatment), su işleme, sondaj çamuru olarak kullanılır. Görüldüğü üzere, krom metali ve bileşiklerinin kullanıldığı bellibaşlı sanayi alanları, kimya, döküm, metalürji ve refrakter sanayisidir. Cevherin tenörü ve yabancı bileşenlerinin oranı gibi teknolojik özellikler, kullanım alanının hangisi olacağını belirlemede önemlidir. Diğer taraftan piyasada Cr_2O_3 tenörüne göre cevherin kalitesi belirlenmekte, %48'den fazla Cr_2O_3 tenörü olan cevherlere birinci sınıf, %42 ile %48 arasında olanlara ikinci sınıf ve %42'den düşük olanlara üçüncü sınıf cevher denilmektedir. Metalürjide kullanılan krom cevherinin SiO_2 oranının ise, %6'dan az olması gerekmektedir. Kromit tanelerinin büyüklüğü de cevher kalitesinin belirlenmesi önemli bir yer tutmaktadır. Burada önemli bir husus, cevherin tane (kristal) boyu 1-3 mm'nin altında olmamalıdır. Cevher sert ve kompakt olmalıdır (Temur, 2001). Metalürji sanayisinde krom cevherinin en önemli kullanım alanı paslanmaz çelik yapımında yararlanılan ferrokrom üretimidir. Ferrokrom ise bilhassa paslanmaz çelikten metallerin ve silah sanayisinin oldukça önemli bir metalidir. Krom, çeliğe sertlik, kırılmaya ve darbelere karşı direnç verir, oksitlenme ve aşınmaya karşı koruma sağlamaktadır. Bu nedenle kromun muhtelif alaşımlarından, denizaltı, mermi, gemi, uçak, top ve silahlarla ilgili destek sistemlerinde yararlanır. Paslanmaz çelik, gösterdiği dayanıklılığın yanı sıra, kullanıldığı yerlere göre de estetik bir görünüm kazandırması nedeniyle, son zamanlarda tren vagonlarının, otobüslerin, şehir içlerinde otobüs duraklarının, sokak ve cadde aydınlatma sistemlerinin, yapıların merdiven korkuluklarının, deniz içinde kurulan petrol arama platformlarının üretiminde de giderek artan miktarlarda kullanılmaktadır. Krom kullanılarak yapılan alaşımlardan, ısıya dayanımı yüksek, verimli olarak çalışan türbin motorlarının yapımında da yararlanılmaktadır. Ayrıca kromdan, metalürji sanayisinde ferro-siliko-krom, ferrokrom, ekzotermik krom katkıları, krom bileşikleri, krom metali ve diğer krom alaşımları şeklinde de istifade edilmektedir. Metalürji sanayisinde kullanılan krom metali ve krom-demir alaşımlarının, son yıllarda yaklaşık olarak %95'i ferrokrom şeklinde ve ferrokrom ise de genellikle ısıya dayanımlı çelik ve paslanmaz çelik üretiminde kullanılmaktadır. Paslanmaz çeliğin bileşimine bakıldığında ise, %12-40 arasında krom içerdiği görülmektedir. Bunun belli başlı nedeni, çelik imalatında günümüz teknolojisindeki ilerlemeler kromun oksitlenme ve cürufa karışma yoluyla kaybını azalttığından, ferrokrom üretimi ve kullanımı daha verimli bir hale gelmekte ve bu durumun sonucu olarak da ferrokrom üretimine yönelim, paslanmaz çelik tüketimine nazaran daha az bir hızla gelişim göstermektedir. Krom metalinin, ısı ve elektriğe dayanımlı alaşımlarda, Al, Cu, Ti alaşımlarında ve yüksek performans gösteren alaşımlarda verimli bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Uzay sanayisinde lider durumda olan ABD, Dünya'nın en büyük krom metali tüketicisi olup,

batı dünyasında kullanılan krom metalinin %55-60'ını tüketir. Ancak, uzay sanayisinde görülen gelişmelere bakıldığında, bu alanda kullanılan yüksek performans gösterici alaşımlardaki krom metalinin ve geleneksel nikel esaslı süper alaşımlar kullanımı yerine, kompozit malzemeler ve seramiklerin kullanımı gittikçe artmaktadır. Bu gelişmeye de bakarak, krom metalinin uzay sanayisinin dışında kullanımının daha da yaygınlaşacağı anlaşılmaktadır. Öte yandan, kromlu alaşımların, alaşımdaki özelliği kaybettirmeden katılan krom metalinin miktarını düşürme konusunda da çalışmalar ve ayrıca krom kullanılan malzemelerin yeniden kullanımına yönelik metod geliştirilmesi yönünde de çalışmalar sürdürülmektedir. Sanayide kullanılan krom kimyasallarının çoğunun da, kimyasal kalite niteliğindeki krom cevherinden doğrudan doğruya elde edilen sodyum bikarbonattan üretildiği görülmektedir. Sanayideki kullanımına bakıldığında, en yaygın kullanımı olan krom kimyasallarının, kromik anhidrit, krom oksit ve sodyum bikromat olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, ticari olarak üretilmekte olan diğer bileşikler ise, sodyum kromat, potasyum bikromat, amonyum bikromat, kurşun kromat, bazik krom sülfat ve potasyum çinko kromattır. Kromun kullanıldığı kimyasallar, paslanmayı engelleyici özelliklerinden ötürü, gemi ve uçak sanayisinde yaygın bir şekilde; kimya sanayisinde de kromik asit, sodyum bikromat ve boya hammaddeleri imalatında kullanılmaktadır. Krom metali içeren kimyasallar, sanayide, deri tabaklama, parlaticı malzemeler, metal kaplama, boyalar, katalizörler, su işleme işlerinde, konserve kutulamalarında, temizleme işlerinde, sondaj çamurlarında, boya pigmentlerinde, seramiklerde ve daha bir çok alanda da kullanılmaktadır. Refrakterlik özelliği taşıyan krom cevherinden ise, bilhassa çelik üretiminin yapıldığı yüksek fırınlarda yaygın bir şekilde yararlanılmaktadır. Öte yandan, yüksek fırın yöntemine dayanılarak yapılan çelik üretiminde meydana gelen azalma ise, refrakter amaçlı krom tüketimini de olumsuz bir şekilde etkilemiştir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2022).

Paslanmaz çeliklere, kimyasal bileşim yönünden bakıldığında, içinde %12 krom elementi olan bir demir karbon alaşımı olarak tanımlayıp, niobyum, titanyum, molibden ve nikel gibi elementleri de içererek korozyon direnci ve paslanmazlık özelliğinin arttığı söylenebilir.

Paslanmaz çelikleri belli başlı dört ana grupta toplamak mümkündür. Bunlar, ferritik-martenzitik-östenitik-östenitik şeklindedir.

Ferritik paslanmaz çeliklerin içlerinde genellikle nikel elementi olmayıp, %10.5 ile %30 oranı gibi yüksek miktarlarda krom olup, ayrıca, titanyum, molibden, vanadyum gibi karbür yapıcı ve ferritik oluşumu dengeli kılan alaşım elementlerini kapsayan bir çelik grubudur. Yüksek krom oranı içermeleri, bu çeliklere çok yüksek seviyede bir korozyon direnci sağlamaktadır. Bu tip çeliklerin diğer bir özelliği de östenitiklerin aksine manyetik olmalarıdır. Düşük karbon muhtevaları nedeniyle, ısıl işlem

uygulanamaz ve rahatlıkla haddelenebilmektedirler. Bu çeliklere uygulanabilen ısı işlem ise tavlama işlemi şeklindedir.

Östenitik paslanmaz çelikler, Dünya toplam paslanmaz çelik üretiminin yaklaşık %60'ını oluşturan, 300 serisi veya östenitik paslanmaz çelik diye adlandırılan çeliklerdir. Minimum %16 krom içermekte, maksimum %0.15 karbon ve östenitik yapıyı çok düşük sıcaklardan itibaren ergime sıcaklığına kadar kararlı tutmak amacıyla yeterli miktarlarda nikel ve/veya mangan içermektedirler. Bunların en çok bilinen türü ise, 304 kalite (18/8) paslanmaz çelik olarak bilinen ve içeriğinde %18 krom ve %8 nikel bulunan çeliktir.

Östenitik paslanmaz çeliğin bir özelliği de ısı işlemine tabi tutulmaları, manyetik özellik taşımamaları, haddeleme ile sertleştirilebilmeleri, süneklik özelliklerinin yüksek olması, mükemmel bir korozyon dayanımına, kaynaklanabilirlik ve işlenebilirlik özelliğine sahip olmalarıdır. Östenitik yapının oluşumu için, yaklaşık %8-10 civarında bir nikel elementinin karışıma katılması gerekmektedir.

Östenitik yapı bir tek nikel elementi ile oluşturulmayıp, nikelin yanı sıra nitrojen, karbon, mangan ve bakır elementi de kullanılmaktadır.

Martensitik paslanmaz çelikler, içeriğinde %11-17 arasında krom bulunan en önemli alaşım grubundandır. Buna rağmen muhtevastaki %0.10-0.65 karbon içeriği grubun etkinliğini tamamıyla değiştirmektedir. İçeriğindeki yüksek oranda karbon, ısı işlemin uygulanmasıyla da sertleşme sağlamaktadır. Bu grup paslanmaz çelikler yüksek sertliğin gerektirdiği durumlarda, en elverişli grubu teşkil etmektedir. Kaynak kabiliyeti yönünden bakıldığında zayıf olduğu görülür ve kaynak işlemi sonrası tavlama ve sertleştirme gerektirmektedir. Östenitik grupla kıyaslandığında, korozyon dayanımının daha düşük olduğu görülmektedir. Malzemenin daha iyi bir şekilde verimlilik göstermesine bakıldığında, yüksek sıcaklıklarda dayanıklılığının düştüğü ve sıfırın altına inilen ısılarda ise yumuşaklığını kaybettiği görülmektedir. İşlenebilirliğinin, tavllanmış haliyle gayet iyi olduğu görülmektedir. Ancak, sertleşme durumunda işlenebilirliği zorlaşmaktadır.

Dubleks paslanmaz çelikler, elde edilmeleri, yaklaşık olarak eşit miktarda ferrit ve östenit içeren bir mikroyapının oluşturulması ile mümkün olmaktadır. Korozyon direnci ve sertliği yüksek olması istenen uygulamalarda önem kazanmaktadır. Sertleştirilmeleri ısı işlemle olmamaktadır. Östenitik paslanmaz çeliklerle kıyaslandığında, dubleks paslanmaz çeliklerin daha yüksek bir mukavemete sahip oldukları görülmektedir. Bunun yanısıra bölgesel korozyon etkilerine karşı özellikle çatlak ve stres korozyonuna, çekirdeklenmeye karşı östenitik paslanmaz çeliklerden daha iyi bir dayanıma sahiptirler.

Dubleks kalitelerin, içlerinde olan %19-28 aralığındaki yüksek oranlardaki krom, %5'e kadar varan molibden ve yine östenitlere nazaran daha düşük miktarlarda olan nikel muhtevası sayesinde daha mukavim olmaktadırlar.

Paslanmaz çelik kaliteleri hakkında açıklama:

303 Kalite paslanmaz çelik: Bu kalite çeliği, paslanmaz çeliğin otomati olarak da nitelendirmek mümkündür. Bünyesinde bulunan sülfürün bir neticesi olarak, bu kaliteye sahip çeliklerin işlenebilirliği yukarı seviyelerdedir. Ancak buna karşın, bünyesindeki sülfürün varlığı nedeniyle malzemenin korozyona karşı olan dayanımı azalmaktadır. Bu durumda, 303 kalite çeliklerin korozyona karşı olan dayanımı, 304 kalite paslanmaz çeliğe nazaran daha azdır. Uygulandığı alanlara bakıldığında, seri üretimin yapılacağı paslanmaz çelik şaftlarda, şaft millerinde, otomotiv dişlilerinde ve bağlantı elemanlarında, elektronik ünitelerinde ve bazı dekoratif ürünlerin üretiminde ve gıda sektöründe kullanılmaktadırlar.

304 Kalite paslanmaz çelik: En yaygın kullanılan ve paslanmaz çeliğin temel kalitelerinden biri olup, en yaygın bir şekilde kullanılanıdır. Bu tip çelik paslanmazdır. Malzemenin kimyasal bileşiminin, korozyon ve oksidasyon direncinin, mekanik özelliklerinin, kaynak yapılabirliğinin malzemenin fiyatı gözönüne alındığında uygun olması nedeniyle tercih edilmektedir. Bu tip çeliklerin, düşük sıcaklıklardaki özellikleri ve işleme sertleştirmesine karşı verdikleri tepkinin mükemmel olduğu görülmektedir. Uygulandığı alanlara bakıldığında, mutfak, mutfak eşyaları, gıda, ev eşyaları, otomotiv ve tıp sanayisinde, eşanjör ve boylar üretiminde, evye imalatında kullanıldığı görülmektedir. Ürünleri, düşük sıcaklıklarda da kullanılabilirler.

304L Kalite paslanmaz çelik: Bu kalitedeki çelikler paslanmazlar ve 304 kalite paslanmaz çeliklere göre daha az karbon ve daha fazla nikel içermektedirler. Bu kalitedeki çeliklerin işlenebilirlik özelliği 304 kalite paslanmaz çeliklere nazaran daha zor, mekanik özelliklerine bakıldığında ise, yine 304 kalite paslanmaz çeliğe nazaran daha düşük olduğu görülmektedir. Uygulandıkları alanlar, kazanlar ve depolama amacıyla kullanılan tanklar için uygun özelliklere sahiptirler. Bunun yanı sıra, kimya, kâğıt sanayisi, petrokimya sanayisi ve ısı değiştirme aygıtlarının üretiminde kullanılırlar. Genellikle kullanıldıkları yerlerdeki sıcaklıklar 400°C'nin altında olmalıdır.

316 Kalite paslanmaz çelik: Bu kalitedeki paslanmaz çelik, 304 kalite paslanmaz çeliğin içeriğine molibden ve daha fazla miktarda nikel eklemek suretiyle elde edilmektedir. Bu karışım sayesinde korozyona karşı olan dayanımı, deniz suyu, asidik sıvılar gibi sert koşullu ortamlarda bile yüksek seviyededir. Kopma dayanımına bakıldığında ise, 304 kalite malzemelere nazaran daha yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Petro-kimya, kimya ve gıda sanayisinde kullanılmaktadır. Ayrıca mutfaklarda, cephe kaplamalarında ve buhar kazanlarında da kullanılmaktadır.

316L Kalite paslanmaz çelik: Bu kalitedeki paslanmaz çelik, 316 kalite paslanmaz çeliğe nazaran düşük karbonludur. Ayrıca, kalın kesitlerde de kaynağı takiben tavlama yapılması gerekmez. Parçaları kaynak vasıtasıyla birleştirildiğinde ısınmadan dolayı korozyon olması riskiyle karşı karşıya kalındığından, böyle bir durumda daha az karbon içerikli olan bu tip

malzemenin kullanılması uygun olacaktır. Petro-kimya, kimya ve gıda sanayisinde kullanılmaktadır. Endüstriyel atmosfer şartlarına ve deniz tuzuna karşı da dayanımlıdır.

316Ti Kalite paslanmaz çelik: Bu kalitedeki paslanmaz çelik ise, 316 kalitesindeki paslanmaz çeliğin içine titanyum elementinin eklenmesiyle elde edilmektedir. Malzememizin 550°C ile 800°C arasındaki sıcaklıklara uzun bir süre maruz kalması halinde kullanılması uygundur. Bu malzemenin içinde yaklaşık %0.5 oranında titanyum bulunmaktadır. Daha ziyade petro-kimya, kömür, kimya, lastik, tekstil, reçine ve selüloz kullanılmaktadır.

309 ve 309S Kalite paslanmaz çelik: Azotlu ve kükürt içerikli gazlara karşı dayanımlı olan ve 1050°C'lik sıcaklıklarda da oksidasyon dayanımı yüksek olan bir paslanmaz çeliktir. Bunun yanısıra sürünme ve çekme dayanımı özellikleri de üstündür. Bu özellikleri nedeniyle, yüksek sıcaklıklarda kullanılacak malzemelerde, fırınların, ısıtıcıların ve segmentasyon kutularının yapımında kullanılmaktadır.

310 ve 310S Kalite paslanmaz çelik: 1200°C sıcaklıklara kadar kullanılabilen, korozyon dayanımı ve kaynak kapasitesi yüksek olan bir alaşımdır. Bu özelliklerinden ötürü, buhar kazanlarında, fırın imalatında, boru hatlarında ve petrol tesislerinde değerlendirilmektedir.

420 Kalite paslanmaz çelik: Bu kalitedeki çeliğin de en önemli özelliği, gerilime karşı mukavemetinin yüksek olmasıdır. Tavlanmış iken işlenebilirliği daha iyi olup, normal hallerde bu malzemenin korozyon direnci yüksektir. Petrol ve petro-kimya sanayisinde, gıda ve gıda üretim tesislerinde, makine sanayisinde, dekorasyon alanında, ulaşımda, valflerin, pistonların ve şaftların imalinde kullanılmaktadır.

430 Kalite paslanmaz çelik: Bu kalitedeki paslanmaz çelik de, ferritik sınıfına giren, düşük krom ve karbon içerikli bir çeliktir. Kaynak yapılabilme özelliği sınırlıdır. İçlerinde molibden ve nikel bulunmadığından 300 serisinden olan paslanmaz çeliklere nazaran daha ucuzdurlar. Kullanıldıkları yerlerde, yüzey görünümü daha iyidir. İçinde nikel bulunmadığından mıknatıslanma yapabilirler.

Daha ziyade mutfak aletlerinde, otomotiv sanayisinde ve dekoratif ürünlerin yapımında kullanılır.

5. YAPI SEKTÖRÜNDEKİ UYGULAMA ALANLARI

Yapı sektöründe de yaygın bir kullanım alanı bulunan krom ve bilhassa paslanmaz çelik yapımında kullanılan ferro krom metali, yapı sektöründe, yaygın olarak aşağıda belirtilen alanlarda kullanılmaktadır.

Endüstriyel mutfak ekipmanlarının üretiminde krom ve alaşımı olan ferro krom metalinden yararlanarak, özellikle dayanıklı ferro krom ayaklar ve ferro krom kulplar ve yine mutfak endüstrisinde kullanılan ve ferro krom gerektiren tüm malzemelerde ve mutfak yedek parçalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yine ferro kromdan, balkon korkuluklarında, paslanmaz balkon, Fransız balkon ve cam balkon modellerinde de yararlanılmaktadır. Bilindiği gibi balkon korkulukları EN (European Norm) standartlarına göre 92 cm yüksekliğinde olmalı ve parmaklıklar arası genişlikler ise en fazla 15 cm olmalıdır.

Metal mutfak eşyalarının ve gereçlerinin çoğunun paslanmazlık özelliğine sahip olması istendiğinden bu gereçler, genellikle krom ve ferrokromdan imal edilmektedir. Şekil 11’de bunun örnekleri görülmektedir. Görüldüğü gibi günlük hayatımızda, krom çeliğe paslanmazlık özelliği kazandırdığı için vazgeçilmez bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 11: Ferro krom kullanılmış olan mutfak ekipmanı örnekleri

Genellikle 304 kalite paslanmaz çelikten imal edilen balkon korkulukları, bakım gerektirmeyen ve dayanıklılık gösteren, şık ve zarif görünümlü bir malzeme olan, 304 kalite paslanmaz çelikten imal edilmekte, üretimlerin tümü, talebe göre istenilen tasarımda yapılmaktadır. Şekil 12’te muhtelif balkon korkuluğu örnekleri görülmektedir.



Şekil 12: Ferrokrom kullanılarak yapılmış olan balkon korkuluğu örnekleri

5.1. Krom Alaşımlarının Özellikleri ve Sektörel Kullanımları

304 kalite paslanmaz çeliğin, erime sıcaklığı 1450°C, öz kütlesi 8000 kg/m³, elastisite modülü 193 GPa, elektriksel direnç miktarı 0.072x10⁻⁶ Ωm ve ısı geçirgenliği 17.2 W/m.K'dır. Anlaşılacağı gibi yüksek sıcaklıklara dayanımı nedeniyle de, 304 kalite paslanmaz çelik tercih edilen bir ürün olarak değerlendirilmektedir. (Ümit Paslanmaz, 2023)

304 kalite paslanmaz çelik, ilk olarak 1924 yılında Firht-Vickers'da William Herbert Hatfield tarafından geliştirilmiş ve "Stay Brite 18/8" markası altında ticari olarak kullanıma sunulmuştur. 304 paslanmaz çelik, paslanmaz çelik sektörünün temeli olup ve aynı zamanda da tüm paslanmaz çelik modelleri arasında en çok tercih edilen alaşımdır. 304 paslanmaz çeliğin diğer alaşımlara göre daha fazla tercih edilmesinin sebebi ise kolay temin edilebilmesi, kolaylıkla şekillendirilebilmesi ve kaynak işleminin uygulanması esnasında kolayca uyum sağlayabilmesidir. Öte yandan, diğer paslanmaz çelik türlerine kıyasla oldukça uygun bir fiyatla alınabilmektedir. Bu nedenle, fiyat-performans ilişkisinin uygunluğu, en sık tercih edilme nedenlerinden biridir.

304 kalite paslanmaz çelik, %15 ila %20 arasında krom ve %2 ila %10 arasında nikel içermektedir. Diğer paslanmaz çeliklere oranla çok daha az elektriksel bir iletken olduğundan manyetik özelliği bulundurmaz. 304 paslanmaz çelik, östenitik paslanmaz grubuna girmektedir. Östenitik paslanmaz grubuna dâhil olan diğer paslanmaz çelikler gibi 304 paslanmaz çelik de yüksek kuvvet basıncına ve yüksek ısı işleme oldukça dayanıklıdır. 304 kalite paslanmaz çeliği, korozyon dayanımı, ısı dayanımı, mekanik özellikleri, kaynak yapılabilirliği, işlenebilirliği ve dövülebilme yetkinliği konularında değerlendirilebilir.

304 kalite paslanmaz çeliğin korozyon dayanımı: Diğer paslanmaz çeliklerle kıyaslandığında 304 kalite paslanmaz çelik, çok daha iyi korozyon bir dayanımına sahiptir. Kullanıldığı iş alanlarına bağlı olarak, oluşması muhtemel basınçlara karşı oldukça dayanımlıdır. İnorganik kimyasallara, organik kimyasallara ve renkli boyalara karşı da dayanıklıdır. 304 paslanmaz çeliğin günlük kullanımlarda oldukça başarılı olduğu açıktır. Ancak, anormal korozif ortamlarda paslanma yapabileceği için, bu tip ortamlarda kullanılmamalıdır.

304 kalite paslanmaz çeliğin ısı dayanımı: İyi bir oksitlenme dayanımına sahip olan 304 kalite paslanmaz çelik, karbür çökelmelerine karşı çok dayanıklı olmasa da bazen 425 ila 860 derecenin alt ve üst sınırında değişen ortamlarda iyi performans gösterebilmektedir. Daha çok günlük kullanıma uygun olduğundan, 304 kalite paslanmaz çeliğin ısı dayanımı da buna göre ayarlanmıştır.

304 kalite paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri: 304 kalite paslanmaz çelik günlük kullanıma uygun bir şekilde üretilmiş olup, kullanım alanları göz önünde bulundurulduğunda yeterli mekanik özelliklere sahip olduğu görülür.

Ancak bu paslanmaz çelik türü, yüksek kopma veya akma durumları olabileceği ortamlar için uygun değildir.

Farkına varamasak bile, günlük hayatımızda her zaman karşımıza çıkan ve kullandığımız malzemelerden biri, tüm paslanmaz çelikler arasında en sık karşılaştığımız model olan 304 kalite paslanmaz çeliktir. Bu malzemenin kullanımı, petrokimya, kimya, ev aletleri (çatal-bıçak takımları, düdüklü tencereler, kaplar), endüstriyel mutfaklar (lavabolar), otomotiv yan sanayi, tıp endüstrisi ve gıda sanayi gibi pek çok sektörde tercih edilmektedir. 304 kalite paslanmaz çelik, tavllanmış şekilde olup, diğer paslanmaz çeliklerde karşılaştığı gibi manyetik bir özellik göstermez. Ancak bu durumun soğuk haddeleme işlemi ile tersine çevrilebildiği görülmektedir. 304 kalite paslanmaz çeliğe uygulanan tavlama işlemi ana ısıl işlemidir. Bu işlemin yapılmasında paslanmaz çelik kullanılarak, 1000 ile 1020°C arasında önce ısıtma ve sonrasında da soğutma işlemi uygulanır. Östenitik paslanmazlar grubuna dâhil olduğu için, 304 kalite paslanmaz çelik sadece soğuk haddeleme işlemi ile sertleştirilebilmektedir. 1000 MPa'ı aşan basınçlara dayanabilen 304 kalite paslanmaz çeliğin basınç dayanımını daha da artırabilmek için yine soğuk haddeleme işlemi yapılmaktadır.

Malzemenin işlenebilirliği: Diğer paslanmaz çelik türleri ile kıyaslandığında, 304 kalite paslanmaz çeliğin işlenebilirliği oldukça düşük bir değerdedir. Ağır ağır besleme ve düşük hızlarda iyi bir sonuç alınabildiği için işlenebilirliği verimli değildir.

Malzemenin dövülebilme olan yatkınlığı: Diğer karbonlu çelikler gibi, 304 kalite paslanmaz çelik de, ortalama olarak bir dövülebilirlik oranına sahiptir. Günlük kullanımlara uygun bir şekilde üretilen bu paslanmaz çeliğin, yüksek metal dövüm oranını gerektiren durumlarda tercih edilmesi uygun değildir (Ümit Paslanmaz, 2023).

Günümüzde, paslanmaz çelikten yapılmış malzemelerin kullanımı gittikçe artmaktadır. Yaşamımızda, her alanda pek çok paslanmaz çelik ürünü ile karşılaşmaktayız. Paslanmaz çelikten yapılmış malzemelerin kullanım alanlarının artması, paslanmaz çeliğin kullanıldığı ürün çeşitlerinin de artmasını beraberinde getirmiştir. Aşağıda paslanmaz çelik ürünlerinin neler olduğu ve ne amaçla kullanıldığının üzerinde durulacaktır. Paslanmaz ürünlerini temel olarak üç grupta incelemek mümkündür. Bunlar sırasıyla, paslanmaz boru ve profiller, paslanmaz dolu malzemeler ve paslanmaz fittingslerdir.

Paslanmaz Boru ve Profiller: Paslanmaz boruları, paslanmaz çekme boru ve paslanmaz dikişli boru olmak üzere iki şekilde sınıflandırmak mümkündür. Paslanmaz dikişli borular, çoğunlukla basıncın düşük olduğu boru hatlarında ve dekorasyon yapımında tercih edilirken, dikişsiz borular ise, daha büyük basınçlara dayanımı gerektiren ağır sanayilerde tercih edilirler. Dikişsiz paslanmaz boruların basınca olan dayanımına bakıldığında, dikişli paslanmaz borulara nazaran basınca daha dayanıklı olduğu görülmektedir. Öte

yandan, paslanma ve korozyona karşı olan dirençlerinin her iki boru türünde de aynı olduğu görülmektedir. Dikişli paslanmaz boruların özelliklerinin diğer boru türüne nazaran daha üstün olması, uzun ömürlü olmaları ve estetik bir görünüme de sahip olmaları nedeniyle kullanım alanlarının oldukça geniş olduğu görülmektedir. Bu nedenle, talebe bağlı olarak çok farklı ebatlarda üretilebilmektedirler. Paslanmaz profiller de, paslanmaz boruların yanında pek çok yerde kullanılmaktadırlar. Paslanmaz profillerin üretimi, boruların kare ya da dikdörtgen kaplara konularak şekil verilmesiyle olur. Bu kategorinin ürünlerini de aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür:

Paslanmaz çekme boru; paslanmaz çelikten yapılmış kütüklerin, muhtelif malafa ve kalıpların kullanılması suretiyle üretilen bir paslanmaz çelik boru türüdür.

Paslanmaz dikişli boru; paslanmaz çelik sacların şeritler halinde kesilmesi, akabinde de muhtelif kalıplar kullanmak suretiyle yuvarlak bir şekle ulaştırılan ürünlerin kaynak yapılarak yuvarlak formun kalıcılığı sağlanmasıyla oluşturulan bir paslanmaz çelik boru türüdür.

Paslanmaz dikişli profil; ilk olarak boru formunda üretilen profillere, Türk kafası adlı özel olarak hazırlanmış kalıpların kullanılmasıyla isteğe göre, dikdörtgen ya da kare formu verilip, paslanmaz çelik dikişli borular ile aynı metot uygulanarak üretilen ürünlerdir.

Paslanmaz dolu malzemeler, 3 ana ürün olarak sınıflandırılabilir. Bu ürünler şunlardır:

Paslanmaz köşebent; çeşitli kalıplar kullanmak suretiyle paslanmaz çelik kütüklerinin şekillendirilmesi sonucu üretilirler. 90° açılı, L ya da V şekilli ürünlerdir.

Paslanmaz lama; paslanmaz çelik silme de denilen, paslanmaz lama, paslanmaz çelik köşebentlerde olduğu gibi paslanmaz çelik kütüklerinin kalıplardan geçirilmesi suretiyle üretilmektedir. Çelik kütükler, dikdörtgen şeklindeki kalıplardan geçirilerek üretilmektedir.

Paslanmaz mil; en çok tercih edilen paslanmaz çelik dolu malzemelerden yapılarak, satılan bir üründür. Paslanmaz çelik kütüklerinin diğer dolu malzemelerde olduğu gibi kalıplardan geçirilmesi yöntemi ile üretilmektedirler. Paslanmaz çubuk olarak da adlandırılabilen yuvarlak bir şekli olan paslanmaz millerdir.

Makine parçalarının imalatında genellikle paslanmaz dolu malzemelerin kullanılması tercih edilmektedir. Paslanmaz miller ise, çoğunlukla karıştırıcı gibi makinelerde şaft olarak ya da parça kesilmesi suretiyle makine parçası yapımında kullanılırken, köşebent ve lamaların daha çok makine şaselerine sağlamlık vermek için ve çeşitli talaşlı üretim uygulamalarından sonra üzerlerinde açılacak yuvalar sayesinde hareket aktarım elemanı olarak yararlanılırlar. Dolu malzemeler incelendiğinde korozyona karşı olan dayanımlarının, diğer paslanmaz ürünler gibi yüksek olduğu ürünlerdir.

Paslanmaz fittingsler: Paslanmaz çelik borularının bağlantı elemanlarına paslanmaz fittings denilmektedir. Bu elemanlar, boru hatlarının birbirine birleştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadırlar. Bu önemli özelliklerinden bazıları ise, boru hatlarının yön değiştirilmesi ve dallanması, başka hatlara bağlanması gibi durumlarda yarar sağlamaktadır. Paslanmaz fittingsler, paslanmaz dişli fittingsler ve paslanmaz kaynaklı fittingsler olmak üzere kendi aralarında da ikiye ayrılırlar. Bunlardan paslanmaz dişli fittingsler, üzerlerinde bulunan erkek ve dişi dişler nedeniyle kullanılacakları alanlara kolaylıkla kenetlenirilebilirler. Ayrıca hatların kolaylıkla ve hiçbir maliyeti olmaksızın sökülüp takılmaları, paslanmaz dişli fittingslerle sağlanmaktadır. Paslanmaz fittingslerden, paslanmaz çelik kaynaklı fittingslere nispetle daha düşük basınçlarda da yararlanılabilmektedir. Hatların herhangi bir maliyet olmadan rahatlıkla sökülüp takılabilmesine olanak sağlayan ürünler içinde paslanmaz dişli fittingsleri sayabiliriz. Paslanmaz dişli fittingsler, paslanmaz çelik kaynaklı fittingslerle karşılaştırıldığında, daha düşük basınçlarda kullanılabildiği görülmektedir. Bunun sebebi, belli basınçlar üzerine çıktığında dişlerin sızdırma yapabilmesi durumudur. Paslanmaz dişli fittingsler, paslanmaz kaynaklı fittingslere nazaran daha düşük basınçlı sistemlerde kullanılabilen fittings elemanlarıdır. Basıncı yüksek olan ortamlarda kullanılabilmelerinin sebebi, bağlantı yerlerinin kaynak yöntemi ile bağlanmasıdır. Ancak, basınçlı ortam şartlarına daha mukavim olsalar da paslanmaz kaynaklı fittingslerin bulunduğu hatta herhangi bir değişiklik yapılması gerektiğinde hattın kesilmeden ayrılmasına imkân olmaması nedeniyle maliyeti yüksektir. Dişli fittingslere göre basınca daha fazla dayanabilen paslanmaz kaynaklı fittingsler, pratiklik bakımından paslanmaz dişli fittingslere nazaran daha geri durumdadır. Başlıca paslanmaz özellikteki fittingsleri ise aşağıda görüldüğü şekilde sıralayabilmek mümkündür:

Paslanmaz çekvalf - Paslanmaz nipel - Paslanmaz yaka - Paslanmaz dişli dirsek - Paslanmaz flanş - Paslanmaz dişli rekor - Paslanmaz kelepçe - Paslanmaz iç dişli kör tapa - Paslanmaz kep.

Şekil 13'de ferrokromlu bazı yapı elemanları görülmektedir.



Şekil 13: Ferrokrom kullanılarak yapılan bazı yapı elemanları

5. SONUÇLAR

Ülke ekonomisinde ve kalkınmasında madencilik sektörü, oldukça büyük bir önem taşımaktadır. Bilhassa gelişme yolunda olan ulusal sanayinin ve tarım sektörünün, temel girdilerinin sağlanması bakımından madencilik sektörünün geliştirilmesi, dışa bağımlılığın azaltılması gerekmektedir.

Ülkemizdeki kromit oluşumlarına bakıldığında, alpin tipindeki oluşumlar halinde genellikle ufak boyutlu, şekillerinin düzensiz (merceksi tipte), Cr/Fe oranının ise, 3/1-2/1 arasında, metalürjik özelliğinin yüksek cevherlerden olduğu görülmektedir. Dünya'daki kromit rezervlerinin oransal olarak %0.2'si ülkemizde bulunmaktadır. Ancak tespit edilmiş olan rezerv miktarından ziyade, üretilen cevherin özellikleri ve krom metalinin en kaliteli olarak elde edildiği kromit cevherinin üreticisi olması bakımından ülkemiz, Dünyada önde gelen bir konumdadır.

Türkiye'nin üretimini yaptığı kromit cevherleri, dünya kromit ticaretinde aynı tenöre sahip diğer krom cevherlerine nazaran daha yüksek fiyatlarla alıcı bulmaktadır. Bu durumun en belli başlı nedeni ise, yurdumuzda üretilen krom cevherinin metalürjik özelliklerinin daha uygun olmasıdır.

Ferrokrom üretimi yapmak için yararlanılan bu cevherler, gerek ticari yönden, gerekse de ark fırınları işletmeciliğine uygunluğu açısından, diğer cevherlere nazaran önemli ve üstün özellikler taşımaktadır.

Maden işletmelerinden çıkartılan krom cevherinin ferrokrom tesislerinde işlenmesiyle elde edilen yüksek karbonlu ferrokrom metali, birçok sektörde önemli bir hammadde girdisi olarak değerlendirilmektedir.

Krom metali çoğunlukla kimya, metalürji, ateşe dayanıklı çeşitli malzemelerin üretimi (refrakter sanayisi) ve döküm sanayisinde olmak üzere, otomotiv ve yapı sektöründe de geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Dünya geneline bakıldığında, üretilen kromun yaklaşık %95'inin ferrokrom üretiminde kullanılmakta olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, kroma dayalı kimyasallar, paslanmaya karşı engelleyici özelliklerinden ötürü gemi ile uçak sanayisinde de yaygın bir şekilde; kimya sanayisinde, kromik asit, sodyum bikromat ve boya hammaddesi olarak; metal kaplamada, deri tabaklamada, boya malzemelerinde (pigmentler), seramiklerde, parlatici gereçlerde, katalizörlerde, boyalarda, su arıtma sistemlerinde, konserve kutulamada, ayrıca estetik görünümü nedeniyle nakil araçlarında, aydınlatmaya dayalı sistemlerde, merdivenlerin ve balkonların korkuluklarında, suyla temas halinde bulunan yüzeylerde paslanmayı ve korozyonu önlemek amacıyla da kullanılmaktadır.

Ayrıyeten krom kullanılan üstün vasıflı alaşımlar ise, ısıya dayanımlı, verimi yüksek türbin motorlarının imalatında da kullanılmaktadır. Öte yandan bu sanayilerin birçok alanında kromitin yerini alabilecek başka bir cevher bulunmamaktadır. Dünya'da, zengin kromit yataklarına sahip ülkelerde kromit yatakları açısından zengin olan ülkelerde krom cevheri üretimine paralel bir şekilde ferrokrom üretiminin yapıldığı görülmektedir. Krom

metalinin büyük oranlarda kullanıldığı ferrokrom yapımıyla bağlantılı olarak kimya, metalürji, döküm ve refrakter sanayisi ile dolaylı olarak ilişkili olan krom cevheri üretilen madenler, kromu işleme tesisleri ile birlikte, krom madeni işkolunun gelişmesine, bunun yanı sıra, yapı sektörü, lojistik sektörü ve işgücü piyasasına da önemli katkılar sağlamaktadır.

Krom cevherinden yararlanarak ferrokrom üretimi aşamasında, yüksek miktarlarda enerjiye ve büyük ark ocaklarının yapımına gereksinim duyulmaktadır. Bir ton ferrokrom üretimi için 4300 kWh enerjiye gereksinim duyulmaktadır. Ülkemizde yapılan ferrokrom istihsalinde enerji fiyatlarının yüksekliği, maliyet artışını getirdiğinden dolayı, bu durum önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Ülkemizdeki ferrokrom üretimi, enerji fiyatlarının bu yüksekliği nedeniyle diğer üretici ülkelere nazaran maliyet artışı getirmiş olmakla beraber, üretilen ferrokrom metalinin yüksek kalitede olup en az %65 Cr'lu olması ve bu değer nedeniyle de Dünya piyasalarında yüksek fiyattan satılabilmesi üstünlük sağlayan bir durum olarak görülmektedir.

Buna göre, madencilik kesiminin ekonomiye doğrudan doğruya yaptığı katkının yanı sıra, sanayinin diğer alanlarına, bilhassa üretim yapılan sektöre sağladığı girdilerle önemli bir rol oynaması, iş kolları arasında en yüksek katma değer ve iş alanı sağlama potansiyeline sahip olması, madencilik ile ilgili çalışma alanlarının daha çok kırsal alanlara yakın bölgelerde gerçekleştirilmesi nedeniyle, kentlere olan göçün engellenmesi ve bölgesel olarak kalkınmaya da katkı sağlamasından ötürü, sosyal ve ekonomik kalkınma politikalarının saptanmasında madencilik işkolunun önemi artmaktadır. Kendi yeraltı zenginliklerini işleyip, sanayisini kuramayan bir ülkenin dışa bağımlılıktan kurtulması olanaksızdır. Bu nedenle ülkemizde ferrokrom tesislerinin kurulması ve üretim yapması büyük bir önem arz etmektedir. Küresel eğilime bakıldığında, uluslararası krom ticaretinde krom cevherlerinin ticaretinin daraltıldığı, ileri krom ürünlerinin ticaretinin ise genişletildiği görülmektedir. Krom cevheri üreten ülkeler, günümüzde ileri üreterek gelişmiş ülkelere bunları ihraç etmektedir. Temel olarak sanayi girdilerinden biri enerji tüketimi ise, çelik sanayisinin temel girdilerinden biri de ferrokromdur.

Sanayileşme alanında büyük çabalar sarfeden ülkemizin, yurtdışına ham krom cevheri ihraç etmeyip, bunun yerine, getirisi daha fazla olan ferrokromu üretip, yurtdışına pazarlaması; öte yandan, paslanmaz çelik ve buna bağlı olarak diğer sanayileri de geliştirmek suretiyle, bu değerli metali ve yan ürünlerini ülkemiz içinde katma değeri yüksek ürünler haline getirmesi önem arz etmektedir. Kromun özellikle yapı sektöründeki kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Ülkemizde ki duruma bakıldığında, yapılan kromit cevheri satışı nedeniyle, 700-800 bin tona yakın bir ferrokrom üretimi yapılamamaktadır. Bunun yanı sıra yurtiçinde krom cevherinin, krom bileşikleri ve ferrokrom elde edilen tesislerin yıl içinde tükettiği miktarlar, refrakter üretimine bağlı sanayilerde yılda 15000 ton, döküm sanayisine bağlı

fabrikalarda ise yılda 1000 ton civarındadır. Dünyadaki krom cevheri ve ferrokrom üretmekte olan ülkelerin ithalat ve ihracat verilerine bakıldığında, krom cevheri üretimi yapan ülkelerin çoğunun üretmiş oldukları cevheri ferrokroma dönüştürmek suretiyle ihraç ettikleri görülmektedir. Ülkemizin de bu yolu izleyerek, ham kromit cevherini ihraç etmek yerine, yüksek katma değerli ferrokrom üretimini yapıp, bunu ihraç etmesi durumunda ülkemize olan döviz girdisinin 3-4 misli daha fazla olması sağlanacaktır. Böyle bir durumda da ferrokrom üretiminin önemli bir girdisi olan enerjiyi, diğer ferrokrom üreticisi ülkelerin enerji maliyetleri düzeyine indirmek suretiyle bu sanayi kolundaki gücünü artırması gerekmektedir.

Ferrokrom üretiminde, 1 ton ürün elde edilmesi sonucunda, ortaya 1.5 ton kadar cüruf çıkmaktadır. Çevreye zararı olmayan cürufun, muhtelif yöntemlerin uygulanması suretiyle değerlendirilmesi mümkün olabilmektedir. Bilhassa yapı sektörüne ait beton agregası tesisleri ve yer parkesi üretimi yapan tesislerde, atık cüruftan yararlanılabilmektedir. Öte yandan metal dökümü yapılması sonrasında pota içerisinde kalmış bulunan ve cüruf-metal bileşimi şeklinde olup birbiriyle yapışık vaziyette bulunan malzemenin içindeki metalin geri kazanılması gayesiyle, metal geri kazanım tesisinin kurulmasıyla da, atıkların çevreye olan etkilerinin en aza indirilmesi sağlanmış olacaktır.

KAYNAKÇA

- Atak, S. (1974). *Cevher hazırlama* [ders notları]. Maden Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- British Geological Survey. (2023). World Mineral Production 2017-2021. <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html>
- Çınar, S. (2018, 5 Aralık). Ferrokrom nasıl üretilir? Nerelerde kullanılır?. <http://www.muhendisalemi.com/ferrokrom-nasil-uretilir-nerelerde-kullanilir/> adresinden 10 Ağustos 2023 tarihinde alınmıştır.
- Freeman, D. E., Aral, H. ve Smith, L. K. (2003). *The potential for the recovery of chromite sands from the Murray Basin, Australia*. Heavy Minerals 2003, Johannesburg, Güney Afrika Cumhuriyeti.
- Gümüş, A. (1979). *Metalik Maden Yatakları*. Çağlayan Basımevi.
- JLab Science Education. (2023). The element chromium. <https://education.jlab.org/itselemental/ele024.html> adresinden 10 Ağustos 2023 tarihinde alınmıştır.
- Kastamonu Madencilik. (2019, 20 Aralık). Türkiye ve dünyada krom. <https://www.kastamonumaden.com.tr/haberdetay/turkiye-ve-dunyada-krom.html> adresinden 20 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2022). Dünya’da ve Türkiye’de krom. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/krom_1.pdf
- Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü. (2021). 2021 yılı ocak başı satış fiyatları. <https://www.mapeg.gov.tr>
- Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü. (2023). Maden istatistikleri. <https://www.mapeg.gov.tr/Custom/Madenistatistik>.
- Marmotek Madencilik. (2023). Kromun tarihçesi. <http://marmotek.com.tr/kromun-tarihcesi/> adresinden 20 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Temur, S. (2001). *Metalik Maden Yatakları*. Nobel Yayın Dağıtım.
- Trendeconomy. (2023, 14 Mayıs). Chromium ores and concentrates, imports and exports,2021. https://trendeconomy.com/data/commodity_h2/2610 adresinden 20 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2023). Dış ticaret istatistikleri. <https://www.tuik.gov.tr/>
- Ümit Paslanmaz. (2023). Paslanmaz çelik ürünleri nelerdir?. <https://www.umitpaslanmaz.com/paslanmaz-celik-urunleri-nelerdir/> adresinden 20 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Yağmurlu, F., Taglıasacchi, E. ve Şentürk, M. (2017). Ofiyolitik kayaçların ağır mineral plaserlerinin oluşumundaki önemi: Burdur-Çamköy örneği, GB-Türkiye. *Yerbilimleri*, 38(3), 259-274,
- Yıldız, N. (2014). *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme*. Ertem Basım.

BÖLÜM 4

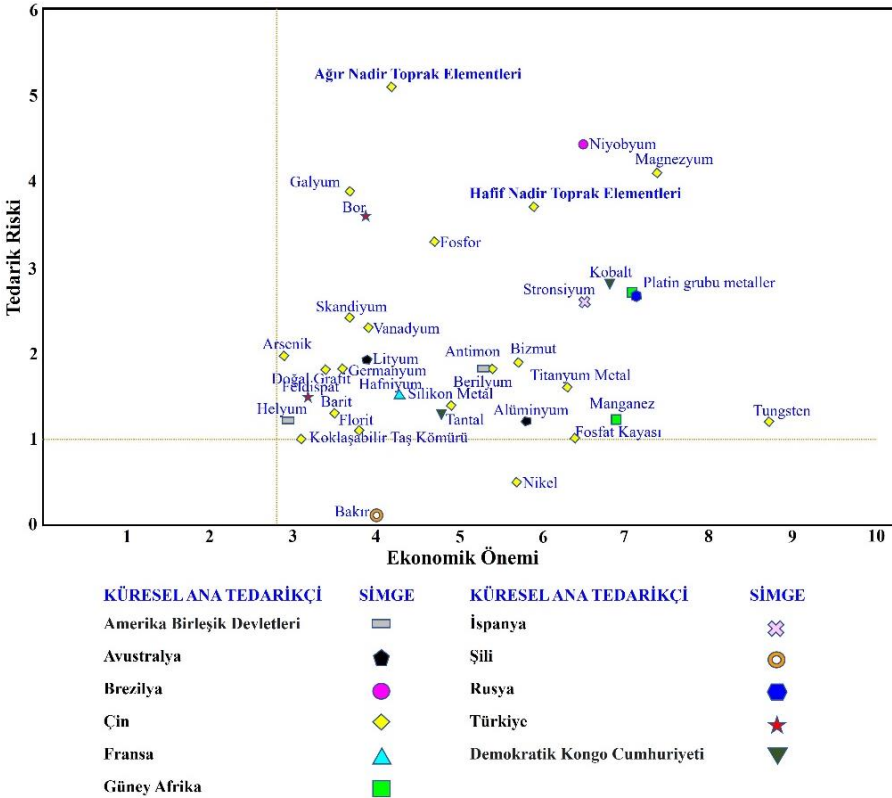
NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ

Öğr. Gör Dr. Ebru BAŞPINAR TUNCAY¹

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği bölümü, Isparta, Türkiye. ebrubaspinar@sdu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-9416-9576

GİRİŞ

Son yıllarda temiz enerji, ulaşım, savunma, sağlık, elektronik gibi kilit sektörlerdeki teknolojilerin hızla gelişmesi ve bu sektör ekosistemlerinin sürdürülebilirliği için hammadde gereksinimi ülkelerin nüfus artışına bağlı olarak artmaktadır. Üretimde ihtiyaç duyulan hammaddeler ekonomik ve stratejik açılardan önemli olmakla beraber ithalat bağımlılığı yaratması, tedarik riski ve alternatif hammadde bulunmaması sebebiyle kritik öneme sahiptir. Bazı elementler, teknoloji ve sektörlerin sürdürülebilirliği için kritik hammaddelerin başında gelir ve madenler bu elementlerin ana kaynaklardır. Avrupa Komisyonu-Kritik Hammaddeleri Belirleme Grubu tarafından kritik hammaddeleri ve rezervlerini belirlemek, planlama yapmak ve geleceğe dair stratejiler oluşturmak amacıyla ilk defa 2010 yılında yayınlanmaya başlamıştır. 2023 yılında yayınlanmış olan kritik minerallerin tedarik riski, ekonomik önemi ve küresel ana tedarikçisini gösteren grafik Şekil 1’de verilmiştir. Şekil 1’de görüldüğü gibi nadir toprak elementleri (hafif ve ağır) kritik hammaddelerdendir.



Şekil 1: Kritik minerallerin tedarik riski, ekonomik önemi ve küresel ana tedarikçileri (European Commission, 2023)

Nadir toprak elementleri (NTE), 'nadir toprak metalleri (NTM)', 'nadir topraklar (NT)', 'nadir toprak oksitleri (NTO)' ve toplam nadir toprak oksitleri (TNTO) olarak bilinen elementlere Lantanit grubu elementler de denilmektedir. Aslında “nadir toprak” terimi lantanitler için kullanılan alternatif bir isim olmasına rağmen gerçekten lantanitler grubunu temsil eden bir isim değildir. Ayrıca jeokimyacılar arasında eski bir deyiş vardır: Simyacılar, bilmedikleri pek çok maddeye “toprak” demiş olsalar da, eski jeokimyacılar nadir toprak elementlerinin ne “nadir” ne de “toprak” olmadıklarını dile getirmişlerdir (Yüce, 2006; Hurst, 2010; Long, ve ark., 2010; Atwood, 2012; Golloch, 2022).

İlk keşfedilen nadir toprak elementi, Carl Axel Arrhenius tarafından 1787 yılında İsveç'in başkenti Stokholm yakınlarındaki Ytterby köyünde bir taş ocağında keşfedilmiştir. Bulunduğu yerden dolayı bu siyah mineral itterbiyum adını almıştır. 1760-1852 yılları arasında bu mineral İsveçli kimyacı Johan Gadolin tarafından araştırılmıştır. 1794 yılında Gadolin mineralin yeni bir bileşik içerdiğini ittria olarak adlandırılmış olup bu bileşikten itriyum elementi elde edilmiştir (Tablo 1) (Beatty, 2008).

Tablo 1: Nadir Toprak elementlerin keşfedilme tarihçesi ve keşfeden bilim adamı (Beatty, 2008, Voncken, 2016)

Tarih	Element	Bilim Adamı
1803	Seryum	Jöns Jakob Berzelius
1839	Lantan	Carl Gustav Mosander
1843	Erbiyum	Carl Gustav Mosander
1905		George Urbain (Saf Halde)
1843	Terbiyum	Carl Gustav Mosander
1878	Holmiyum	Marc Delafontaine
1878	İtterbiyum	Jean Charles Galissard de Marignac
1879	Samaryum	Paul Emile Lecoq de Boisboudran
1879	Tulyum	Per Theodor Cleve
1794	İtriyum	Johan Gadolin
1839		Carl Gustav Mosander (Saf Halde)
1879	Skandiyum	Lars Fredrik Nilson
1880	Gadolinyum	Jean Charles Galissard de Marignac
1885	Prasedmiyum	Carl Auer, Baron von Welsbach
1885	Neodimyum	Carl Auer, Baron von Welsbach
1886	Disprosiyum	Paul Emile Lecoq de Boisboudran
1901	Evropiyum	Eugene Anatole Demarcay
1907	Lütesyum	Carl Auer, Baron von Welsbach
1938	Prometyum	Charles DuBois Coryell

İtriyum minerali gerçek bir lantanit olmamasına rağmen, İtria'nın küçük bir miktarında birkaç lantanit elementi içerdiği daha sonra kanıtlanmıştır. İlk keşfedilen lantanit Seryum mineralidir. 19. yüzyıl boyunca İtrium, İtterbiyum, Erbiyum, terbiyum keşfedilmiştir. Spektroskopinin kullanılmasıyla diğer lantalinit elementlerinin keşfi de hızlanmıştır.

Prometyum elementi enson keşfedilen lantanit elementidir (Tablo 1) (Beatty, 2008).

Mendeleyev'in periyodik tablosunda benzer kimyasal özellikler gösteren ve atom numaraları 57'den (Lantan-La) 71'e (Lütesyum-Lu) kadar olan 15 element (Lantan (La), Seryum (Ce), Prasedmiyum (Pr), Neodimyum (Nd), Prometyum (Pm), Samaryum (Sm), Evropiyum (Eu), Gadolinyum (Gd), Terbiyum (Tb), Disprosyum (Dy), Holmiyum (Ho), Erbiyum (Er), Tulyum (Tm), İtربيyum (Yb), Lütesyum (Lu) ve birçok cevher yatağında bu elementlerle beraber bulunan, bu elementler ile benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip itriyum (Y) (atom sayısı 39 ve iyonik yarıçapı, holmiyum (Ho) ile hemen hemen aynı) ile skandiyum (Sc) (atom numarası 21) elementleri NTE olarak sınıflandırılır (Şekil 2).

Periyodik Tablo ve Nadir Toprak Elementleri

1																	18
1 H 1.0079																	2 He 4.0026
3 Li 6.941	4 Be 9.01218											5 B 10.811	6 C 12.0107	7 N 14.0067	8 O 15.9994	9 F 18.9984	10 Ne 20.1797
11 Na 22.9898	12 Mg 24.3050											13 Al 26.9815	14 Si 28.0855	15 P 30.9738	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.0983	20 Ca 40.078	21 Sc 44.9559	22 Ti 47.867	23 V 50.9415	24 Cr 51.9961	25 Mn 54.9280	26 Fe 55.845	27 Co 58.9332	28 Ni 58.6934	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.9216	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 88.798
37 Rb 85.4678	38 Sr 87.62	39 Y 88.9059	40 Zr 91.224	41 Nb 92.9064	42 Mo 95.96	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.760	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.293
55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	57 La 138.905	58 Ce 140.116	59 Pr 140.908	60 Nd 144.242	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.500	67 Ho 164.930	68 Er 167.259	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04	71 Lu 174.966	
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)	104 Rf (267)	105 Db (268)	106 Sg (271)	107 Bh (272)	108 Hs (270)	109 Mt (276)	110 Ds (281)	111 Rg (280)	112 Cn (285)	113 Nh (284)	114 Fl (289)	115 Mc (288)	116 Lv (293)	117 Ts (294)	118 Og (294)

★ **Nadir Toprak Elementleri**

57 La 138.905	58 Ce 140.116	59 Pr 140.908	60 Nd 144.242	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.500	67 Ho 164.930	68 Er 167.259	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04	71 Lu 174.966
---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	-------------------	--------------------	---------------------	--------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	--------------------	---------------------

★ Hafif Nadir Toprak Elementleri ★ Ağır Nadir Toprak Elementleri

Parantez içindeki değerler en kararlı izotopun kütle numarasıdır.

Şekil 2: Nadir toprak elementlerinin periyodik cetveldeki yeri

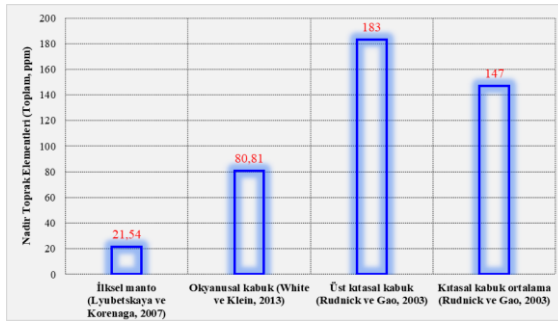
Nadir toprak elementleri, atom kütlelerinin ve ekstraksiyon modunun değişimine göre genellikle iki gruba ayrılır. Lantantandan Evropyuma kadar (atom numaraları 57 ile 63) hafif nadir toprak elementleri (Seryum grubu) olarak adlandırılır. Gadolinyumdan lütesyuma kadar (atom numaraları 64 ile 71) ağır nadir toprak elementleri (Yitriyum grubu) olarak adlandırılır. İtربيyum en hafif REE olmasına rağmen, ağır nadir toprak elementleri ile kimyasal ve fiziksel olarak benzer olduğu için ağır nadir toprak elementlerinde yer alır (Samson ve Wood, 2005; Walter ve ark., 2010; Castor ve Hendrik, 2006; Balaram, 2019) (Şekil 2).

1. NADİR TOPRAK ELEMENTLERİN OLUŞUMU VE ÜRETİMİ

Nadir toprak elementleri, ilksel mantoda daha az miktarlarda bulunurken kabuğun katmanlarında Tablo 2’de görüldüğü gibi bol miktarda bulunmaktadır. Özellikle üst kıtasal kabukta hafif nadir toprak element miktarları ilksel manto ve okyanusal kabuk ile kıyaslandığında oldukça fazla miktarlardadır. Nadir toprak elementlerinin toplam miktarı ilksel mantoda 21,54 ppm iken okyanusal kabukta 80,81 ppm’dir. Üst kıtasal kabukta ise okyanusal kabukta bulunan toplam miktarın iki katından fazladır (183 ppm) (Şekil 3). Ayrıca hafif NTE’lerinin kabuksal bolluğu bakırla karşılaştırıldığında hemen hemen aynıdır ve elde edilişi zor olan ağır NTE, değerli metallere göre konsantrasyonu oldukça fazladır (Wall, 2021).

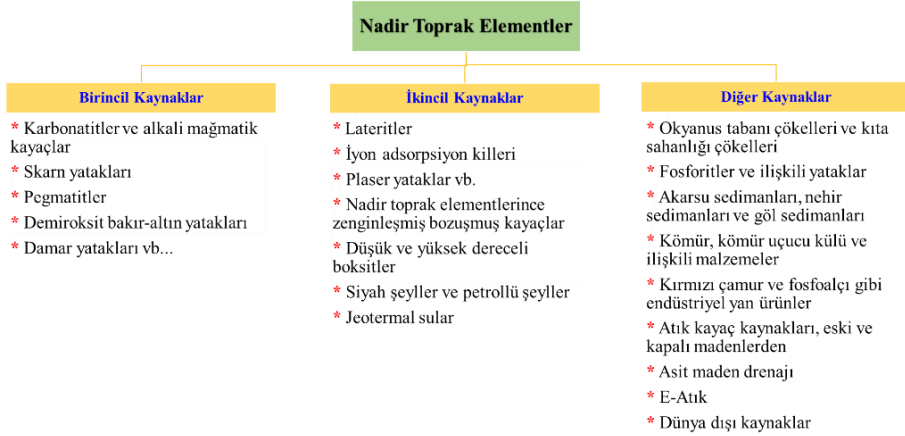
Tablo 2: İlksel manto, okyanusal ve üst kıtasal kıtasal kabuktaki (ortalama) nadir toprak elementlerinin miktarı (ppm)

Nadir Toprak Elementleri	İlksel Manto (ppm)	Okyanusul Kabuk (ppm)	Üst Kıtasal Kabuk (ppm)	Kıtasal Kabuk (Ortalama) (ppm)
	(Lyubetskaya ve Korenaga, 2007)	(White ve Klein, 2013)	(Rudnick ve Gao, 2003)	
La	0.508	2.13	31	20
Ce	1.340	5.81	63	43
Pr	0.203	0.94	7.1	4.9
Nd	0.994	4.90	27	20
Sm	0.324	1.70	4.7	3.9
Eu	0.123	0.62	1.0	1.1
Gd	0.432	2.25	4.0	3.7
Tb	0.080	0.43	0.7	0.6
Dy	0.540	2.84	3.9	3.6
Ho	0.121	0.63	0.83	0.77
Er	0.346	1.85	2.3	2.1
Tm	0.054	0.28	0.30	0.28
Yb	0.346	1.85	2.0	1.9
Lu	0.054	0.28	0.31	0.30
Y	3.37	18.1	21	19
Sc	12.7	36.2	14	21.9



Şekil 3: İlksel manto, okyanusal ve üst kıtasal kıtasal kabuktaki (ortalama) nadir toprak elementlerinin toplam miktarı (ppm)

Kabuk ve yer kabuğunda bol miktarda bulunan NTE'lerin elde edildiği kaynakları Balaram (2022) çalışmasında birincil, ikincil ve gelecekte potansiyel olabilecek diğer kaynakları ayrıntılı olarak belirtmiştir (Şekil 4).



Şekil 4: Birincil, ikincil ve gelecekte potansiyel NTE kaynağı olabilecek diğer kaynaklar (Balaram, 2022)

Günümüzde ekonomik NTE kaynakları öncelikle birincil ve ikincil kaynaklardan elde edilmektedir. Birincil kaynaklar; mağmatik, hidrotermal ve/veya metamorfik süreçlerle oluşan yataklar olup, genellikle çeşitli nadir metallere, endüstriyel mineral ve kayalara ev sahipliği yapan alkali mağmatik kayalar ve karbonatitlerle ilişkilidir. İkincil kaynaklar ise iklim, rölyef ve ayrışmanın rol oynadığı, ayrışma, taşınma ve çökme süreçleri ile oluşan dış kökenli yataklardan; plaserler (ağır metal içeren ve monazit-ksenotim içeren), lateritler ve boksitler olarak bilinen kalıntı yataklardır. Bunların dışında son zamanlarda yapılan bilimsel çalışmalarda kömürler, kıta sahanlığı ve okyanus tabanı çökeltilerinin içerdikleri NTE konsantrasyonları dikkat çekicidir. Ayrıca; küresel olarak bilinen 500'den fazla karbonatit olmasına rağmen, bunlardan yalnızca altı tanesi NTE için işletilmektedir ki; bu durum nadir toprak elementlerin ekonomik konsantrasyonlarının ender olduğunu gösterir (Van Gosen ve ark., 2014; Dostal, 2017; Dushyantha ve ark., 2020; Balaram, 2023a).

NTE'ler, jeolojik süreçler sonucunda oluşan oksitler, silikatlar, karbonatlar, fosfatlar ve halojenürler de dahil olmak üzere 250'den fazla mineralin hatta amfiboller ve biyotit gibi mafik kayaç oluşturan minerallerin bile kimyasal formülünde ve kristal yapısında yer almasına rağmen endüstriyel kullanım için NTE'nin çıkarıldığı ilk cevher minerali monazittir. Monazit [fosfat, $(La,Th)PO_4$], mineralinin dışında apatit [fosfat, $(Ca,La)_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$], ksenotim [fosfat, YPO_4], allanit [silikat, $(Y,La,Ca)_2(Al,Fe^{3+})_3(SiO_4)_3(OH)$] ve bastnazit [fluorokarbonat,

(La,Y)(CO₃)F] gibi minerallerden elde edilmektedir (Jordens ve ark. 2013; Charalampides ve ark., 2015; Voncken, 2016; Dostal, 2017; Balaram, 2022).

Diğer NTE içeren birincil mineraller ise, loparit [oksit, (La,Na,Ca)(Ti,Nb)O₃], kolumbit [oksit, (Fe, Mn)Nb₂O₆], eudialyte [silikat, Na₄(Ca,La)₂(Fe²⁺,Mn²⁺,Y)ZrSi₈O₂₂(OH,Cl)₂], zirkon [silikat, (Zr,La)SiO₄], gittinsit [silikat, CaZrSi₂O₇], limoriit [karbonatlı, Y₂(SiO₄)(CO₃)], parisit [karbonatlı, Ca(La)₂(CO₃)₃F₂], fergusonit [oksit, (La,Y)NbO₄], mosandrit [silikat, (Na,Ca)₃Ca₃La(Ti,Nb,Zr)(Si₂O₇)₂(O,OH,F)₄], piroklor [oksit, (Ca,Na,La)₂Nb₂O₆(OH,F)], kainosit [karbonatlı, Ca₂(Y,La)₂Si₄O₁₂(CO₃).H₂O], rinkit [(silikat, Ca,La)₄Na(Na,Ca)₂Ti(Si₂O₇)₂(O,F)₂], sinşisit [karbonatlı, Ca(La)(CO₃)₂F], titanit (silikat, Ca(Ti,NTE)SiO₅) steenstrupin [silikat, Na₁₄La₆Mn₂Fe₂(Zr,Th)(Si₆O₁₈)₂(PO₄)₇·3H₂O], gadolinit [silikat, (Ce,La,Nd,Y)₂Fe²⁺Be₂Si₂O₁₀], (Krishnamurthy ve Gupta, 2015; Dostal, 2017).

Kısaca, hafif NTE'ler karbonatlar ve fosfatlarda yoğunlaşırken, ağır NTE'ler oksitlerde ve fosfatların bir kısmında yoğunlaşır. İyon adsorpsiyon kil yatakları küresel ağır nadir toprak elementleri üretiminin çoğunu sağlamaktadır (Chakhmouradian ve Wall 2012; Kanazawa ve Kamitani, 2006).

a. Birincil Kaynaklar

Monazit: Genellikle kırmızımsı-sarımsı kahverengi, kahverengi olan monazit (Ce,Nd,Y,Dy,Sm,Nd,Th)(PO₄) nadir toprak element içeren fosfattır. Seryum ile hafif nadir toprak elementleri olarak bilinen, La, Pr, Nd ve Sm'da içermektedir ve bunlardan en çok içerdiği eser elemente göre monazit-Ce, monazit-La, monazit-Nd, monazit-Pr, monazite-Sm isimlerini alır. Monazit sahil kumlarında yaygın olarak bulunurken granitlerde, granodiyoritlerde ve bunlarla ilişkili pegmatitlerde ve metamorfik kayaçlarda aksesuar mineral olarak bulunur. Ayrıca alterasyon koşullarına dayanıklı olmasından dolayı ilmenit, manyetit, rutil ve zirkon gibi ağır minerallerle ilişkilendirilir (Voncken, 2016; Wall, 2021; Long ve ark., 2012).

Apatit: NTE'ye ev sahipliği yaptığı bilinen doğada farklı renklerde bulunan apatit minerali (Ca,La)₅(PO₄)₃(F,Cl,OH), hidroksiapatit, florapatit, klorapatit, karbonat hidroksiapatit, florkarbonatapatit) tüm mağmatik kayaçlarda tali olarak bulunur ve piroksen ile eş zamanla kristalleşir. NTE için gelecekte olası kaynak olan apatit aynı zamanda daha uygun maliyetli bir madencilik yapma imkânı da sunar. Granit ve diyorit arasında değişen kalkalkali kayaç gruplarında ağırlıkça %1-2 oranında bulunur. Karbonatit ve laprofillerde bol miktarda bulunan mineral metamorfik koşullara oldukça dayanıklıdır. Gnays ve migmatitlerdeki yüksek apatit içeriği sedimanter kökene işaret eder. Sedimanter kayaçlarda bol bulunan bir ağır mineral türüdür. Kullanılabilir apatit yatakları çoğunlukla sedimanter ve mağmatik kayalarda bulunur. Mağmatik kayaçlar, çoğunlukla karbonatitler ve diğer alkalın kayaç türleri florapatit cevherlerini içerir, bununla birlikte mağmatik

cevherler, genellikle düşük tenörlüdür ancak daha yüksek kalitede zenginleştirme sağlar (Deer ve ark., 1985; Hughes ve ark., 1991; Ihlen 2014; Chakhmouradian ve Wall, 2012; Erkan, 2011).

Ksenotim: Fosfat cevheri olan ksenotim (YPO_4) monazite benzer nadir topraklar elementlerinin değerli maden yataklarından biridir. Muskovit-granit, granit-aplit, granit-pegmatit gibi açık renkli mağmatik kayalarda gözlenir. Gnayslarda tali olarak bulunurken sedimanter kayalarda ağır mineral türü olarak gözlenir (Zhang ve ark., 2015, Erkan, 2011).

Allanit: Allanit $(Y,La,Ca)_2(Al,Fe^{3+})_3(SiO_4)_3(OH)$ epidot grubu minerallerdendir. Granit, granodiyorit, monzonit, siyenit ve granitik pegmatit diyorit ve gabroda bulunduğu gibi nadiren şistler, gnayslar ve bazı kontakt metamorfize kireçtaşlarında da bulunur. Özellikle bazı granit pegmatitlerde, alkali granit ortamlarında ve skarnlarda allanit, ekonomik potansiyele sahip olabilir. Monazit ile kıta kabuğundaki hafif NTE'lerinin ana taşıyıcısı ve dolayısıyla deposudur az miktarda Th ve U içerir (<https://rruff.info/doclib/hom/allanitece.pdf>; Bea, 1996; Kosterin ve ark., 1961; Broska 2000; Gieré ve Sorensen, 2004).

Bastnasit: Kontakt metamorfik kayalar, pegmatitler, florit içeren damarlar ve breş dolgulu karbonat-silikat kayalarda bulunan bastnasit, hafif NTE'lerin birincil kaynağıdır. U veya Th içermezken, Ce, La, Pr ve Nd oksitler bu mineraldeki nadir toprak element oksitlerinin toplam %97'sinden fazlasını temsil eder. (Jordens ve ark., 2013; Voncken, 2016; Gupta ve Krishnamurthy, 2005).

Karbonatitler: Archean'dan bu yana genellikle, rift sistemleri veya grabenler, büyük faylar, orojenik aktiviteler ve kratonik alanlar gibi jeolojik ortamlarla ilişkili olan kalsit ve dolomit olmak üzere hacimce %50'den fazla birincil karbonat mineralleri içeren karbonatitler, karbonat açısından zengin mağmalardan türemiş farklı mağmatik kayalardır ve bunların hidrotermal ve ayrılmış türevleri, 1960 yılından günümüze kadar La, Ce, Pr ve Nd dahil olmak üzere hafif NTE'lerin ana kaynaklarıdır (Tablo 3). Bu elementlerin dışında P, Nb, U, Th, Cu, Fe, Ti, Ba, F, Zr gibi elementler bakımından yüksek konsantrasyonlar içerebilmektedir. Karbonatitlerdeki en yaygın (ve önemli) REE içeren mineraller bastnasit ve monaziti içerir; ksenotim ise bu tür kayalarda nadirdir. Ayrıca, tüm ana mineral sınıflarından (sülfidler, oksitler, silikatlar, karbonatlar, fosfatlar vb.) mineral türlerini içerir. Karbonatitlerin mineralojik bileşiminin vurgulanması, "karbonatit" in başına bir, iki veya daha fazla mineral adı eklenerek yapılırken (kalsit karbonatit, dolomit karbonatit veya "apatit-kalsit karbonatit gibi), karbonatitlerin kimyasal bileşiminin vurgulanması [CaO, MgO veya $(FeO + Fe_2O_3 + MnO)$ %'sine bakılarak] 'kalsiyon-karbonatit', 'magnezyum-karbonatit' veya 'ferro-karbonatitler' şeklinde yapılmaktadır. Diğer mağmatik kayalar ile karşılaştırıldığında en yüksek NTE konsantrasyonlarını içerir. Karbonatit mağmalarının nasıl oluştuğuna dair tartışmalar olmasına rağmen, ana mağma ve NTE'lerin manto kaynaklarından

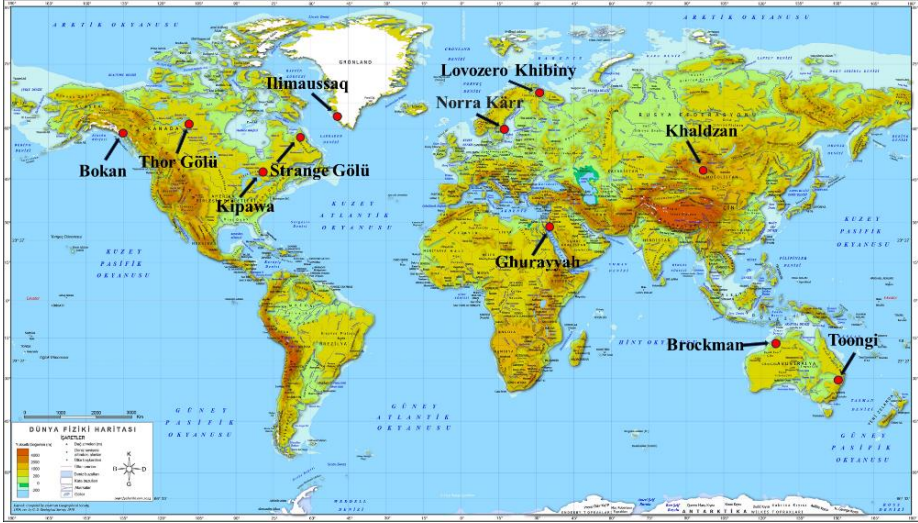
türetildiği açıktır (Modreski ve ark., 1996; Rukhlov ve Bell, 2010; Siegfried ve Hall, 2012; Van Gosen ve ark., 2014; Chakhmouradian ve Wall, 2012; Verplanck ve ark., 2016; Woolley ve Kempe, 1989; Kamenetsky ve ark., 2021).

Tablo 3: Nadir toprak elementlerince zengin kayalar ve NTE miktarları (ppm)

Nadir Toprak Elementleri	Kimberlit Hindistan (Kumar ve ark., 2012)	Alkalin Bazalt, Güney Kenya (Späth ve ark., 2001)	Nefelin Siyenit, Rusya (Arzamastsev, 2001)	Kuvars-siyenit Hindistan (Sridhar ve ark., 2018)	Kalsit Karbonatit	Dolomit Karbonatit
					Winter, 2010	
La (ppm)	151.8	70	52.1	449.5	608	746
Ce (ppm)	235.0	141	88.7	798	1687	2183
Pr (ppm)	27.2	16	8.4	75.5	218	560
Nd (ppm)	91.5	63	27.3	43.5	883	634
Sm (ppm)	13.9	12	3.99	265.5	130	45
Eu (ppm)	3.4	3.6	0.78	39	39	12
Gd (ppm)	11.0	9.7	2.84	1.9	105	-
Tb (ppm)	1.3	1.3	0.39	26	9	5
Dy (ppm)	5.0	6.9	2.16	2.91	34	-
Ho (ppm)	0.8	-	0.44	12.5	6	-
Er (ppm)	2.2	2.7	1.26	2.35	4	-
Tm (ppm)	0.3	-	0.19	5.95	1	-
Yb (ppm)	1.9	1.7	1.22	0.85	5	10
Lu (ppm)	0.4	-	0.18	0.8	1	0
Y (ppm)	22.6	34	12.5	-	119	61
Sc (ppm)	-	26	10.7	-	7	14
Toplam	568.2	387.9	213.2	1724.3	3856.0	4270.0

Alkali/Peralkalin mağmatik kayalar: Riftleşme ve/veya genişleme tektoniği ile ilişkili oldukları kıtasal anorojenik veya levha içi tektonik ortamlarda oluşan, feldspatoidler (lösit, nefelin, sodalit, lazurit gibi), alkali piroksenler (ejirin ve jadeit) veya alkali amfiboller (glokofan vb.) gibi sodyum (Na) ve/veya potasyum (K) bakımından zengin mineraller içeren ve alüminyumdan (Al) daha yüksek konsantrasyonlara sahip alkali mağmatik kayalar ekonomik açıdan önemli NTE mineralizasyonunu içerdikleri gibi NTE'lere, yüksek uranyum (U) ve toryum (Th) derişimleri eşlik etmektedir (Dostal, 2017 ve Wall, 2021) . Ayrıca bu kayalarda NTE'ler esas olarak monazit-(Ce), ksenotim-(Y), fergusonit-(Y), loparit-(Ce) ve ödialit grubu minerallerinde bulunur. (Larsen ve Sørensen 1987; Chakhmouradian ve Wall, 2012). Karbonatitler, peralkalin feldspatoid kayalar ve peralkalin granitlerdeki nadir toprak elementlerin mineralizasyonunun zıt jeokimyasal ve mineralojik özellikleri, ana mağmalarının farklı kökenlerini, değişim süreçlerini ve aynı zamanda birincil REE minerallerinin hidrotermal sıvılar (özellikle F ve Cl

taşıyan sıvılar) tarafından mağmatik süreç sonrasında yeniden işlenmesi kapsamındaki farklılıkları gösterir (Hoatson ve ark., 2011; Chakhmouradian ve Zaitsev, 2012). Şekil 5'de Dünyada bulunan alkali/peralkalin mağmatik kayalardaki önemli REE yatakları verilmiştir (Dostal, 2017).



Şekil 5: Dünyada bulunan Alkali/peralkalin mağmatik kayalardaki önemli REE yatakları (Dostal, 2017).

b. İkincil Kaynaklar

Lateritler: NTE yataklarının oluşum sürecine etki eden faktörler ile lateritlerin oluşumuna etki eden faktörler (iklim, rölyef vb.) benzerdir. Fakat NTE'lerce zengin lateritler daha sıcak, daha nemli iklimlerde ve rölyefin yüksek olduğu bölgelerde gözlenmektedir. Bu oluşum sürecine etki eden faktörler, karbonatitlerin olduğu bölgelerde hâkim olduğunda karbonatitleri laterit oluşumuna yatkın hale getirir ve karbonatitler üzerinde NTE bakımından zenginleştirilmiş oldukça kalın profile sahip lateritler oluşabilir. in önemli kalınlıklarının (Lottermoser, 1990; Weng ve ark., 2013), NTE hareketliliğini/fraksiyonlanmasını ve oluşumunu kontrol eden faktörleri anlamada NTE dağılımı çok önemlidir için dolayısıyla onu potansiyel bir NTE cevher yatağı olarak nitelendiren özellikleri kontrol eder (Banfield ve Eggleton, 1989; Walter ve ark., 1995; Sanematsu ve ark., 2011; Sanematsu ve ark., 2013).

Plaser: Mağmatik kayaların (kristalen) ve orta-yüksek dereceli metamorfik kayaların (amfibolit fasiyesi ve daha yüksek) erozyonu sonucu oluşan alüvyon ve kıyı ortamlarında oluşan plaser tipi (elüvyal, alüvyal, eolian, plaj ve fosil (paleo) birikinti) yataklarda, NTE içeren monazit minerali genellikle titanyum oksit mineralleri (ilmenit, rutil), zirkon, sillimanit, garnet, staurolit ve diğerleri gibi minerallerin yan ürünü iken ksenotim minerali kalay

(kasiterit) plaser madenciliğinin yan ürünüdür. Monazit içeren plaser yataklar tüm kıtalarda bulunmaktadır ve günümüze kadar Avustralya (Jurien Bay, Eneabba), Brezilya (Camaratuba), Malezya, Tayland, Çin, Yeni Zelanda, Sri Lanka, Endonezya, Zaire, Kore ve Amerika Birleşik Devletleri (Oak Grove), Hindistan (Manavalakuruchi, Chavara), Madagaskar ve Mısır'daki (Nil Delta) kıyı ve alüvyon plaserlerinden yan ürün olarak monazit geri kazanılmıştır (Orris ve Grauch, 2002; Castor ve Hedrick, 2006; Jackson ve Christiansen, 1993; Sengupta ve Van Gosen, 2016; Goodenough ve ark., 2016)

Nadir toprak elementleri içeren iyon adsorbsiyon killeri: Güney Çin'de ve Myanmar'da bulunmaktadır. Küresel ağır NTE talebinin %95'inden fazlasını karşılayan bu killerin gelişimini destekleyen kontroller henüz tam olarak anlaşılammıştır ancak, ılıman ve tropik iklim koşullarında çoğunlukla granit veya yer yer alkali kayaçlar gibi belirli çözülebilir NTE mineralleri (florkarbonatlar, ödialit ve allanit) içeren mağmatik kayaçların (tipik olarak granitlerin) aşınmasıyla oluşur. Yüzey aşınması nedeniyle NTE mineralleri ayrışır ve iyonize NTE'ler feldispatların alterasyonu ile oluşan halloysit ve kaolinit gibi kil mineralleri tarafından emilir. Güney Çin'de, liç madenciliği ve basit ve ucuz geri kazanım işlemleri ile son derece düşük dereceli ayrılmış kilden, emilen NTE'ler (2000 ppm'ye kadar) seyreltik elektrolit çözeltisi olan amonyum sülfat çözeltisi ile geri kazanılarak, oksalik asit çözeltisiyle çökeltilir (Cocker, 2012; Sanematsu and Watanabe, 2016; Ding, 2012; Yang ve ark., 2013; Wall, 2021; Zhong, 2022).

c. Diğer Kaynaklar

Okyanus Tabanı Tortuları ve Kıta Sahanlığı Tortuları: Günümüzde deniz dibi madenciliğinin olası çevresel etkileri tartışma konusu olsa da derin deniz çökeltilerinin büyük miktarlardaki NTE içerikleri ve oldukça yüksek orandaki ağır NTE'leri bulundurması nedeniyle gelecekte NTE kaynağı olarak ilgi çekmektedir. Ferromangan kabukları (kobalt kabukları), manganez yumruları ve derin okyanusların farklı kısımlarından gelen deniz çamuru deniz tabanı nodülleri yüksek miktarlarda nadir toprakları değil aynı zamanda stratejik ve kritik öneme sahip Co, Ti, Ce, Zr, Ni, Pt, Mo, Te, Cu, W'yi de bulundurmaktadır. Japonya'nın münhasır ekonomik bölgesinde >5000 ppm NTE için derin deniz mineral kaynağı, Kuzey Kutbu'ndaki Sibiryaya denizlerinin dip çökelleri, Atlantik Okyanusu ve Kuzey Güney Çin'in kıta sahanlığı çökeltileri, metal içeren derin deniz çökeltilerine benzer şekilde NTE için potansiyel kaynaklardır. Ayrıca diğer yatakların aksine, NTE'lerini barındıran minerallerin kristal kafesinin bir parçası olmadığı bu deniz çökeltilerinin madencilik ve metalurjik olarak işlenmesi için önemlidir (Balaram ve ark., 2012; Balaram ve ark., 2013; Balaram, 2023a; Hein ve ark., 2016; Kato ve ark., 2011; Singh, 2021; Takaya ve ark., 2018; Pourret ve Tuduri, 2017; Ge ve ark., 2020; Balaram, 2023b).

Kömür, Kömür Uçucu Külü: Ülkeler enerji santrallerinde elektrik üretmek için kömür kullanmaktadır ve atık olarak uçucu kül oluşmaktadır. Potansiyel NTE kaynaklarından bir tanesi de kömür, kömür uçucu ve dip külüdür. Kömür ve kömür uçucu külünden NTE'nin çıkarılması için ekonomik olarak uygun prosedürlerin geliştirilmesi için çeşitli çalışmalar başlatılmıştır (Balaram, 2023a).

Geri dönüşüm: Döngüsel ekonomi, doğal kaynakların ve çevrenin korunmasını, sürdürülebilir kalkınmayı ve israfı önlemeyi amaçlayan endüstriyel bir sistemdir. “Kentsel madencilik” olarak da adlandırılan geri dönüşüm bu sistemin en önemli parçalarından biridir. Ömrünü tamamlamış NTE'nin kullanıldığı malzemeler, NTE'in geri kazanımı için çok önemlidir.

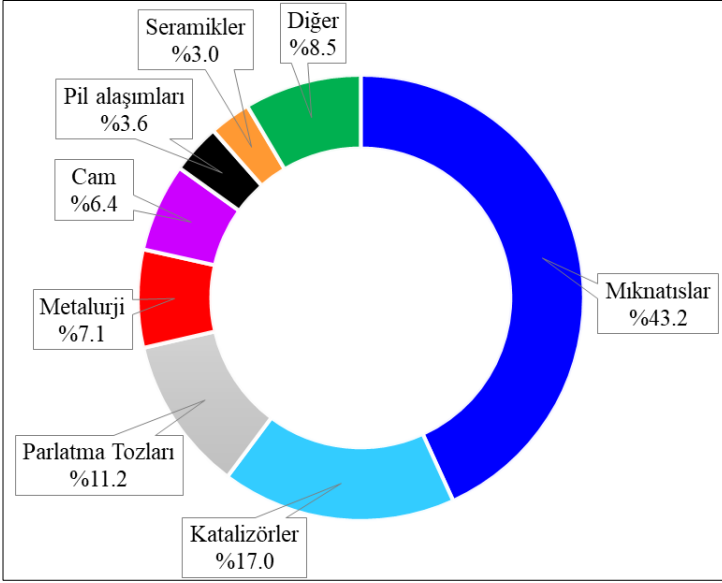
NTE'in geri dönüştürülmesine yönelik geniş çaplı bilimsel araştırmalara ihtiyaç olduğu gibi büyük endüstriyel ölçekli teknolojilerde halen mevcut değildir. Fakat kullanım ömrünü tamamlamış kalıcı miktatsızlar, nikel metal hidrit piller, lamba fosforları, cam parlatma tozları, katalizörlerinden ve optik cam gibi malzemelerin çoğu NTE için geri kazanılabilir ve yeniden kullanılabilir. NTE'leri, atıklardan geri kazanmak için çalışmalar yapılmaktadır. Floresan ampullerden altı tane NTE'nin eldesi ve 1.000 tondan fazla ürünün geri dönüştürmesi, Japonya'da ömrünü tamamlamış elektronik ürünlerden, ev aletlerinden ve hibrit arabalara kadar birçok NTE uygulama alanını kapsayan sınırlı bir ölçekte geri kazanılması, bu çalışmalardan birkaç tanesidir. Bununla birlikte ömrünü tamamlamış ürünler dışında Petrol şistleri gibi minerallerden de NTE'ler geri kazanılabilmektedir (Zhou ve ark., 2016; Sun ve ark., 2015)

2. KULLANIM ALANLARI

Günümüzde, modern endüstrinin vitaminleri olarak nitelendirilen nadir toprak elementlerine araştırmacıların ve teknoloji geliştiricilerinin ilgisi olduğu kadar enerji kaynaklarının kıtlığı, rezervlerinin giderek azalması, küresel ısınma, iklim değişiklikleri, temiz enerji ve yüksek teknoloji yatırımları için ülkelerin de talebi oldukça fazladır (http://metalpedia.asianmetal.com/metal/rare_earth/application.shtml; Balaram, 2019).

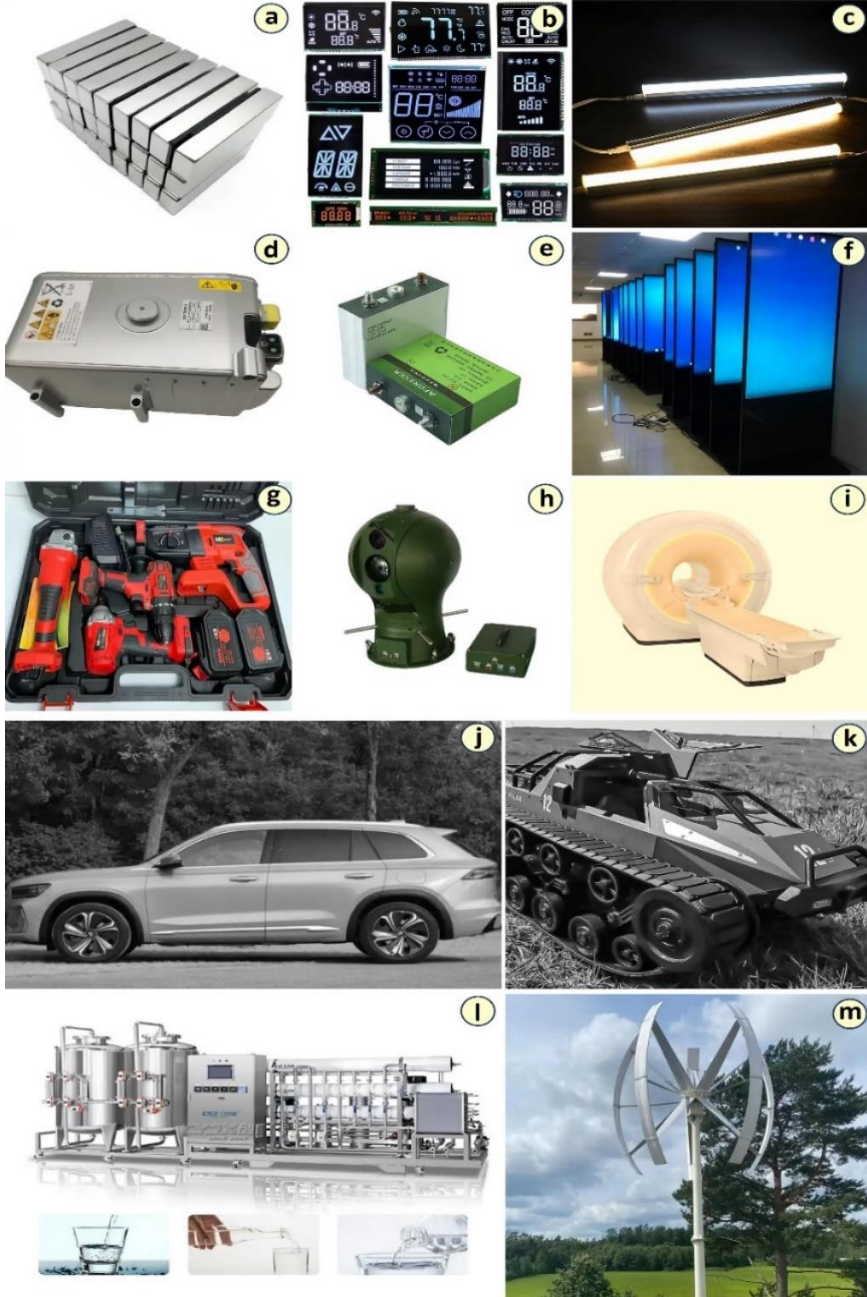
Nadir toprak elementlerinin potansiyelinin tam olarak değerlendirilemediği mühendislik uygulamaları olsa da, nadir toprak elementlerinin yerini alabilecek veya kullanım miktarını azaltacak alternatif malzemeler araştırılsa da uygulama alanlarındaki, bileşiminde buldukları teknolojik ürünlerin kalitesinin ve verimliliğinin düşmemesi için kendine özgü optik, mekanik, elektronik ve manyetik özellikleri için tercih edilen elementlerdir. Kanada Devleti'nin hazırladığı nadir toprak element raporuna (2021) göre; nadir toprak elementlerin kullanım alanları miktatsızlar (%43.2), katalizörler (%17.0), parlatma tozları (%11.2), metalurji (%7.1), cam (%6.4),

pil alaşımları (%3.6), seramik (%3.0) ve diğer ürünlerdir (fosforlar, pigmentler, vb.) (%8.5) (Şekil 6) (Natural Resources Canada, 2021).



Şekil 6: Nadir Toprak elementlerinin kullanım alanları (Natural Resources Canada, 2021).

Yaşadığımız yüzyılın ikinci çeyreğindeki teknolojik devrimin vazgeçilmez bileşenleri haline gelecek olan nadir toprak elementleri, 1960'lı yıllardan beri yavaş yavaş televizyon ekranlarında kullanılan nadir toprak elementleri, sonraki yıllarda yüksek teknoloji diğer ekranlarda (bilgisayarlar, skorbordlar ve cep telefonları vb.), ışık yayan diyotlarda ve aydınlatma malzemelerinde (ampul, floresan ve LED'ler), yüksek mukavemetli mıknatıslarda, yüksek sıcaklık süper iletkenlerinde, modern cerrahi makineler gibi tıbbi görüntüleme cihazlarında, kanser tedavisi uygulamalarında, lazerlerde (tıbbi ve dental), cam endüstrisinde (parlatma ve optik camlarda vb.), seramiklerde (elektronik sensörler, PTC malzemeleri, mikrodalga malzemeleri, kapasitörler, termistörler), pillerde (hibrit elektrikli otomobiller, yeni nesil şarj edilebilir olanlar), katalizör olarak (biyoyakıt, petrol endüstrisinde, otomotiv katalitik konvertörlerinde), temiz enerji sistemlerinde (gelişmiş su arıtımı, rüzgar enerji türbinleri, elektrikli araçlar gibi), askeri savunma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Min ve ark., 2015; Zhou ve ark., 2016; Duchna ve Cieřlik, 2022) (Şekil 7).

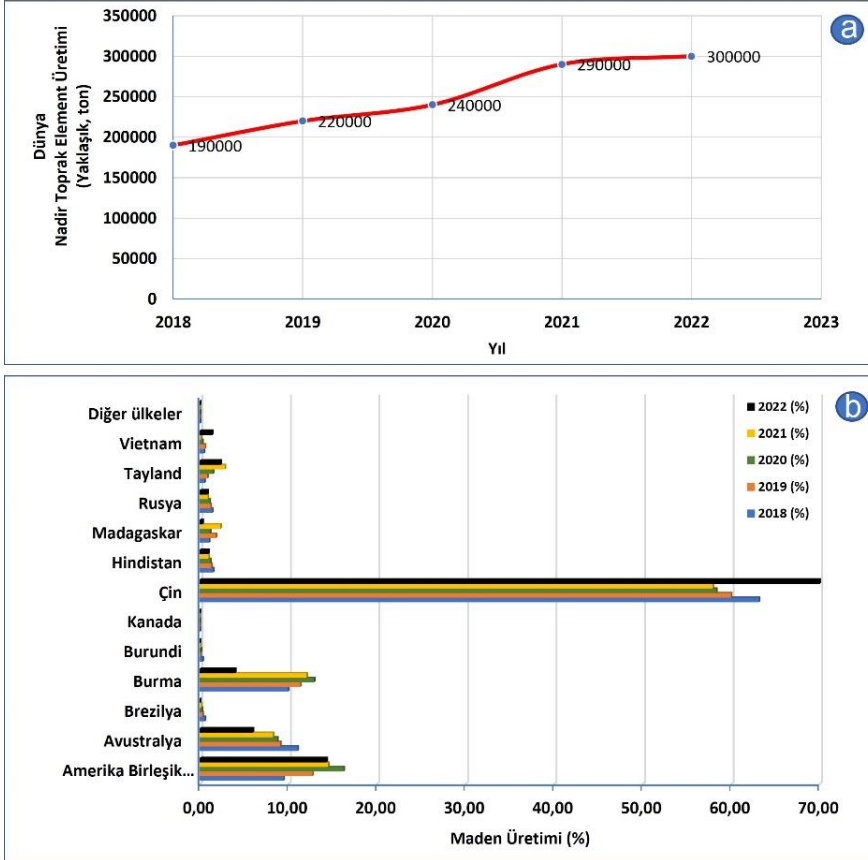


Şekil 7: Nadir toprak elementlerinin kullanım alanları a) güçlü mıknatıslar, b) paneller c) aydınlatma malzemeleri, d) hibrit otomobil pilleri E) yeni nesil piller f) ayaklı ekranlar g) kablosuz cihazlar, h) termal gözetleme kameraları, i) tıbbi görüntüleme cihazları, j) otomotiv alt sistemleri k) askeri savunma sistemleri, l) su arıtma sistemleri, m) rüzgâr tribünleri (<https://www.alibaba.com>)

Yukarıda bahsettiğimiz kullanım alanlarından özellikle petrokimya endüstrisinde yakıtlarda, büyük molekülleri daha küçük hidrokarbonlara ayırmakta, kalıcı manyetiklik özelliğinden dolayı alaşımlarda, rüzgar türbinlerinde güçlü mıknatıslarda, ve elektrikli araçlar için sabit mıknatıslı motorların yapımında oldukça kritik öneme sahiptir (Akah 2017, DOE 2019; Hanejko 2020).

3. DÜNYA FAALİYETLERİ

Küresel NTE madenciliğinde Çin ana tedarikçiliği eline almasından önce Amerikan Birleşik Devletleri (ABD) küresel pazarın ana tedarikçisiydi. Fakat ABD Enerji Bakanlığı'nın 2020 yılı raporuna göre ABD nadir toprak elementlerinin yüzde 80'ini doğrudan Çin'den ithal etmektedir. %20'lik geri kalanı ise diğer ülkeler aracılığıyla, dolaylı olarak yine Çin'den almaktadır (U.S. Department of Energy, 2020).



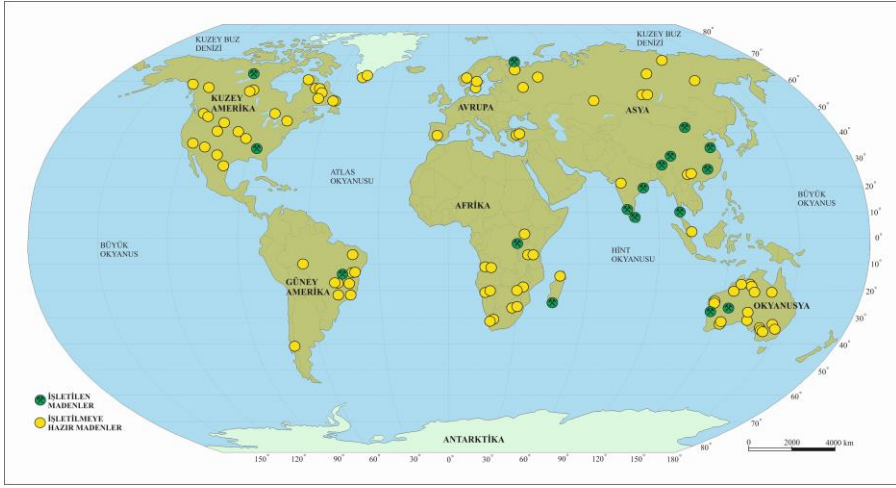
Şekil 8: a) 2018-2022 yılı Dünya nadir toprak element üretimi b) 2018-2022 yıllara göre ülkelerin nadir toprak element üretim miktarları (%) (U.S. Geological Survey 2022; U.S. Geological Survey 2023)

Şekil 8a'da 2018-2022 yılı Dünya nadir toprak element üretimi verilmiştir ve 2019 yılında pandemi ile birlikte üretim yavaşlamasına rağmen 2022 yılında 2018'e göre % 50, üretimde artış olmuştur (USGS 2022; USGS 2023). Şekil 8b'de ise 2018-2022 yıllara göre ülkelerin nadir toprak element üretim miktarları (%) verilmiştir. Çin küresel üretimin %70'lik payına sahipken, Avustralya ise %10'luk paya sahiptir. Bununla birlikte diğer üretici ülkeler ise Vietnam, Tayland, Rusya, Hindistan, Madagaskar ve Brezilya'dır. Tablo 4'te Dünya'daki başlıca ekonomik olarak işletilebilir nadir toprak elementi (REE) yatakları verilmiştir.

Tablo 4: Dünyadaki başlıca ekonomik olarak işletilebilir nadir toprak elementi yatakları (Wang ve ark., 2020)

Ülke	Nadir Toprak Element Yatağı ve Oluşum Tipi
Çin	Maoniuping (karbonatit)
	Bayan Obo (mağmatik karbonatit)
	Güney Çin'deki Ağır NTE bakımından zengin yataklar (yıpranmış kabuk elüsyonu)
Brezilya	Araxá Catalão (ayrışmış karbonatit)
	Mirro do Ferro (karbonatit)
Avustralya	Mount Weld (ayrışmış karbonatit)
Amerika Birleşik Devletleri	Mountain Pass (karbonatit)
Rusya	Tomtor ayrışmış karbonatit
	Lovozero (alkali mağmatik kayaç)
Hindistan	Amba Dongar (karbonatit)
Vietnam	Mau Sai (karbonatit)
Burundi	Gakara (karbonatit)
Malavi	Kangankunde (karbonatit)
Güney Afrika	Palabora (karbonatit)
	Steenkampskraal (alkali mağmatik kayaç)
Türkiye	Aksu Diamas (plaser)
Grönland	Tanbreez (alkali mağmatik kayaç)
İsveç	Norra Kärr (alkali mağmatik kayaç)

Küresel nadir toprak element projelerindeki ayrıntılı gelişmeleri ve tedarik zincirlerinin güncel durumunu vurgulayan Liu ve ark. (2023)'dir. Liu ve ark. (2023) araştırmalarında 146 ileri ve madencilik projesinin olduğunu ve 303,4 milyon tonun üzerinde nadir toprak oksit içerdiğinden bahsetmiştir. Karbonatit tipi yatakların günümüzde olduğu gibi gelecekte de NTE'ler için ana kaynak olacağını vurgulamıştır. Asya ülkeleri halen NTE'lerin ana tedarikçisidir fakat çevre sorunları ve işleme teknolojileri için oluşan kaygıların giderildiğinde Grönland, Afrika ve Avrupa, NTE'ler için önemli kaynaklara sahiptirler (Şekil 9).



Şekil 9: Nadir toprak elementler için hem aktif madenlerin hem de gelişmiş projelerin küresel dağılımı (Liu ve ark., 2023)

Öztürk ve ark., (2019) Türkiye'deki nadir toprak element yatağı ve cevherleşmeleri jeolojik açıdan hafif NTE'lerince zengin karbonatit-alkali magmatitlerle ilişkili yataklar (Kızılcaören-Eskişehir ve Kuluncak-Malatya), ağır NTE'lerince zengin (iyon adsorpsiyon tip) Bolkardağı bölgesindeki Triyas şeylleri ve bunlardan oluşan boksitler, U, Th, Ağır NTE ve manyetit, zirkon, rutil vb. ağır minerallerce zengin plaser tip yataklar (Çanaklı-Burdur) ve NTE potansiyel kaynağı fosforitler (Mazıdağı fosfatları) şeklinde sınıflandırmıştır. Bununla birlikte ülkemizde bulunmuş ve henüz işletilmeyen NTE yatakları mevcuttur. Bilinen en önemli NTE kaynakları, Kızılcaören-Eskişehir'deki bastnasit-fluorit-barit yatağı ve Malatya-Kuluncak yöresi britolit cevherleşmesidir. (MTA, 2017)

4. SONUÇLAR

Nadir toprak elementleri gelişen teknoloji ve genişleyen kullanım alanlarıyla birlikte kritik hammaddeler sınıfında yer almaya devam edecektir. Avrupa Komisyonu'na göre, nadir toprak elementlere talep 2030 yılına kadar altı kat, 2050 yılına kadar da yedi kat artacaktır. Ülkemizin bu kritik elementler bakımından kendine yeterli hale gelmesi için birincil ve ikincil kaynakların araştırılmasının devam etmesiyle birlikte kıta sahanlıklarında, okyanus ortası tabanında gelişen yataklar, kömür ve yan ürünleri ve geri dönüşüm gibi diğer potansiyel kaynaklarının araştırılmasına da önem verilmelidir. Bununla birlikte Asya ülkelerinin pazara hâkim olmasından dolayı kaynaklanan problemlerin (ekonomik ve tedarik gibi) azaltılması için nadir toprak elementlere alternatif olabilecek malzemeler için araştırmalar yapılmalıdır. Ayrıca NTE'lerin kullanımını azaltılarak ürünler yeniden tasarlanıp kullanılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Arzamastsev, A. A., Glaznev, V. N., Arzamastseva, L. V., Bea, F. ve Montero, P. (2001). Kola alkaline province in the Paleozoic: evaluation of primary mantle magma composition and magma generation conditions. *Russian Journal of Earth Sciences*, 3(1), 1-32.
- Atwood, D. A. (Ed.). (2013). *The Rare Earth Metals: Fundamentals and Applications*; John Wiley ve Sons. Chichester, UK. ISBN 978-1-119-95097-4.
- Akah, A. (2017). Application of rare earths in fluid catalytic cracking: A review. *Journal of Rare Earths*, 35(10), 941-956.
- Bea, F. (1996). Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths; implications for the chemistry of crustal melts. *J Petrology* 37:521-552
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1285-1303.
- Balaram, V., Banakar, V. K., Subramanyam, K. S. V., Roy, P., Satyanarayanan, M., Mohan, M. R. ve Sawant, S. S. (2012). Yttrium and rare earth element contents in seamount cobalt crusts in the Indian Ocean. *Current Science*, 1334-1338.
- Balaram, V., Satyanarayanan, M., Murthy, P. K., Mohapatra, C. ve Prasad, K. L. (2013). Quantitative multi-element analysis of cobalt crust from Afanasy-Nikitin Seamount in the North Central Indian Ocean by inductively coupled plasma time-of-flight mass spectrometry. *MAPAN-J. Metrol. Soc. India*, 28(2), 63-77.
- Balaram, V. (2022). Rare Earth Element Deposits—Sources, and Exploration Strategies. *J. Geol. Soc. India* 2022, 98, 1210–1216.
- Balaram, V. (2023a). Potential future alternative resources for rare earth elements: Opportunities and challenges. *Minerals*, 13(3), 425.
- Balaram, V. (2023b). Deep-sea mineral deposits as a source of critical metals for high-and green-technology applications. *Miner. Miner. Mater.*
- Banfield, J. F. ve Eggleton, R. A. (1989). Apatite replacement and rare-earth mobilization, fractionation, and fixation during weathering. *Clays Clay Miner.* 37, 113–127.
- Beatty, R. (2008). *The Lanthanides*. New York: Marshall Cavendish Benchmark.
- Bernard, C., Estrade, G., Salvi, S., Béziat, D. ve Smith, M. (2020). Alkali pyroxenes and amphiboles: a window on rare earth elements and other high field strength elements behavior through the magmatic-hydrothermal transition of peralkaline granitic systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 175, 1-27.

- Broska I., Petřík I. ve Williams, C. T. (2000). Coexisting monazite and allanite in peraluminous granitoids of the Tribec Mountains, Western Carpathians. *Am Mineral* 85:22-32
- Chakhmouradian, A. R. ve Wall, F. (2012). Rare earth elements: Minerals, mines, magnets (and more). *Elements* 8: 333–340.
- Chakhmouradian, A. R. ve Zaitsev, A. N. (2012). Rare earth mineralization in igneous rocks: sources and processes. *Elements*, 8(5), 347-353.
- Charalampides, G., Vatalis, K. I., Apostoplos, B., ve Nikolas, B. P. (2015). Rare Earth Elements: Industrial Applications and Economic Dependency of Europe. *Procedia Econ* 24, 126-135.
- Castor, S. B. ve Hedrick, J. B. (2006). Rare earth elements. In: Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M., Krukowski, S.T. (Eds.), *Industrial Mineral and Rocks*, seventh ed. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, Littleton, pp. 769–792.
- Cocker, M. D. (2012). Lateritic, supergene rare earth element (REE) deposits. In Proceedings of the 48th Annual Forum on the Geology of Industrial Minerals, 30 April–4 May 2012; pp. 1–18. USA,
- Deer W. A., Howie R. A. ve Zussman, J. (1985). An Introduction to Rock-forming Minerals. Longman: Hong Kong, pp. 504–509.
- Dostal, J. (2017). Rare earth element deposits of alkaline igneous rocks. *Resources*, 6(3), 34.
- Ding, J. Y. (2012). Historical review of the ionic rare earth mining: in honor of the 60 anniversary of GNMR. *Nonferrous Met. Sci. Eng.* 3, 14–19 (in Chinese with English abstract).
- Duchna, M. ve Cieřlik, I. (2022). Rare Earth Elements in New Advanced Engineering Applications.
- Dushyantha, N., Batapola, N., Ilankoon, I.M.S.K., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeysinghe, B., Ratnayake, N. ve Dissanayake, K. (2020). The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. *Ore Geol. Rev.*, 122, 103521.
- Erkan Y. (2011). Kayaç Oluşturan önemli minerallerin Mikroskopta İncelenmeleri. TMMOB Jeoloji Müh. Odası Yayınları, Ankara.
- European Commission Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report 978-92-68-00414-2, European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (2023).
- Ge, Q., Xue, Z. G. ve Chu, F. (2020). Rare earth element distributions in continental shelf sediment, northern South China Sea. *Water*, 12(12), 3540.
- Gieré, R. ve Sorensen, S. S. (2004). Allanite and other REE-rich epidote-group minerals. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 56(1), 431-493.

- Golloch, A. (2022). *Handbook of Rare Earth Elements: Analytics*, 2nd ed.; De Gruyter: Berlin, Germany. ISBN 9783110696363.
- Goodenough, K. M., Schilling, J., Jonsson, E., Kalvig, P., Charles, N., Tuduri, J., Deady, E.A., Sadeghi, M., Schiellerup H., Müller A., Bertrand G., Arvanitidis N., Eliopoulos D. G., Shaw R. A., Thrane K. ve Keulen N. (2016). Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 72(Part 1), 838–856
- Gupta, C.K. ve Krishnamurthy, N. (2005). *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 70–75.
- Hanejko, Fran. (2020). Induction vs. Permanent Magnet Motor Efficiency: Auto Electrification. Horizon Technologies. Accessed April 6, 2021, <https://www.horizontechnology.biz/blog/induction-vs-permanent-magnet-motor-efficiency-autoelectrification>.
- Hein, J. R., Koschinsky, A., Mikesell, M., Mizell, K., Glenn, C. R. Ve Wood, R. (2016). Marine phosphorites as potential resources for heavy rare earth elements and yttrium. *Minerals*, 6(3), 88.
- Hoatson, D. M., Jaireth, S. ve Mieazitis, Y. (2011). *The Major Rare Earth-Element Deposits of Australia: Geological Setting, Exploration, and Resources*, Geoscience Australia, Canberra, Australia.
- <https://www.alibaba.com> adresinden 12 Ağustos 2023 tarihinde alınmıştır.
- http://metallpedia.asianmetal.com/metal/rare_earth/application.shtml adresinden 12 Ağustos 2023 tarihinde alınmıştır.
- <https://ruff.info/doclib/hom/allanitece.pdf> adresinden 12 Ağustos 2023 tarihinde alınmıştır.
- Hughes, J. M., Cameron, M. ve Mariano, A. N. (1991). Rare-earth-element ordering and structural variations in natural rare-earth-bearing apatites. *American Mineralogist*, 76(7-8), 1165-1173.
- Hurst, C. (2010). China's rare earth elements industry: what can the west learn? Fort Leavenworth, Kansas.
- Ihlen, P. M., Schiellerup, H., Gautneb, H. ve Skår, Ø. (2014). Characterization of apatite resources in Norway and their REE potential—A review. *Ore Geology Reviews*, 58, 126-147.
- Jackson, W.D. ve Christiansen, G. (1993). *International strategic minerals inventory summary report—rare-earth oxides*. U.S. Geological Survey, Reston, VA. Circular 930-N. 68p.
- Jordens, A., Cheng, Y.P. ve Waters, K.E. (2013). A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Miner. Eng.* 41, 97–114.
- Kamenetsky, V. S., Doroshkevich, A. G., Elliott, H. A. ve Zaitsev, A. N. (2021). Carbonatites: contrasting, complex, and controversial. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 17(5), 307-314.

- Kanazawa, Y. ve Kamitani, M. (2006). Rare earth minerals and resources in the world 412, 1339–1343.
- Kato, Y., Fujinaga, K., Nakamura, K., Takaya, Y., Kitamura, K., Ohta, J., Toda, R., Nakashima, T. ve Iwamori, H. (2011) Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience*, v.4, pp.535-539.
- Krishnamurthy, N. ve Gupta, C. K. (2015). Extractive metallurgy of rare earths. 869, CRC press, Boca Raton.
- Kosterin, A.V., Kizyura, V. E. ve Zuev, V. N. (1961). Ratios of rare earth elements in allanites from some igneous rocks of northern Kirgiziya. *Geochemistry* 5:481-484
- Kumar, S., Pandey, S. ve Kumar, S. (2012). Determination of rare earth elements in Indian kimberlite using inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 294(3), 419-424.
- Larsen, L.M. ve Sørensen, H. (1987). The Ilímaussaq intrusion—progressive crystallization and formation of layering in an agpaitic magma. *Geol Soc Lond Spec Publ* 30:473–488
- Lottermoser, B. G. (1990). Rare-earth element mineralisation within the Mt. Weld Carbonatite laterite, Western Australia, *Lithos*, 24, (2), 151–167.
- Liu, S. L., Fan, H. R., Liu, X., Meng, J., Butcher, A. R., Yann, L., Yang K.F. ve Li, X. C. (2023). Global rare earth elements projects: New developments and supply chains. *Ore Geology Reviews*, 105428.
- Long, K. R., Van Gosen, B. S., Foley, N. K. ve Cordier, D. (2010). The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States—A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective, Scientific Investigations Report 2010–5220. US Geological Survey, 96.
- Long, K.R., Van Gosen, B.S., Foley, N.K. ve Cordier, D. (2012). The principal rare earth elements deposits of the United States: a summary of domestic deposits and a global perspective. In: *Non-Renewable Resource Issues*. Springer, pp. 131–155.
- Lyubetskaya, T. ve Korenaga, F. (2007). Chemical composition of Earth's primitive mantle and its variance, 1, Method and results. *J. Geophys. Res.* 112 (B3), B03211.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2017). Dünyada ve Türkiye'de Nadir Toprak Elementleri (NTE). Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı. Maden Serisi: 5. Ankara.
- Min, X., Xiwen, S., Fen, Z. ve Shengli, A. (2015). Study on Structure and Thermo-Physical Properties of Sm_{2-x}Y_xZrO₇ Ceramics for Thermal Barrier Coatings [J]. *Functional Materials*, 46(24), 24038-24042.
- Modreski, P. J., Armbrustmacher, T. J. ve Hoover, D. B. (1996). Carbonatite Deposits, in Preliminary compilation of descriptive geo-environmental

- mineral deposit models, (ed. du Bray), 47–49, USGS, Denver, Colorado.
- Natural Resources Canada. (2021). Rare Earth Elements. Government of Canada. <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/minerals-mining/minerals-metals-facts/rare-earth-elements-facts/20522>. (Erişim: 02.09.2023)
- Orris, G.J. ve Grauch, R.I. (2002). Rare earth element mines, deposits, and occurrences. U.S. Geological Survey Open File Report 02-189, 78p.
- Öztürk, H., Haniççi, N., Altuncu, S. ve, & Kasapçı, C. (2019). Türkiye'nin nadir yer element (NYE) kaynakları: Özelliklerine ve kökenlerine genel bir bakış. *MTA Dergisi*, 159, 133-148.
- Pourret, O. Ve Tuduri, J. (2017). Continental shelves as potential resource of rare earth elements. *Scientific Reports*, 7(1), 5857.
- Rudnick, R.L. ve Gao, S. (2003). Composition of the continental crust. In: Rudnick, R.L. (Ed.), *Treatise on Geochemistry. The Crust*, vol. 3. Elsevier, Amsterdam, pp. 1–64.
- Rukhlov, A. S., ve Bell, K. (2010). Geochronology of carbonatites from the Canadian and Baltic Shields, and the Canadian Cordillera: clues to mantle evolution. *Mineralogy and Petrology*, 98, 11-54.
- Samson, I. M. ve Wood, S. A. (2005). The rare-earth elements: behavior in hydrothermal fluids and concentration in hydrothermal mineral deposits, exclusive of alkaline settings. Geological Association of Canada Short Course Notes, 17, 269-297.
- Sanematsu, K., Moriyama, T., Sotouky, L. ve Watanabe, Y. (2011). Mobility of rare earth elements in basalt-derived laterite at the Bolaven Plateau, southern Laos. *Resour. Geol* 61, 140–158.
- Sanematsu, K., Kon, Y., Imai, A., Watanabe, K. ve Watanabe, Y. (2013). Geochemical and mineralogical characteristics of ion-adsorption type REE mineralization in Phuket, Thailand. *Miner. Deposita* 48, 437–451.
- Sanematsu, K., ve Watanabe, Y. (2016). Characteristics and genesis of ion adsorption-type rare earth element deposits.
- Sengupta, D. ve Van Gosen, B. S. (2016). Placer-type rare earth element deposits. *Reviews In Economic Geology*. 18, 81–100.
- Siegfried, P. ve Hall, M. (2012). NI 43-101 technical report and mineral resource estimate for Area 4 of the Lofdal rare earth element (REE) project, Khorixas District, Republic of Namibia, The MSA group.
- Singh, Y. (2021). Rare Earth Element Metallogeny in Indian Continental Shelf and Ocean Floor. *Journal of the Geological Society of India*, 97, 1396-1402.
- Späth, A., Le Roex, A. P. ve Opiyo-Akech, N. (2001). Plume–lithosphere interaction and the origin of continental rift-related alkaline volcanism—the Chyulu Hills volcanic province, southern Kenya. *Journal of Petrology*, 42(4), 765-787.

- Sridhar, N., Mallikarjuna, R., Reddy ve Nagendrababu, G. (2018): Quartz syenites from the Prakasam alkaline province, Southern India; A comparative study with special emphasis on their rare earth element contents. *Journal of India Geophysical Union*, 22(5), pp.507–517.
- Sun, Z., Xiao, Y., Agterhuis, H., Sietsma, J. ve Yang, Y. (2016). Recycling of metals from urban mines—a strategic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2977-2987.
- Takaya, Y., Yasukawa, K., Kawasaki, T., Fujinaga, K., Ohta, J., Usui, Y., Nakamura, K., Kimura, J.I., Chang, Q., Hamada, M., Dodbiba, G., Nozaki, T., Iijima, K., Morisawa, T., Kuwahara, T., Ishida, Y., Ichimura, T., Kitazume, M., Fujita, T. ve Kato, Y. (2018) The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements. *Scientific Reports*, 8- 5763, doi: 10.1030/s41598-010-23940-5
- U.S. Department of Energy. (2019). Advanced Wind Turbine Drive Train Trends and Opportunities. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy.
- U.S. Department of Energy. (2020). Critical Minerals and Materials: US Department of Energy’s Strategy to Support Domestic Critical Mineral and Material Supply Chains (FY 2021-FY 2031). Washington DC.
- Verplanck, P. L., Mariano, A. N. ve Mariano, A. (2016). Rare earth element ore geology of carbonatites.
- Van Gosen, B. S., Verplanck, P. L., Long, K. R., Gambogi, J. ve Seal II, R. R. (2014). *The rare-earth elements: vital to modern technologies and lifestyles* (No. 2014-3078). US Geological Survey.
- Voncken, J. H. L. (2016). *The rare earth elements: an introduction*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Wall, F. (2021). Rare earth elements, *Encyclopedia of Geology*, second edn., 680–693, Academic Press, 2021.
- Walter, A. V., Nahon, D., Flicoteaux, R., Girard, J. P., ve Melfi, A. (1995). Behaviour of major and trace elements and fractionation of REE under tropical weathering of a typical apatite-rich carbonatite from Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, 136(3-4), 591-602.
- Walters, A., Lusty, P., Chetwyn, C. ve Hill, A. (2010). Rare earth elements. Mineral Profile Series, British Geological Survey (BGS), UK.
- Wang, Z. Y., Fan, H. R., Zhou, L., Yang, K. F. ve She, H. D. (2020). Carbonatite-related REE deposits: An overview. *Minerals*, 10(11), 965.
- Weng, Z. H., Jowitt, S. M., Mudd, G. M. ve Haque, N. (2013). Assessing rare earth element mineral deposit types and links to environmental impacts. *Applied Earth Science*, 122(2), 83-96.
- White, W.M. ve Klein, E.M. (2013). The oceanic crust. *Treatise of Geochemistry*, second ed. edited. Whitten, C.W., Yancey, R.J., 1990.

- Characterization of the rare-earth mineralogy at the Pea Ridge deposit, Missouri. U.S. Bur. Mines Rep. Invest. 9331, 1–9.
- Winter, J.D., 2010. Principles of Igneous and Metamorphic Petrology, second ed. Prentice Hall, New York. 720p.
- Woolley, A.R. ve Kempe, D. R. C. (1989). Carbonatite: nomenclature, average chemical compositions and element distributions. *Carbonatites: genesis and evolution*. London: Unwin Hyman, London, pp 1-14.
- Yang, X. J., Lin, A., Li, X. L., Wu, Y., Zhou, W. ve Chen, Z. (2013). China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation. *Environ Dev* 8: 131–136.
- Yüce K. (2006). Dünya ve Yıldızlardaki Parmak İzleri - Nadir Toprak Elementleri. TÜBİTAK Bilim ve Teknik, sayı: 468, s. 64-66. Kasım 2006.
- Zhou, B., Li, Z., Zhao, Y., Zhang, C. ve Wei, Y. (2016). Rare Earth Elements supply vs. clean energy technologies: new problems to be solve. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 32(4), 29-44.
- Zhang, Z., Jia, Q. ve Liao, W. (2015). Progress in the separation processes for rare earth resources. *Handbook on the physics and chemistry of rare earths*, 48, 287-376.
- Zhong, W., Ouyang, J., Yang, D., Wang, X., Guo, Z. ve Hu, K. (2022). Effect of the in situ leaching solution of ion-absorbed rare earth on the mechanical behavior of basement rock. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(4), 1210-1220.

BÖLÜM 5

NIKEL

Öğr. Gör. Dr. Zehra ÇETİNKAYA¹
Prof. Dr. Oktay BAYAT²

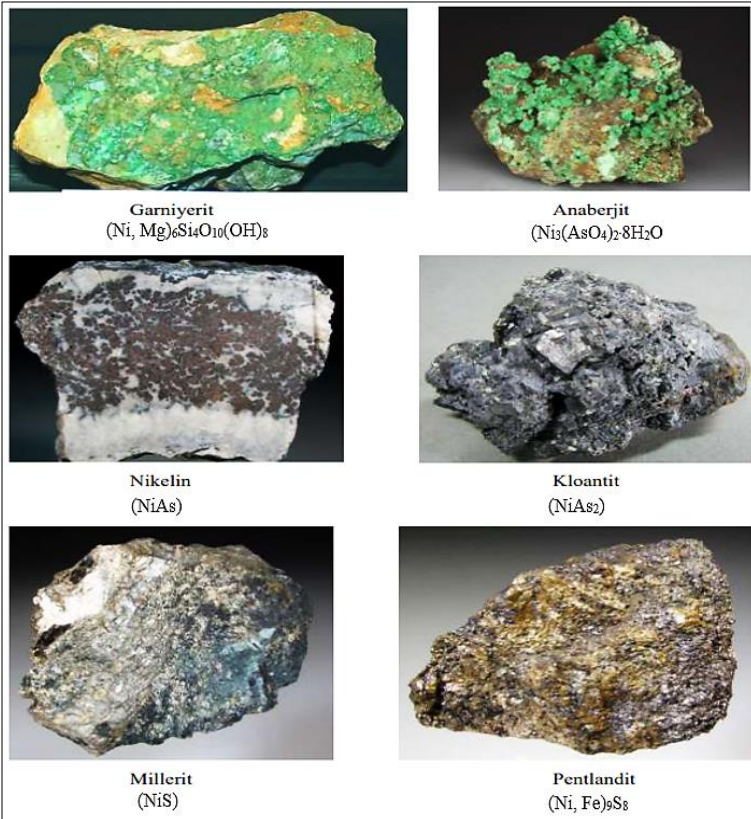
DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10034944>

¹Çukurova Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı, Adana, Türkiye.
zhraltincelep@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0553-0102

²Çukurova Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye. obayat@cu.edu.tr,
bayat196448@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2330-3074

GİRİŞ

Nikel, yer kabuğunun sadece %0.008'ini oluşturur. İlk defa İsveçli kimyager Axel Fredrik Cronstedt tarafından 1751 yılında keşfedilmiştir (Murat, 2007). Nikelin 19. yüzyılda kullanım alanı bulunmaya başlanmış ve endüstriyel önemi ise 20. yüzyılın başlarında artmıştır. Nikel, çeşitli alaşımlarda kullanılan dayanıklı bir metaldir. Özellikle paslanmaz çelik üretiminde ve kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. Nikel kaplamalar; elektrik endüstrisinde ve dekoratif amaçlı olarak kullanım yeri bulmaktadır. Günümüzde oksitlenme direnci sayesinde alaşımların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu gibi özellikleri nikelin ticari değerini her geçen gün arttırmaktadır. Nikel minerallerinin en önemlileri Şekil 1'de gösterilmiştir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2018).



Şekil 1: Nikel mineralleri (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2018)

Nikel endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan mineraller garniyerit, anaberjit, nikelin, kloantit, millerit ve pentlandittir.

Garniyerit, nikel içeriği yüksek olan ve genellikle sıcak ve nemli iklim bölgelerinde oluşan bir nikel-magnezyum-silikat hidroksit mineralidir. Nikel

endüstrisinde büyük öneme sahip olan bu mineral, lateritik nikel cevherlerinin ana bileşenlerinden biridir (Talovina ve ark., 2008). Maden yatağı olarak oluşumu genellikle lateritik topraklarda veya saprolitik kayaların aşınması ve kimyasal ayrışması sonucu gerçekleşir. Nikel içeriği yüksek olan bu cevher tipi zengin nikel yatak tabakaları şeklinde bulunabilir (Dang ve ark., 2020). Garniyerit, çeşitli minerallerin bir karışımını içerir. Temel olarak serpantin, olivin ve piroksen minerallerinden oluşur. Nikel içeriği, bu minerallerin kombinasyonundan kaynaklanır ve nikel endüstrisi için değerli bir nikel cevheri kaynağı olarak nitelendirilir (Benavent ve ark., 2011). Ayrıca garniyerit cevherlerinin ekonomik açıdan önemi, nikelin talep edilen endüstriyel metal olması ve cevherlerin içerdikleri yüksek nikel içeriği sayesinde yüksektir. Nikel endüstrisi için değerli bir kaynak olan garniyerit, nikel çıkarımı ve işlenmesinde büyük ölçüde değerlendirilmektedir (Nickel ve Bridge, 1975).

Anaberjit, kobalt ve nikel içeren birincil minerallerin oksitlenme yüzeylerinde ikincil olarak oluşur (Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, 2012). Ayrıca dekoratif taş olarak kullanılabilir bir mineral olarak da kabul edilir (Shushkov ve ark., 2011). Bazalt ve ultramafik kayaçların alterasyon ürünleri olarak ortaya çıkan bu mineral, çoğunlukla lateritik ortamlarda bulunan oksitlenmiş cevher yataklarında ve lateritik topraklarda gözlenir (Sevigny, 1988).

Nikelin, genellikle masif haldedir (Tracey, 1992). Metalik parlaklığa sahiptir. Diğer nikel sülfürler, kalkopirit ve pirotinin yanı sıra gümüş ve kobalt mineralleri ile masif ya da saçınımlı halde bulunur (Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, 2012). Alterasyon ile kolayca anaberjite dönüşebilmektedir (Canterford, 1975).

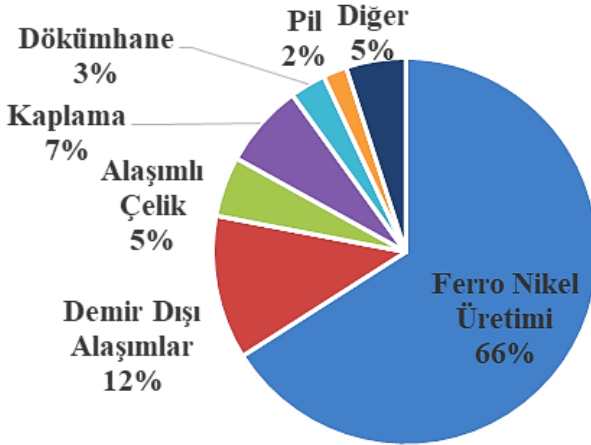
Kloantit, karbonatlı gang içinde mezotermal Co, Ni, Ag, Bi, yataklarında bulunur (Aslaner, 1979). Skutterudit grubundan, beyaz veya gri renkli, metalik parlaklıkta, izomerik kristaller olarak bulunan bir mineraldir. Rengi kalay beyazından çelik grisine değişkendir (Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, 2012).

Millerit, Wilhelm Haidinger tarafından 1845 yılında Galler'deki kömür madenlerinde keşfedilmiştir. Adını İngiliz mineralog William Hallowses Miller'den almıştır ve mineralin en yaygın kaynağı ABD'deki Kentucky, Lincoln County'deki Halls Gap bölgesindedir. Millerit, serpantin ultramafikleri içinde pentlanditin yerini alan yaygın bir metamorfik mineraldir. Bu şekilde metamorfizma veya metasomatizm sırasında pentlandit veya diğer nikelli sülfür minerallerinden kükürdün uzaklaştırılmasıyla oluşur. Millerit, yeterli konsantrasyonda bulunduğu, çok önemli bir nikel cevheridir çünkü bir sülfür minerali olarak kütlesi nedeniyle pentlanditten daha yüksek oranda nikel içerir (Wikipedia, 2023a). Genellikle sülfür bakımından zengin kireçtaşı ve dolomitteki boşluklarda yayılan iğne kristal kümeleri

olarak bulunur. Ayrıca karbonlu kondritler gibi nikel-demir göktaşlarında da bulunur (Geiger ve Bischoff, 1995).

Pentlandit, ultramafik kayalarda bol miktarda bulunur ve bu da onu madencilik açısından en önemli nikel kaynaklarından birisi yapmaktadır (Kerfoot, 2005). Pentlandit adını, Ontario Sudbury’de minerali ilk kez fark eden İrlandalı bilim adamı Joseph Barclay Pentland’dan (1797-1873) almıştır (Wikipedia, 2023b). Pentlandit, pirinç sarımsı renkte ve metalik bir parlaklığa sahip olduğu için diğer sülfid mineralleri ile sıklıkla karıştırılır. Pentlanditi ayırt etmenin en iyi yolu, daha soluk rengi ve açık kahverengimsi bronz çizgisidir (Pentlandite, b.t.). Buna karşılık, pirit, pirotit ve kalkopirit sırasıyla kahverengimsi siyah, grimsi siyah, yeşilimsi siyah gibi çok daha koyu çizgiler göstermektedir (Pyrite, b.t.; Pyrrhotite, b.t.; Chalcopyrite, b.t.). Yansıtılmış ışık cevheri mikroskobu kullanılarak bakıldığında, oktahedral bölünme ve öz-şekilli ile oktahedral kristallerde oluşan pembemsi ile kahverengimsi menekşe sülfid minerali olan bravoit (Ni’li pirit) dönüşümü gibi temel teşhis özelliklerine sahiptir. Pentlandit genellikle diğer sülfid mineralleri (esas olarak pirotit) içinde granüler kapanımlar olarak gelişir ve genellikle ince damarlar veya “alevler” şeklini alır. Pentlandit opak bir mineral olmasına rağmen, güçlü bir hafif kremsi yansıma sergiler (Spry ve Gedlinske, 1987). Pentlandit, bravoit, kalkopirit, kübanit, millerit ve pirotit gibi sülfid minerallerinin yanı sıra kromit, ilmenit, manyetit ve sperrilit gibi diğer minerallerin yanında bulunur (Tutkimuskeskus, 1986; Bernhard, 2008).

Nikel yataklarının oluşumu, bu değerli metalin çıkarılması ve işlenmesi için önemli bir kaynak sağlar. Şekil 2’de nikelin kullanım alanlarına göre dağılımı verilmektedir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2018).



Şekil 2: Nikelin yaygın olarak kullanıldığı alanlar (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2018)

1. OLUŞUM VE ÖZELLİKLER

Nikel, iki tür maden yatağından elde edilir. İlk olarak, limonit ve garniyerit gibi temel minerallerin bulunduğu lateritik yataklardan, ikincil olarak ise pentlandit mineralinin ana bileşeni olduğu magmatik sülfür yataklarından elde edilir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2018)

1.1. Nikel Yataklarının Oluşumu

Nikel yatakları, nikelin doğal olarak oluştuğu yer altı kaynaklarıdır ve yerkürede birçok farklı yerde bulunabilen bir metaldir. Nikel maden yatakları genellikle sülfür veya laterit mineralleri içinde bulunur (Butt ve Cluzel, 2013).

Sülfür mineralleri içeren nikel yatakları, genellikle yer kabuğunda yer alan magmatik süreçler sonucunda oluşur. Bu tür yataklar, magmanın içerisinde bulunan nikelin zenginleşerek yoğunlaşmasıyla oluşur. Magmanın soğuması ve katılaşmasıyla birlikte, nikel sülfür mineralleri de çökelir ve yavaş yavaş birikir. Bu süreç, milyonlarca yıl sürer ve nikel yataklarının oluşumu için gerekli olan uzun bir süreçtir (Meshram ve ark., 2018).

Laterit mineralleri (Fe, Mg ve Al'ca zengin kayaların, sıcak ve nemli iklimlerde ayrışması ile ortaya çıkan kırmızı renkli, toprağımsı görünümlü, az-çok silisli, demir ve alüminyum hidroksitler ve kil mineralleri içeren oluşumlar) içeren nikel yatakları ise daha farklı bir oluşum sürecine sahiptir. Lateritler, tropikal bölgelerde yaygın olarak bulunmakta ve nikel içeren mineraller de lateritlerin içindeki kil, oksit ve hidroksit mineralleri şeklindedir. Bu tür yataklar, yoğun yağış ve sıcak iklim koşulları altında uzun süreli kimyasal ayrışma ve erozyon süreçleri sonucunda oluşur. Bu süreçte, nikel mineralleri yer altından yer üstüne taşınır ve laterit topraklarında birikime uğrarlar (Thorne ve ark., 2012).

Nikel yatakları genellikle yer kabuğunun derinliklerinde bulunur ve madencilik faaliyetleriyle çıkarılır. Maden yataklarının büyüklüğü (rezerv), kalitesi (tenör, metal değeri) ve erişilebilirliği büyük ölçüde bulunduğu coğrafik bölgeye bağlıdır. Bazı bölgelerde büyük ve zengin nikel yatakları bulunur iken diğer bölgelerde ise daha küçük ve düşük kalitede yataklar bulunabilir (Cornwall, 1966).

1.2. Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

Nikel, kimyasal sembolü Ni ve atom atom numarası 28 olan bir geçiş metalidir (Vikipedi, 2023). Hem fiziksel hem de kimyasal açıdan bir dizi özelliğe sahiptir. Nikelin önemli fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıda verilmiştir.

Fiziksel özellikler;

- 8.91 gram/cm³ yoğunluğa sahiptir. Bu, nikelin katı bir şekilde oldukça yoğun olduğunu gösterir (Zayakin ve Renev, 2019).

- 1.455°C (2.651°F) ergime noktasına ve 2.913°C (5.275°F) kaynama noktasına sahiptir. Bu yüksek sıcaklık değerleri, nikelin yüksek sıcaklıkta

istikrarlı bir şekilde var olabilen bir metal olduğunu gösterir (Zaitsev ve Zaitseva, 2002).

- Saf nikel, gümüş beyazı bir renge sahiptir. Bu özellik, nikelin görünümünü tanımlar (Goswami, 2023).

- Nikel, manyetik özelliklere sahiptir. Bu, nikelin mıknatıslanabilme yeteneği olduğunu gösterir (Mohamed ve ark., 2017).

- Nikel, dövülebilir ve çekilebilir bir metaldir. Bu, nikelin şekil verilebilme kabiliyeti olduğunu gösterir. Bu özellik, nikelin farklı şekillerde kullanılabilmesini sağlar (Zhao, 2008).

Kimyasal özellikler;

- Nikel, genellikle +2 ve +3 oksidasyon durumlarıyla bulunur. Bununla birlikte, diğer oksidasyon durumları da mümkündür (Haugrud, 2003).

- Nikel, korozyona karşı oldukça dayanıklı bir metaldir. Bu özellik, nikelin çeşitli ortamlarda paslanmaya ve oksitlenmeye karşı direnç gösterdiğini gösterir (Cruz ve ark., 2019).

- Nikel, çeşitli kimyasal bileşiklerle tepkimeye girebilir. Örneğin, asitlerle tepkimeye girerek hidrojen gazı üretebilir (Cao ve ark., 2014).

- Nikel, elektrik ve ısıyı iyi bir şekilde iletebilen bir metaldir. Bu, nikelin elektriksel ve termal iletkenlik özelliklerine sahip olduğunu gösterir (Jaramillo, 2013).

- Nikel, birçok farklı metal ile alaşım yapabilen bir metaldir. Nikel alaşımları, çeşitli özelliklere sahip olabilir ve endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir (Al-Azzawi, 2015).

Nikelin bu fiziksel ve kimyasal özelliklerinden faydalanarak birçok endüstriyel sektörde kullanım imkânı bulmuştur. Özellikle metalürjide, kimya endüstrisinde, elektronik uygulamalarda, mühendislik malzemelerinde ve pil üretiminde yaygın olarak kullanılan bir metaldir (Züttel ve ark., 1994).

2. YAPI SEKTÖRÜNDEKİ UYGULAMA ALANLARI

Nikel, yapı sektöründe çeşitli uygulama alanlarına sahip olan bir malzemedir. Genellikle alaşımların üretiminde ve çeşitli yapı malzemelerinin imalatında kullanılır. Nikel, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır ve mekanik özelliklerini genellikle yüksek sıcaklık ortamlarında korur. Bu nedenle, paslanmaz çeliklerde nikel kullanımı, yüksek sıcaklık uygulamalarında önemli bir faktördür. Nikel, çelik alaşımlarına mukavemet ve sertlik kazandırır. Bu özellikler, paslanmaz çeliklerin yapısal ve mekanik uygulamalarda kullanılmasını sağlamaktadır.

Bu bölümde özellikle nikelin yapı sektöründe paslanmaz çelik sanayisinde hangi amaçla kullanıldığına değinilmiştir. Farklı özelliklere sahip alaşımlar elde etmek için paslanmaz çeliğe çeşitli elementler eklenir. Her bir alaşımın kendine özgü özellikleri ve kullanım alanları vardır.

Nikel, çeliklerde kromla birlikte en yaygın kullanılan alaşım elementidir ve paslanmaya karşı daha dirençli bir yapı oluşturmasını sağlar

(Karaca Paslanmaz, 2022). Bu özellik, nikel içeren paslanmaz çeliklerin çeşitli ortamlarda (su, asitler, tuzlu çözeltiler vb.) uzun süreli kullanımına imkân sağlar. Nikel, çelik üretimi sırasında ilave edilir ve çeliklerde genellikle %37'ye kadar oranlarda kullanılabilir (Krauss, 1990).

Nikel içeren paslanmaz çelikler, kaynak yapılabirlik açısından da iyi özellik göstermektedir. Nikel, çeliğin kaynak bölgesindeki deformasyon ve çatlak oluşumunu azaltarak kaynak performansını artırır. Bu özellikler, nikelin paslanmaz çelik endüstrisinde önemli bir bileşen olarak kabul edilmesini sağlar. Nikel içeren paslanmaz çelikler, dayanıklılık, korozyona karşı direnç, yüksek sıcaklık uygulamaları ve kaynak performansı gibi bir dizi gereksinimi karşılamak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

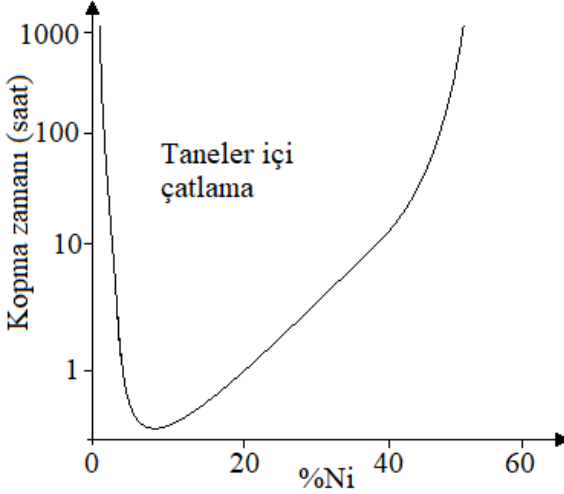
Paslanmaz çelik türleri, kullanım alanlarına göre beş ana gruba ayrılır. Bunlar; ferritik, martenzitik, östenitik, çift fazlı (ferritik-ostenitik) ve çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliklerdir (Karaca Paslanmaz, 2022). Bu beş ana paslanmaz çelik türü, farklı uygulama gereksinimlerini karşılamak için çeşitli özelliklere sahiptir.

Östenitik paslanmaz çelikler, yüksek krom (%25-30) ve nikel (%8-15) içeriğine sahiptir. Bu çelikler, biçimlendirme, mekanik özellikler ve korozyon dayanımı açısından avantajlıdır. Östenitik çelikler manyetik değildir. Soğuk şekillendirme ile mekanik dayanımları artırılabilir. Bu çelikler, paslanmaz çelik üretiminin büyük bir bölümünü oluşturur ve geniş bir kullanım yelpazesine sahiptirler. Bunlar arasında mutfak eşyaları, yapısal uygulamalar, otomotiv endüstrisi, enerji sektörü, kimya ve ilaç endüstrisi gibi birçok sektör bulunmaktadır. Gerilmeli korozyon östenitik paslanmaz çeliklerde yüksek sıcaklıklarda C'li çözeltilerde meydana gelir ve taneler arası çatlak oluşumuna yol açar. Gerilmeli korozyon çatlama genel olarak nikel içeriğiyle ilişkilidir. Düşük nikel içeriğine sahip çeliklerde gerilmeli korozyon çatlama meydana gelebilir, ancak %30'dan fazla nikel içeriği korozyon direncini artırır (Kanışıkdemir, 1996). Şekil 3'te demir-krom-nikel paslanmaz çeliklerdeki nikel içeriğinin gerilmeli korozyon direncine etkisi görülmektedir.

Ferritik paslanmaz çelikler, düşük karbon (%0.2'ye kadar) ve yüksek krom (%11.5-30.5) içeriğine sahiptir (Matejka ve Kroth, 1975). Bu çelikler genellikle iyi bir korozyon direnci göstermekte ve aynı zamanda ısıya karşı yüksek mukavemetli olabilmektedir (Demo ve Alloys, 1977). Ferritik paslanmaz çelikler, mutfak eşyaları, dekoratif uygulamalar, sıcak su tankları, otomotiv parçaları ve egzoz elemanları gibi birçok alanda kullanılır (Thulukkanam, 2013).

Martenzitik paslanmaz çelikler, yüksek karbon (%1.2'ye kadar C), krom (%11-18 Cr) ve düşük miktarda Mn (mangan) ve Ni (nikel) içeriğine sahiptir (Tersane, 2008). Bu çelikler yüksek mukavemet ve sertlik göstermekte ancak aynı zamanda kırılma eğilimleri de yüksektir. Tavlanmış veya ısı işlem görmüş olarak piyasaya sunulur. Orta düzeyde korozyona karşı dayanıklılığa sahip olmakta ve ısı işlemlere tabi

tutulabilirler. Manyetik özellik gösterirler. Bıçaklar, ameliyat aletleri, miller ve pimler gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Borşen, 2023).



Şekil 3: Fe-Cr-Ni paslanmaz çeliklerdeki nikel içeriğinin %42'lik MgCl₂ çözeltisinde gerilmeli korozyon direncine etkisi (Al ve Kılıç, 2013)

Çift fazlı paslanmaz çelikler, hem ferritik hem de östenitik fazlara sahiptir (Al ve Kılıç, 2013). Bu çelikler, yüksek mukavemet ve korozyona karşı direnç sağlama özellikleri gösterir (Nakao ve ark., 2002). Yüksek oranda krom (%21-25) ve orta miktarda nikel (%5-7) içerir (Al ve Kılıç, 2013). Profesyonel kaynak işlemlerinde yaygın kullanım yapma imkânı sunarlar. Çift fazlı paslanmaz çelikler ise kimyasal aparat imalatı, denizcilik ve off-shore teknolojisi, enerji sektörü, gıda işleme endüstrisi gibi birçok alanda kullanılır (Karaca Paslanmaz, 2022).

Çökelme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliklerde titanyum, alüminyum, niyobyum ve bakır gibi elementler ile alaşım yapılır (Batı paslanmaz, 2022). Genellikle çözelti halinde ve yumuşak bir şekilde satılır (Karaca Paslanmaz, 2022). Bu tür çelikler genellikle havacılık, uzay endüstrisi ve yüksek performanslı otomotiv uygulamaları gibi alanlarda kullanılır (Birçelik, 2015).

3. DÜNYA FAALİYETLERİ

3.1. Nikel Üretimi

USGS (Amerikan Jeoloji Araştırmaları Kurumu) verilerine göre, dünya genelindeki nikel rezervi yaklaşık olarak 89 milyon ton-metal olarak tahmin edilmektedir. Bu rezervlerin yaklaşık %40'ı sülfürlü yataklarda ve %60'ı ise lateritik yataklarda bulunmaktadır. Bilinen en önemli nikel yatakları Avustralya, Brezilya, Rusya, Küba, Filipinler ve Endonezya'da yer almaktadır. Tablo 1'de nikel rezervlerinin dağılımını göstermektedir (U.S.

Geological Survey, 2020). Türkiye'nin nikel kaynakları, dünya nikel rezervinin yaklaşık %1.35'ini oluşturmaktadır (İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, 2021). Bu oran, Türkiye'nin nikel kaynaklarının yeterli olarak kabul edilebileceği anlamına gelir. Türkiye'nin nikel rezervleri, ülkenin madencilik sektöründe önemli bir varlık olduğunu göstermektedir.

Tablo 1: Dünya nikel rezervleri ve dağılımları. (U.S. Geological Survey, 2020)

Ülke	Rezerv (Mton)	Pay (%)
Endonezya	21.0	23.60
Avustralya	20.0	22.47
Brezilya	11.0	12.36
Rusya	6.9	7.75
Küba	5.5	6.18
Filipinler	4.8	5.39
Çin	2.8	3.15
Kanada	2.6	2.92
Türkiye	1.2	1.35
Diğer	13.1	14.72
Toplam	89.00	100.00

Nikel yatakları, bakır-nikel sülfür cevheri ve nikel oksit cevheri olarak iki farklı formda bulunur. Her rezervin oluşum süreçleri, içerdiği mineral miktarı ve mineral yapısı farklıdır. Bu nedenle, bu rezervlerdeki nikelin zenginleştirilmesi için gereken işlem süreçleri de farklılık gösterir (Cornwall, 1966).

Bakır-nikel sülfürlü cevherlerin zenginleştirilmesi için en yaygın kullanılan yöntem flotasyondur (Bulatovic, 2010). Bu yöntemde, cevher öğütülerek ve ardından özel kimyasal reaktifler kullanılarak nikel içeren sülfür mineralleri, diğer cevher bileşenlerinden ayrılır ve zenginleştirilir. Diğer yandan, yerçekimi yöntemleri, sülfürlü cevherlerin zenginleştirilmesinde de kullanılabilir de, bu yöntemlerin yaygın olarak tercih edildiği söylenemez (Keays ve Kirkland, 1972). Yerçekimi yöntemleri, cevherdeki yoğunluk farklarına dayanarak mineralleri ayırmak için kullanılır. Ancak, bakır-nikel sülfürlü cevherlerin çoğunlukla sülfür minerallerinden oluşması ve yoğunluk farklarının yeterince belirgin olmaması nedeniyle, yerçekimi yöntemleri genellikle etkili bir zenginleştirme yöntemi olarak kabul edilmemektedir (Kirjavainen ve Heiskanen, 2007).

Tenörü yüksek nikel konsantrasyonu elde etmek için sülfürlü nikel cevherlerine manyetik ayırma yöntemi uygulanabilir. Bu yöntemde, konsantrinin içerdiği pirotin mineralinin manyetik özelliğinden faydalanarak petlandit ve kalkopirit gibi sülfür minerallerinden ayrılma imkânı vardır.

%0.3-0.5 Ni tenörlü sülfürlü nikel cevherlerinin ön zenginleştirme ile tenörleri %12 Ni'e kadar çıkartılabilmektedir. Pirotin dışındaki

cevherlerin zenginleştirilmesinde flotasyon yöntemi uygulanabilmektedir.... Bakır-nikel sülfürlü cevherlerinin flotasyonunda bakır sülfür mineralleri için kullanılan toplayıcı ve köpük yapıcılar kullanılmaktadır. Flotasyon sürecini flotasyon sonunda hedeflenen konsantrenin içeriği belirlemektedir. Örneğin flotasyon sonrası metalürjik işlem sürecinde bakır konsantresi içindeki nikelin kazanılması daha zor ve nikel kayıpları daha yüksek olduğundan, nikel konsantresinde bakırın istenip istenmemesine göre flotasyon süreci değişmektedir. Konsantrede Cu istenmemesi durumunda flotasyon süreci Ni üzerine kurulmakta, Cu da atık olarak ayrılarak tenörüne göre gerektiğinde ayrı bir süreçle kazanılmaktadır. Bakır-nikel sülfürlü cevherlerin flotasyonunda cevherin nikel içeriği bakırdan yüksekse seçimli flotasyonla öncelikle nikelin kazanılması amaçlanmaktadır. Flotasyon sonunda üretilen konsantre düşük tenörde bakır da içermektedir. Bu konsantreden metalürjik işlem sonrası yüksek nikel içerikli metal üretilmektedir. Kaba flotasyondan nikel-bakır karışımı konsantresi üretildiğinde, bu konsantrenin metalürjik işlem öncesi nikel oranının flotasyonla yükseltilmesinde yarar vardır. Seçimli bakır flotasyonunda önce bakır yüzdürülerek alınmaktadır. Flotasyondan alınan ara ürün ve atık tekrar işlenip içerdikleri nikel kazanılmaktadır (Yıldız, 2014, s. 1324).

Sonuç olarak, bakır-nikel sülfürlü cevherlerin zenginleştirilmesi için manyetik ayırma ve flotasyon gibi çeşitli yöntemler kullanılarak, nikel içeriği yüksek konsantreler elde edilebilir ve metalürjik işlem süreçleriyle yüksek nikel içerikli metal üretilir. Bu süreçlerde bakır ve nikel mineralleri ayrıştırılarak, tenörü yüksek nikel konsantreleri oluşturulur.

Nikelin ana kaynaklarından biri olan sülfürlü minerallerin rezervlerinin azalmasıyla birlikte lateritik cevherler de işletilmeye başlanmıştır. Günümüzde, nikelin büyük bir kısmı sülfürlü minerallerden elde edilmekle birlikte, bu rezervlerin sınırlı olması ve ekonomik olarak çıkarılmasının zorluğu, lateritik cevherlerin önemini artırmıştır ve nikelin elde edilmesinde alternatif bir kaynak olarak önem kazanmasına neden olmuştur. Gelecekte, teknolojiye gelişmeler ve artan talep, lateritik cevherlerin daha etkin ve verimli bir şekilde işlenmesine yönelik çalışmalara odaklanabilir ve nikel tedarikini çeşitlendirebilir (Qing-xi, 2005).

Sülfürlü nikel yataklarında, cevherin serbestleşme boyutuna ulaşması için öğütülmesinden sonra flotasyon veya cevherin yapısına bağlı olarak manyetik ayırma yöntemleri ile nikel zenginleştirilmesi mümkündür. Öte yandan, lateritik nikel yataklarında nikel oksit cevherlerine sahip olduğundan, hidrometalürjik veya pirometalürjik yöntemlerin uygulanması gerekmektedir (Farrokhpay ve ark., 2019; Ozaki ve ark., 2014).

Pirometalürjik prosesler, nikelin fiziksel işlemler ve yüksek sıcaklıklar kullanılarak zenginleştirilmesini sağlar. Bu prosesler arasında ferro-nikel

üretimi ve mat ergitme gibi yöntemler yer almaktadır. Genel olarak, bu proseslerde maden ocağından çıkarılmış olan tüvanan (ham) cevherler kurutulur, elektrik fırınlarında ergitme işlemi yapılır ve kalsinasyon/indirgeme işlemleri uygulanır. Hidrometalurjik proseslerde ise kimyasal reaktifler (çözücü, asit-baz) ve sulu çözeltiler kullanılarak nikelin zenginleştirilmesini sağlar. Bu prosesler arasında Caron prosesi ve HPAL (High-Pressure Acid Leach) prosesi bulunur (Göktaş, 2007).

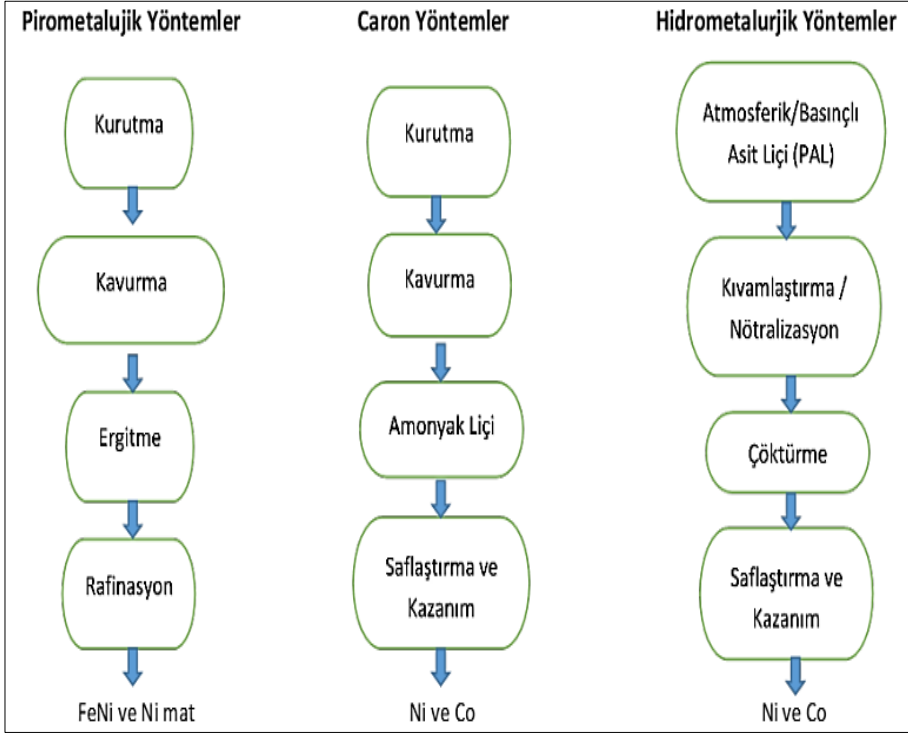
Caron prosesi, nikel içeren cevherin çözünmesi ve nikelin çözeltiden geri kazanılması adımlarını içerir (Dreisinger ve Clucas, 2013). HPAL prosesi ise yüksek basınçlı asidik çözeltiler kullanarak nikelin çözünmesini ve ayrıştırılmasını sağlar (Chang ve ark., 2016). Her iki prosesin de avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Pirometalurjik prosesler genellikle yüksek maliyetli ve çevresel etkileri daha fazla olabilir iken hidrometalurjik prosesler daha düşük maliyetli ve çevre dostu olabilir (Sharuddin ve ark., 2016; Cheng ve Pan, 2018). Seçilen zenginleştirme yöntemi; nikel cevherinin mineralojik/kimyasal bileşimi, uygulanacak madencilik koşulları, coğrafi bölge koşulları ve özellikle ekonomik faktörler (satış fiyatı, arz/talep vs.) gibi birçok faktöre bağlı olarak belirlenir.

Lateritik cevherlerinden nikel elde edilmesinde uygulanan yöntemler Şekil 4'te kısaca verilmiştir. Dünya genelinde hidrometalurjik prosesler, pirometalurjik proseslere göre daha ekonomik olduğu için nikel içeriği düşük lateritik yatakların zenginleştirilmesinde tercih edilmektedir. Pirometalurjik ve Caron yöntemlerinde ise cevherin kurutulması ve kavrulması gibi aşamalar yüksek maliyetlere yol açmaktadır (Eroğlu, 2018).

Nikel zenginleştirme süreçleri, cevherin madensel bileşimine ve nikel içeriğine göre seçilerek, etkin ve verimli bir şekilde nikelin elde edilmesini sağlar. Teknolojideki sürekli ilerlemeler, nikel zenginleştirme yöntemlerinin verimliliğini artırmak ve çevresel etkilerini minimize etmek için çeşitli yeni yaklaşımların geliştirilmesine olanak tanır. Bu temel prensipler doğrultusunda, yeni nikel kazanım yöntemleri geliştirilmiştir.

Atmosfer basıncında sülfürik asitle sülfonat şeklinde özütleme yönteminde derişimi yüksek sülfürik asidin öğütme öncesi cevhere ilave edilmektedir. Derişik sülfürik asit ve ortama verilen buhar cevherin içerdiği Ni ve Co'ı sülfanata dönüştürmektedir. Özütlemeye ortama buhar ile SO₂ gazı da verilerek nikel ve kobaltın daha iyi çözülmesi, kireçtaşı ilavesi ile de demirin geotit olarak çökmesi sağlanmaktadır. Daha sonra ters akışlı koyulaştırıcılarda pülp katı-sıvı olarak ayrılmaktadır. Koyulaştırıcıdan Ni ve Co yüklü çözelti içinde taşan olarak alınarak sonraki aşamalarda çöktürülüp kazanılmaktadır (Yıldız, 2014).



Şekil 4: Lateritik cevherlerinden nikel elde edilmesinde uygulanan yöntemler (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2018).

Hidroklorik asitle özütleme yöntemi ise değişik şekillerde uygulanabilmektedir. Bunlar;

- Jaguar atmosferde klorit özütleme süreci,
- Intec laterit süreci, ARNI yöntemi.

Jagura ve Intec süreci birbirine benzemektedir. İki yöntem arasındaki farklılık Intec sürecinde sülfürik asit kullanılarak süreçte gerekli olan HCl'in üretilmesi ile $MgCl_2$ yerine daha ucuz olduğu için $CaCl_2$ kullanılmasıdır. Süreçte $150^{\circ}C-180^{\circ}C$ sıcaklıkta 2 saatte $>95\%$ metal kazanımıyla Ni ve Co elde edilebilmektedir. Jagura yönteminde özütleme için pülpe HCl ve CaCl, ilave edilmektedir. Yöntemde gerekli olan HCl, $CaCl_2$ eriyiği içine H_2SO_4 , ilavesi ile yan ürün olarak üretilmektedir. ARNI yöntemin esası ise atmosfer basıncı altına HCl ile özütlemeye dayanmaktadır. Yöntem için gerekli asit süreç içinde kazanılmaktadır (Yıldız, 2014).

Oksitli cevherlerin bakteri özütlemesinde, Ni başta Cu içeren diğer bazı minerallerin bakteri özütleme sürecinde yan ürün olarak kazanılmaktadır. Yöntemde mikro organizmalar tarafından üretilen organik asitlerle cevherdeki Ni ve Co başta olmak üzere diğer metaller çözündürülerek eriyiğe alınmaktadır (Yıldız, 2014).

Activox yöntemiyle metal kazanımı yönteminde ise %50 katı içeren Ni ve Co konsantresi ile Cu çözeltisinin artıkları $d_{80}=10 \mu\text{m}$ tane boyutuna öğütülmektedir.

Öğütülmüş konsantre 105°C sıcaklık ve 10 bar basınç altında otoklavlarda sülfürik asitle özütlenmektedir. Özütleme sonrası Cu, Co ve Ni sülfat eriyiği oluşmaktadır. Otoklavdan çıkan pülp (bulamaç) ters akışlı koyulaştırıcıda katı ve sıvıya ayrılmakta ve daha sonra ise alt akımı yıkanarak içerdiği elementlerin kazanımı için konsantre tesisine gönderilmektedir. Koyulaştırıcıdan taşan yüklü çözeltinin içerdiği Cu'nun alınması için organik solvent ilave edilerek Cu soğurulmaktadır. Çözeltiden sıyrılan Cu elektroliz yöntemiyle kazanılmaktadır. Yüksüz eriyiğin bir kısmı otoklava bir kısmı da öğütme devresine gönderilmektedir. Fe, Co ve Ni yüklü çözelti içindeki Fe kireçtaşı ilave edilerek iki kademeli çöktürme ile ortamdan alınmaktadır. Fe'si temizlenmiş Co ve Ni yüklü çözeltiye fosfenik esaslı organik solvent ilave edilerek Co da çözeltiden alınmaktadır. Co asitle sıyrılıp filtrelenmekte, filtrelenmiş Co yüklü çözelti çöktürme tanklarına gönderilmektedir. pH amonyak ile ayarlanırken ilave edilen soda külü ile Co karbonat şeklinde çöktürülmektedir. Ni kazanım devresinde de pH kontrolü amonyak ile sağlanmaktadır. Co da alınmış eriyiğe yeniden karboksilik asit esaslı organik solvent ilave edilerek nikelin de soğurulması sağlanmaktadır. Bu aşamada Ca ve Mg çözeltide kalmaktadır. Organik solvent tarafından soğurulmuş Ni elektroliz devresindeki yükü alınmış elektrolit tarafından sıyrılmaktadır. Daha sonra da elektroliz yöntemiyle Ni kazanılmaktadır (Yıldız, 2014, s. 1347).

3.2. Geri Dönüşümle Nikel Üretimi

Nikel geri dönüşümü, hurda nikel malzemelerin toplanması, ayrıştırılması ve saflaştırılması sürecini içermektedir. Bu süreçte hurda nikel ürünler, pirometalurjik veya hidrometalurjik yöntemlerle işlenir. Hurda nikel, alaşım üretiminde, nikel kaplama endüstrisinde, pil ve batarya üretiminde, kimyasal katalizörlerde ve diğer birçok uygulamada kullanılmak üzere geri kazanılır (Crundwell ve ark., 2011a). Nikel geri dönüşümü, doğal nikel kaynaklarının korunmasına ve yeniden kullanıma olanak sağlayarak çevresel sürdürülebilirliği destekler. Aynı zamanda, enerji ve kaynak tüketimini azaltarak ekonomik avantajlar sunar. Nikel geri dönüşümü, sürdürülebilir bir metal tedariki sağlamak için önemli bir yöntemdir ve nikel endüstrisinin büyümesine katkıda bulunur (Yang ve ark., 2011).

3.3. Nikel Madeninin İşlenmesi ve Rafine Edilmesi

Nikelin rafine edilmesi, nikel cevherlerinin içerdikleri safsızlıklardan arındırılarak nikel metalinin elde edilmesi sürecidir. Nikel içeren cevherler madenden çıkarılır ve boyutları azaltılarak daha işlenebilir hale getirilir.

Cevherin fiziksel ve kimyasal özelliklerini incelemek için laboratuvar analizleri yapılır. Cevher, metalik nikel içeren nikel oksitlere dönüştürülür. Bu işlem genellikle pirometalurjik yöntemlerle gerçekleştirilir. Yüksek sıcaklıklarda oksijenle tepkimeye girerek nikel oksitler elde edilir (Burkin, 1987). Nikel oksitler, genellikle sülfürik asit veya nitrik asit gibi çeşitli kimyasal çözelti ve reaktiflerle tepkimeye sokulur. Bu işlem, nikelin metal formuna dönüşümünü kolaylaştırır ve diğer safsızlıkları çözelti içinde bırakır (Bhuntumkomol ve ark., 1982). Elde edilen çözelti, elektroliz yöntemiyle elektrotlara uygulanır. Bu süreçte nikel iyonları elektrotlara indirgenir ve nikel metal çökeltisi oluşturulur (Crundwell ve ark., 2011b). Elde edilen nikel metal, istenilen saflık düzeyine ulaşana kadar rafine edilir. Bu aşamada, diğer safsızlıklar (örneğin kobalt, bakır, demir) giderilir ve nikelin saflığı artırılır (Moskalyk ve Alfantazi, 2002). Elde edilen yüksek saflıkta nikel metal, döküm ve diğer işleme yöntemleriyle uygun şekillerde form verilir. Bu şekilde nikel metali endüstriyel uygulamalar için kullanıma hazır hale getirilmektedir (Lewis, 1975).

3.4. Türkiye’de Nikel Yataklarının Durumu

Türkiye’deki nikel yatakları başlıca aşağıdaki coğrafik bölgelerde bulunmaktadır. Bunlar;

- Manisa-Turgutlu-Çaldağ: Manisa ilinin Turgutlu ilçesinde bulunan Çaldağ bölgesi, Türkiye'nin önemli nikel yataklarından birisidir.
- Manisa-Gördes: Manisa ilinin Gördes ilçesinde de nikel yatakları bulunmaktadır.
- Eskişehir-Mihalıççık-Yunus Emre: Eskişehir ilinin Mihalıççık ilçesi ve Yunus Emre bölgesinde de nikel yatakları mevcuttur.

Ayrıca, Uşak-Banaz, Bitlis-Pancarlı, Bursa-Orhaneli-Yapköydere, Sivas-Divriği-Gümüş, Bolu-Mudurnu-Akçaalan ve Hatay-Payas-Dörtüol bölgelerinde de çeşitli nikel yatakları bulunmaktadır (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2018). Türkiye’de bulunan nikel yatakları ve cevher tipleri Tablo 2’de sunulmuştur.

Türkiye’nin toplam nikel cevher rezervi yaklaşık 40 milyon ton olup, bu rezervin yaklaşık 30 milyon tonu Manisa-Çaldağ maden sahasında bulunmaktadır (Şekil 5). Çaldağ Nikel A.Ş. tarafından açık ocak işletmesi gerçekleştirilen bu sahada, ortalama %1.16 nikel, %0.07 kobalt ve %21.66 demir içeren rezerv bulunmaktadır (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2018).

Gördes yöresindeki lateritik tip bir nikel sahasında ortalama %1 tenörlü yaklaşık 300 bin ton metal nikel rezervi bulunmaktadır (Şekil 6). Bu saha Meta Nikel Kobalt A.Ş. tarafından işletilmekte olup, zenginleştirme tesisleri (yüksek basınç liç tesisi) kurulmuştur. Hidrometalurjik yöntemler kullanılarak metal nikel üretimine başlanmış ve 2016 yılından itibaren ticari üretime geçilerek ihracat yapılmaktadır (Metanikel, b.t.).

Tablo 2: Türkiye'deki nikel yatakları. (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2018)

Bölge	Cevher Tipi
Manisa-Turgutlu-Çaldağ *	Laterit
Manisa-Gördes	
Eskişehir-Mihalıççık-Yunus Emre *	
Uşak-Banaz	
Bolu-Mudurnu-Akçaalan	
Hatay-Payas-Dörtöyol	Sülfür
Bitlis-Pancarlı	
Bursa-Orhaneli-Yapköydere	
Sivas-Divriği-Güneş	

* Ekonomik rezerve sahip işletme yapılan sahalar

**Şekil 5:** Manisa-Turgutlu-Çaldağ nikel madeni işletme alanı (Madencilik Haberleri, b.t.)**Şekil 6:** Manisa-Gördes nikel zenginleştirme tesisleri (Madencilik Türkiye Dergisi Haberleri, b.t.).

Eskişehir-Mihalıççık-Yunus Emre beldesindeki maden sahasında, Fe-Ni Madencilik Limited Şirketi tarafından işletilen ortalama %1 tenöre sahip nikel yatakları bulunmaktadır. Bu sahada üretilen nikel ve demir, ham cevher olarak yurtdışına ihraç edilmektedir (Maden Tetkik ve Arama Genel

Müdürlüğü, 2018). Türkiye’de Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü verilerine göre, tüvenan nikel üretimi Tablo 3’te gösterilmektedir.

Tablo 3: 2011-2022 yılları arasında tüvenan nikel üretimi. (Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, 2022a).

Yıl	Tüvenan nikel üretimi (ton)	Yıl	Tüvenan nikel üretimi (ton)
2011	75018	2017	1306800
2012	337530	2018	1199943
2013	95187	2019	419659
2014	268545	2020	1787714
2015	764346	2021	1030670
2016	826285	2022	1286313

3.5. Tüketim ve Fiyat

Dünya genelinde yılda yaklaşık olarak 40 milyon ton metal nikel ticareti gerçekleştirilmektedir. Bu ticaretin en büyük alıcısı Çin’dir ve %79’luk pay ile başı çekmektedir. Japonya ve Güney Kore bu ülkeyi takip etmektedir. Bu üç ülke dünya nikel üretiminin %97’sini ithal etmektedir. Nikel üretimi ve ihracatında ise Filipinler miktar bazında %91’lik pay ile birinci sıradadır. Guatemala ise %5.5’lik payla ikinci sırada yer almaktadır. Bu iki ülkeyi Zimbabve, Avustralya, Rusya ve Güney Afrika takip etmektedir. Türkiye ise %0.22’lik pay ile yer almaktadır (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2018).

Türkiye, yıllık olarak ortalama 1000-1500 ton arasında nikel ithalatı yapmakta ve bu ithalatın maddi değeri ise 50-60 milyon ABD \$ civarındadır. Ayrıca, “nikelden diğer eşyalar” adı altında da 90 milyon ABD \$ ithalat gerçekleştirilmektedir. Bu durumda, ülkede hammaddelerin işlenerek nihai ürünlere dönüştürülmesi ve ithalat ile ihracat arasındaki farkın azaltılması gerekmektedir. Hatta elde edilecek nihai ürünlerde ihracatın ithalattan daha fazla olması zorunludur (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2018). Bu şekilde, ülkenin ekonomik büyümesi ve dış ticaret dengesi sağlanabilir. Tablo 4’te Türkiye’de 2011-2022 yılları arasında nikel cevherinin dış ticaret rakamları görülmektedir.

Nikel cevheri fiyatları, arz ve talep dengesine, endüstriyel talebe, stok düzeylerine ve diğer faktörlere bağlı olarak değişir. Nikel piyasası, Londra Metal Borsası ve diğer ticaret platformları üzerinde vadeli işlem sözleşmeleri aracılığıyla takip edilir.

Nikel cevheri ticareti, paslanmaz çelik üretimi, pil endüstrisi, kimya sektörü ve diğer nikel kullanım alanlarına yönelik talep ile yakından ilişkilidir. Nikel cevheri, bu endüstrilere hammaddeler sağlar ve küresel ekonomik ve endüstriyel aktivitelere büyük ölçüde etki eder.

Tablo 4: Türkiye’de 2011-2022 yılları arasında nikel cevherinin dış ticaret rakamları. (İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, b.t.; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2022)

Yıl	İhracat		İthalat	
	Miktar (kg)	Değer (ABD \$)	Miktar (kg)	Değer (ABD \$)
2011	378250000	16670650	55	821
2012	294100000	13912700	1	1039
2013	104211889	4450275	1800	880
2014	163916440	7946165	1	226
2015	80239468	3622478	50	230
2016	82969537	3765372	48	3269
2017	239896730	9224640	67	950
2018	9302229	446494	0	0
2019	36540362	1574246	188	1780
2020	342363000	16784734	1449	221
2021	261845290	15278478	46000	5001
2022	173072000	11291689	89	147

2012-2022 yılları arasında nikel fiyatlarının 10-25 bin ABD \$ arasında değiştiği Tablo 5’te görülmektedir. Ayrıca 2022 yılında ortalama 25 bin ABD \$ civarında olduğu ve son iki yılda da fiyatın yükseldiği gözlenmektedir.

Tablo 5: Nikelin yıllara göre ortalama fiyatları (Londra Metal Borsası). (Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, 2022b).

Yıl	Nikel fiyatı (ABD \$/ton)
2012	17530
2013	15015
2014	16859
2015	11848
2016	9591,00
2017	10399,97
2018	13098,31
2019	13899,17
2020	13772,34
2021	16923,55
2022	25615,58

4. SONUÇLAR

Nikel, yapı sektöründe önemli bir hammadde olarak kullanılan değerli bir metaldir. Türkiye’de özellikle paslanmaz çelik üretimi ve diğer endüstriyel uygulamalarda önemli bir hammadde olarak kullanılır. Yapı sektöründe nikelin kullanımı, malzeme bilimi ve metalürji alanında yapılan sürekli araştırmalar ve geliştirmelerle ilerlemektedir.

Türkiye, nikel cevheri rezervleri açısından zengin sayılabilecek durumda olan bir ülkedir. Türkiye'nin nikel madenciliği ve nikel üretimi, ekonomik büyümeye ve istihdama katkı sağlamaktadır. Nikel madenlerinin işletilmesi ve nikel üretiminin artırılması, yerli kaynakların değerlendirilmesi ve dışa bağımlılığın azaltılması açısından önemlidir.

Türkiye'nin nikel potansiyelinin değerlendirilmesi, teknolojik gelişmeyi destekleyerek ülkenin rekabet gücünü artırabilir. Türkiye'deki nikelin önemi, madencilik potansiyeli, ihracat gelirleri, sanayi uygulamaları, ekonomik katkı ve teknolojik gelişme açılarından oldukça önemlidir. Ülkenin yeraltı kaynaklarının doğru şekilde değerlendirilmesi ve nikel sektörünün sürdürülebilir şekilde geliştirilmesi, Türkiye'nin ekonomik büyümesine ve endüstriyel kalkınmasına katkı sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- Al-Azzawi, A., Baumli, P. ve Mucsi, G. (2015, Nisan, 9-10). *Mechanical Alloying and Milling* [Sözlü sunum]. MultiScience - XXIX. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc, Macaristan.
- Al, A. ve Kılıç, S. (2013). Östenitik çeliğin soğutulmasındaki yapı dönüşümleri.
<https://bircelik.com/UserFiles/Catalogue/%C3%96STEN%C4%B0T%C4%B0K%20PASLANMAZ%20%C3%87EL%C4%B0KLER%C4%B0N%20SO%C4%9EUTULMASINDAK%C4%B0%20YAPI%20D%C3%96N%C3%9C%C5%9E%C3%9CMLER%C4%B01.pdf> adresinden 26 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Aslaner, M. (1979). Nikel yatakları ve Türkiye nikel olanaklarına toplu ve yeni bir bakış. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 3(2), 25-36.
- Batı paslanmaz. (2022). Paslanmaz çelik çeşitleri.
<https://batipaslanmaz.com.tr/teknik-bilgi/paslanmaz-celik-cesitleri#:~:text=%C3%87%C3%B6kelmeyle%20sertle%C5%9Ftirilmi%C5%9F%20paslanmaz%20%C3%A7elikler%3B%20bak%C4%B1r,paslanmaz%20%C3%A7elikler%20ailesinin%20bir%20grubudur> adresinden 26 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Benavent, C. V., Nieto, F. Proenza, J. A. ve Gali, S. (2011, Eylül, 7-10). *Talc- and serpentine-like garnierites from Falcondo Ni-laterite deposit (Dominican Republic): a HRTEM approach*. XXXI Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía (SEM), Barselona, İspanya.
- Bernhard, P. (2008). *The ore minerals under the microscope: an optical guide*. Elsevier.
- Bhuntumkomol, K., Han, K. N. ve Lawson, F. (1982). The leaching behaviour of nickel oxides in acid and in ammoniacal solutions. *Hydrometallurgy*, 8, 147-160. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(82\)90041-X](https://doi.org/10.1016/0304-386X(82)90041-X)
- Birçelik (2015). Çökeltmeyle sertleşebilen paslanmaz çelik.
<https://bircelik.com/tr/kategori/cokelmeyle-sertlesebilen-paslanmaz-celik> adresinden 26 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Borşen. (2023). Paslanmaz çelik nedir? Çeşitleri nelerdir?
<https://borsenboru.com/paslanmaz-celik-nedir> adresinden 26 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Bulatovic, S. M. (2010). Flotation of oxide copper and copper cobalt ores. *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice*, 47-65.
- Burkin, A. R. (1987). *Extractive metallurgy of nickel*. Wiley.
- Butt, C. ve Cluzel, D. (2013). Nickel laterite ore deposits: Weathered serpentinites. *Elements*, 9(2), 123-128.

- Canterford, J. H. (1975). The Treatment of nickeliferous laterites. *Minerals Science and Engineering*, 7(1), 3-17.
- Cao, J., Fang, T., Fu, L., Zhou, L. ve Zhan, S. (2014). A nickel molecular electro-catalyst for generating hydrogen from acetic acid or water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(21), 10980-10986.
- Chalcopyrite (b.t.). Handbook of mineralogy. <https://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/chalcopyrite.pdf> adresinden 28 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Chang, Y., Zhao, K. ve Pešić, B. (2016). Selective leaching of nickel from prereduced limonitic laterite under moderate HPAL conditions- part I: Dissolution. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B*, 52, 127-134.
- Cheng, C. ve Pan, S. (2018). Deployment of hydrometallurgical system for heavy metals recovery from wastewater at industrial scale. *Waste Management and Resource Efficiency*. 1189-1196.
- Cornwall, H. R. (1966). Nickel Deposits of North America. <https://pubs.usgs.gov/bul/1223/report.pdf>
- Crundwell, F. K., Moats, M. S., Ramachandran, V., Robinson, T. G. ve Davenport, W. G. (2011a). Electrowinning of nickel from purified nickel solutions. *Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals* (s. 327-345) içinde. Elsevier.
- Crundwell, F. K., Moats, M. S., Ramachandran, V., Robinson, T. ve Davenport, W. G. (2011b). Recycling of nickel, cobalt and platinum-group metals. *Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals* (s. 537-549). Elsevier.
- Cruz, M. J., Makarova, I. V., Kharitonov, D. S., Dobryden, I., Chernik, A., Grágeda, M. ve Ushak, S. (2019). Corrosion properties of nickel coatings obtained from aqueous and nonaqueous electrolytes. *Surface and Interface Analysis*, 51(9), 943-953.
- Dang, P. T., Xuân, P. T. ve Pho, N. V. (2020). “Garnierite” in weathering crust of ultramafic blocks from Cao Bang area, north Viet Nam. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 42(2), 130-140.
- Demo, J. J. (1977). Structure, constitution, and general characteristics of wrought ferritic stainless steels. Philadelphia: American Society for Testing and Materials. <https://www.astm.org/stp619-eb.html>
- Dreisinger, D. ve Clucas, J. I. (2013). *The Starved Acid Leaching Technology (Salt) for Recovery of Nickel and Cobalt from Saprolites and Caron Plant Residues*. Ni-Co 2013, 413-424.
- Eroğlu, G., Akgök, Y. Z. ve Şahiner, M. (2018). Üretimden ticarete nikel. *Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 26, 53-62.

- Farrokhpay, S., Filippov, L., Fornasiero, D. ve Fornasiero, D. (2019). Pre-concentration of nickel in laterite ores using physical separation methods. *Minerals Engineering*, 141(2), 105892.
- Geiger, T. ve Bischoff, A. (1995). Formation of opaque minerals in CK chondrites. *Planetary and Space Science*, 43(3-4), 485-498.
- Goswami, T. K. ve Goswami, B. D. (2023). Properties of nickel compose. *Journal of Nanosciences Research & Reports*, 5(1), 1-2.
- Göktaş, M. (2007). *Manisa-Turgutlu-Çaldağ nikel ham cevherinin yapısal özelliklerinin ve bunlara dayalı zenginleştirilebilirliğinin araştırılması* [Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi].
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Haugrud, R. (2003). On the high-temperature oxidation of nickel. *Corrosion Science*, 45(1), 211-235.
- İstanbul Maden İhracatçıları Birliği. (b.t.). İhracat İstatistikleri.
<https://www.imib.org.tr/tr/raporlar/ihracat-istatistikleri> adresinden 26 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Jaramillo, R., Ha, S. D., Silevitch, D. ve Ramanathan, S. (2013). Origins of bad-metal conductivity and the insulator–metal transition in the rare-earth nickelates. *Nature Physics*, 10, 304 - 307.
- Kanışıkdemir, S. (1996). Paslanmaz Çelikler projesi, YTÜ Kimya-Metalurji Fak. Metalürji Müh. 1996 Akman, T.; “Paslanmaz Çelik“, 1991.
- Karaca Paslanmaz. (2022). Paslanmaz çelik.
<https://www.karacapaslanmaz.com/paslanmaz-celik#:~:text=Paslanmaz%20%C3%A7eli%C4%9Fin%20i%C3%A7erisine%20nikel%20kat%C4%B1ld%C4%B1%C4%9F%C4%B1nda,18%20krom%2C%20258%20nikeldir> adresinden 26 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Keays, R. R. ve Kirkland, M. C. (1972). Hydrothermal mobilization of gold from copper-nickel sulfides and ore genesis at the Thomson River copper mine, Victoria, Australia. *Economic Geology*. 67(8), 1263-1275.
- Kerfoot, Derek G. E. (2005). *Nickel*. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim: Wiley-VCH. doi:10.1002/14356007.a17_157.
- Kirjavainen, V. ve Heiskanen, K. (2007). Some factors that affect beneficiation of sulphide nickel-copper ores. *Minerals Engineering*, 20(7), 629-633.
- Krauss, G. (1990). *Stells: Heat Treatment and Processing Principle*, ASM International, Ohio.
- Lewis, A. J. (1975). The metallography of a nickel base casting alloy. *Australian Dental Journal*, 20(5), 298-303.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2018). Dünyada ve Türkiye’de nikel.

- <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/Nikel.pdf>
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2022). Maden dış ticareti. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-gruplari-ithalat>
- Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü. (2022a). Maden üretim değerleri. <https://www.mapeg.gov.tr/Custom/Madenistatistik>
- Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü. (2022b). Temel maden fiyatları. <https://www.mapeg.gov.tr/Custom/Madenistatistik>
- Madencilik Haberleri (b.t.). Çaldağı nikel madencilik el değiştirdi. <https://madencilikhaberleri.wordpress.com/2014/08/20/cal-dagi-nikel-madencilik-el-degistirdi/> adresinden 26 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Madencilik Türkiye Dergisi Haberi (b.t.). Meta nikel kobalt madencilik kapasite artışı planlıyor. <https://madencilikturkiye.com/meta-nikel-kobalt-madencilik-kapasite-artisi-planliyor/> adresinden 26 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Matejka, W. A. ve Knoth, R. J. (1975). A high purity approach to high chromium ferritic stainless steels. *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, 3(3), 199-207.
- Meshram, P., Abhilash ve Pandey, B. D. (2018). Advanced review on extraction of nickel from primary and secondary sources. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 40, 157-193.
- Metanikel (b.t.). Gördes nikel işletmesi. <https://www.metanikel.com.tr/gordes-nikel-isletmesi> adresinden 26 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Mohamed, A. E., Hernando, B. ve Ahmed, A. M. (2017). Magnetic, magnetocaloric and thermoelectric properties of nickel doped manganites. *Journal of Alloys and Compounds*, 692, 381-387.
- Moskalyk, R. R. ve Alfantazi, A. (2002). Nickel sulphide smelting and electrorefining practice: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 23(3-4), 141-180.
- Murat, S. (2007). *Aktif karbon ile sulu çözeltilerden nikel gideriminde kolon çalışmaları*. [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Nakao, Y., Kobayashi, Y. ve Taniuchi, T. (2002, Şubat, 21-24). *Corrosion resistance of super stainless steels in chloride-containing environments*. 6th International Conference on High Nitrogen Steels, Chennai, Tamil Nadu, Hindistan.
- Nickel, E. H. ve Bridge, P. J. (1975). A garnierite with a high nickel content from Western Australia. *Mineralogical Magazine*, 40(309), 65-69.
- İstanbul Maden İhracatçıları Birliği. (2021). Nikel yataklarının durumu, işletmeciliği ve geleceği. <https://www.imib.org.tr/links/29maden/NIKEL.pdf>

- Ozaki, Y., Okabe, T. H. ve Kagawa, Y. (2014). Current status of resources and supply-demand of nickel, and outlook of hydrometallurgical processes for nickel laterite ore. *Shigen-to-sozai*, 130, 93-103.
- Pentlandite (b.t.). Handbook of mineralogy.
<https://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/pentlandite.pdf> adresinden 28 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Pyrite (b.t.). Handbook of mineralogy.
<https://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/pyrite.pdf> adresinden 28 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Pyrrhotite (b.t.). Handbook of mineralogy.
<https://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/pyrrhotite.pdf> adresinden 28 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Qing-xi, X. (2005). The past and future of laterite ores. *China Nonferrous Metallurgy*, 6, 1-8.
- Sevigny, J. H. (1988). Geochemistry of late proterozoic amphibolites and ultramafic rocks, southeastern Canadian Cordillera. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 25(8), 1323-1337.
- Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Daud, W. M. ve Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115, 308-326.
- Shushkov, D. A., Kotova, O. B. ve Goldin, B. A. (2011). Geomaterials on the Basis of Analcime-Bearing Rocks. *Geomaterials*, 1, 33-40.
- Spry, P. G. ve Gedlinske, B. (1987). Skinner, Brian J. (ed.). *Noncolored Minerals*. Tables for the Determination of Common Opaque Minerals. Society of Economic Geologists.
- Talovina, I., Lazarenkov, V. G., Ryzhkova, S., Ugol'kov, V. L. ve Vorontsova, N. I. (2008). Garnierite in nickel deposits of the Urals. *Lithology and Mineral Resources*, 43, 588-595.
- Tersane (2008, Haziran). Paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti.
https://www.tersanedergisi.com/yayin/738/paslanmaz-celiklerin-kaynak-kabiliyeti_23499.html adresinden 26 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Thorne, R. L., Roberts, S. J. ve Herrington, R. J. (2012). Climate change and the formation of nickel laterite deposits. *Geology*, 40(4), 331-334.
- Thulukkanam, K. (2013). *Heat Exchanger Design Handbook (2 nd ed.)*. CRC Press.
- Tracey, V. A. (1992). Nickel in hardmetals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 11(3), 137-149.
[https://doi.org/10.1016/0263-4368\(92\)90056-8](https://doi.org/10.1016/0263-4368(92)90056-8)
- Tutkimuskeskus, G. (1986). *Mineral resource assessment map, northern Fennoscandia: regions and locations highly favourable for mineral deposits*. Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden, Retrieved April 13, 2023 from OCLC 18336974.

- Türk Mühendis ve Mimarlar Odası Birliği (2012). Nikel raporu. <https://docplayer.biz.tr/4152343-Tmmob-maden-muhendisleri-odasi-nikel-raporu.html>
- U.S. Geological Survey. (2020). Mineral Commodity Summaries 2020: Nickel. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>.
- Wikipedi (2023, 8 Temmuz) Nikel. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Nikel> adresinden 12 Ağustos 2023 tarihinde alınmıştır.
- Wikipedia (2023a, 17 Mayıs). Millerite. <https://en.wikipedia.org/wiki/Millerite> adresinden 28 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Wikipedia (2023b, 30 Haziran). Pentlandite. <https://en.wikipedia.org/wiki/Pentlandite> adresinden 28 Temmuz 2023 tarihinde alınmıştır.
- Yang, Q. Z., Qi, G., Low, H. C. ve Song, B. (2011). Sustainable recovery of nickel from spent hydrogenation catalyst: economics, emissions and wastes assessment. *Journal of Cleaner Production*, 19(4), 365-375.
- Yıldız, N. (2014). *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme*. Ertem Basım.
- Zaitsev, A. ve Zaitseva, N. E. (2002). Pressure of the saturated vapor of nickel at high temperatures. *High Temperature*. 40, 197-202.
- Zayakin, O. V. ve Renev, D. S. (2019). Density of chrome-nickel ferroalloys. *KnE Materials Science*. 291-296.
- Zhao, Y., Topping, T. D., Bingert, J. F., Thornton, J. J., Dangelewicz, A. M., Li, Y., Liu, W., Zhu, Y., Zhou, Y. ve Lavernia, E. J. (2008). High tensile ductility and strength in bulk nanostructured nickel. *Advanced Materials*, 20(16), 3028-3033.
- Züttel, A., Meli, F. ve Schlapbach, L. (1994). Effect of partial substitution of nickel in AB2-Type Zr-Ni alloys by V, Cr and Mn on the surface- and bulk-properties in view of battery applications. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 183(1-2), 355-363.

BÖLÜM 6

TUNGSTEN (VOLFRAM)

Dr. Öğr. Üyesi Serhan HANER¹

DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.10034960>

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Dinar Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Endüstriyel Tasarım Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye. shaner@aku.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-8579-078X

GİRİŞ

Volfram olarak da adlandırılan tungsten (W), çeliklerde sertliği ve dayanıklılığı arttırmada ve lamba filamanlarında kullanılan, periyodik tabloda 6. periyot 6B grubunda yer alan son derecede güçlü refrakter metal olan bir elementtir. Tungsten, olağandışı özelliklerinden dolayı elektronik haberleşme, havacılık ve uzay bilimi, malzeme ve kimya mühendisliği gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılan stratejik bir metaldir.

Tarihsel açıdan bakıldığında, Agricola tarafından önceden bahsedilmiş bir element olarak bütün ders kitaplarında yer almış olmasına rağmen, 1755 yılında Cronstedt ve 1781 yılında Scheele (CaWO_4 minerali daha sonra şelit olarak adlandırıldı) tarafından bir mineral olarak keşfedildi. Aynı mineral olarak tanımlanması ilk olarak bir İsveç laboratuvarında çalışan iki İspanyol kimyager tarafından yapılmıştır. Tungsten ismi “ağır taş (heavy stone)” anlamında olup, İsveç dilinden gelmektedir. Ancak volfram isminin kökeni (veya WO_4 minerali (Fe, Mn) için volframit) ile ilgili net bir bilgi yoktur. Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (International Union of Pure and Applied Chemistry) tarafından İngilizce adı “tungsten”, Fransızca adı “tungstène” ve alternatif olarak Almanca adı da “wolfram” olarak seçilmiştir (Rieck, 1967).

Tungsten (CASRN 7440-33-7, EINECS 231-143-9), atmosferik basınçta hacim merkezli kübik yapıya sahip, atom numarası 74, atom ağırlığı 183.85 ± 0.03 g/mol olan metalik bir geçiş elementidir. Nadir elementler grubunda yer alan tungsten, yerkabuğunda ortalama 1-1.5 ppm (milyonda bir) oranında bulunmaktadır. Tungstenin Clark konsantrasyonu 1.2 ppm olup, mafik kayalarda 1.0 ppm, ultramafik kayalarda 0.1 ppm, granitik kayalarda 1.5 ppm, kumtaşlarında 1.6 ppm, kireçtaşlarında 0.5 ppm, şeyllerde 1.8 ppm ve topraklarda 1.0 ppm ortalama değerlerindedir. Jaeger sınıflamasında jeokimyasal olarak pinömatolitik-pegmatitik elementler familyasına dâhil edilmektedir. Doğada yirmiden fazla tungsten içeren mineral bulunmaktadır (European Chemicals Agency, 2023; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2019; Temur, 2001). Şekil 1’de tungsten içeren kayaç örnekleri görülmektedir.



Şekil 1: Hemerdon (İngiltere) madeni tungsten içeren kayaç örnekleri (Open University Geological Society, 2011)

Doğal olarak oluşan birincil tungsten mineralleri volframit ve şelit grubu olarak ayrılabilir. Volframit grubu volframit [(Fe,Mn)WO₄], hübnerit (MnWO₄), ferberit (FeWO₄) ve sanmartinit [(Zn,Fe)WO₄] minerallerini, şelit grubu ise şelit (CaWO₄) ile stoltz ve raspit (PbWO₄) minerallerini içerir. Ancak doğada bol miktarda bulunan ve ekonomik öneme sahip olan yalnızca volframit ve şelit mineralleridir. Kalan mineraller nadirdir ve genellikle eser miktarlarda bulunur. Şelitin ve volframit grubu tungsten minerallerinin kimyasal bileşimi, bazı fiziksel ve mineralojik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 1: Şelitin fiziksel ve kimyasal özellikleri. (Schubert ve Lassner, 1999)

Mineral	Şelit
Bileşim (saf)	CaWO ₄
WO ₃ (%)	80.6
Kristal Yapısı	Tetragonal
<i>a</i> (Å)	5.257
<i>c</i> (Å)	11.373
<i>c/a</i>	2.163
Dilininim	Dört yönde iyi
Sertlik	4.5-5
Yoğunluk (g/cm ³)	5.9-6.1
Renk	Soluk sarı, kahverengi, genellikle beyaz
Çizgi Rengi	Beyaz
Parlaklık	Camsı ile reçinemsiz
Kırılma	Düzensiz
Manyetizma	Manyetik değil
Saydamlık	Saydamdan yarı saydama
Yaygın oluşum şekli	Masif ve küçük taneler halinde, bazen volframitten sonra psödomorf olarak bulunur

İkincil tungsten minerallerinin genellikle atmosferik ayrışmadan ziyade birincil tungsten minerallerinin hidrotermal ya da süperjen alterasyonu ile oluştuğu düşünülmektedir. Birincil ve ikincil tungsten mineralleri Tablo 3’de listelenmiştir.

Bir maden yatağında birkaç tungsten mineralinin oluşumunu görmek mümkündür. Volframit ve şelit ekonomik olarak işletilen tungsten mineralleridir. Dünyadaki bütün tungsten kaynaklarının yaklaşık üçte ikisi şelit, üçte biri ise volframit cevherinden oluşmaktadır. Tungsten yataklarının oluşumunda metal içeren hidrotermal eriyikler geçtikleri yerlerde yan kayaçlarla olan dokunak bölgelerinde volframit ve şelit olarak çökelmişlerdir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2019; Yıldız, 2014).

Tablo 2: Volframit grubu minerallerin fiziksel ve kimyasal özellikleri. (Cornelius ve Hurlbut, 1982; Schubert ve Lassner, 1999; Temur, 2001; Uz, 1994)

Mineral	Volframit	Ferberit	Hübnerit
Bileşim (saf)	(Fe,Mn)WO ₄	FeWO ₄ (%20'den fazla FeO)	MnWO ₄ (%20'den az FeO)
WO ₃ (%)	76.5	76.3	76.6
Mn (%)	3.6-14.5	0-3.6	14.5-18.1
Fe (%)	14.7-3.7	18.4-14.7	3.7-0
Kristal Yapısı	Monoklinik	Monoklinik	Monoklinik
a (Å)	4.79	4.71	4.85
b (Å)	5.74	5.70	5.77
c (Å)	4.99	5.94	4.98
β	90°26'	90°	90°53'
Dilinim	Tek yönde mükemmel	Tek yönde mükemmel	Tek yönde mükemmel
Sertlik	5-5.5	5	5
Yoğunluk (g/cm ³)	7.1-7.5	7.5	7.2-7.3
Renk	Kahve, koyukahve, nadiren siyah	Koyu kahve, nadiren siyah	Kahve, koyu kahve
Çizgi Rengi	Kırmızımsı kahve	Kırmızımsı kahve	Kırmızımsı kahve
Parlaklık	Metalik ile yarı metalik	Metalik ile yarı metalik	Yarı metalik elmas gibi
Kırılma	Düzensiz	Düzensiz	Düzensiz
Manyetizma	Biraz manyetik	Bazen zayıf manyetik	-
Saydamlık	Opak	Dilinim levhalarında opaktan yarı saydama	Opaktan yarı saydama
Yaygın oluşum şekli	Kamamsı kristal gruplarını yayan düzensiz kütleler	İyi tanımlanmış kristaller, masif kristal	İnce kamamsı kristallerin yayılan grupları

Tungsten (W) veya volfram, doğadaki bütün metaller içerisinde en yüksek erime noktasına sahip olmasının yanı sıra çok yüksek yoğunluk değerine de sahiptir. Bu nedenle endüstriyel ve askeri alanlara ilaveten günlük yaşamda da geniş bir uygulama alanına sahiptir. Tungsten ayrıca alaşımlar, korozyona dayanıklı kaplamalar, katalizörler, yarı iletkenler, ateşe dayanıklı bileşikler ve diğer birçok parçaların yapımında kullanılır.

Tablo 3: Tungsten mineralleri. (Han ve ark., 2021)

Mineral	Bileşim	Mineral	Bileşim
Birincil Tungsten Mineralleri			
Ferberit	$FeWO_4$	Şelit	$CaWO_4$
Hübnerit	$MnWO_4$	Stolzit ve Raspit	$PbWO_4$
Sanmartinit	$(Zn,Fe)WO_4$	Volframit	$(Fe,Mn)WO_4$
İkincil Tungsten Mineralleri			
Alumotungsttit	$(W,Al)(O,OH)_3$	Ovamboit	$Cu_{20}(Fe,Cu,Zn)_6W_2Ge_6S_{32}$
Antoyinit	$AlWO_3(OH)_3$	Paraniit-(Y)	$Ca_2Y(AsO_4)(WO_4)_2$
Katamarkayit	Cu_6GeWS_8	Filotungsttit	$CaFe_3H[WO_4]_6 \cdot 10H_2O$
Kuprotungsttit	$Cu_2[(OH)_2[WO_4]]$	Pinalit	$Pb_3WO_3Cl_2$
Elsmoreit	$WO_3 \cdot 0.5H_2O$	Qitianlingit	$(Fe,Mn)_2(Nb,Ta)_2WO_{10}$
Farallonit	$Mg_2W_2SiO_9 \cdot nH_2O$	Rankachite	$(V^{4+},V^{5+})(W,Fe)_2O_8(OH) \cdot (Ca_xH_2O_y)$
Ferritungsttit	$(W,Fe)(O,OH)_3$	Mporoit	$AlWO_3(OH)_3 \cdot 2H_2O$
Hidrotungsttat	$WO_3 \cdot 2H_2O$	Russelit	$(BiO)_2WO_4$
Jixianit	$Pb(W,Fe)_2(O,OH)_7$	Sanmartinit	$(Zn,Fe)WO_4$
Johnsenit-(Ce)	$Na_{12}(Ce,REE,Sr)_3Ca_6Mn_3Zr_3W(Si_{25}O_{73})(OH)_3(CO_3) \cdot H_2O$	Tungstenit	WS_2
Khomyakovit	$Na_{12}Sr_3Ca_6Fe_3Zr_3W(Si_{25}O_{73})(O,OH,H_2O)_3(OH,Cl)_2$	Tungsttit	$WO_3 \cdot H_2O$
Kiddcreekit	Cu_6SnWS_8	Uranotungsttit	$(Fe,Ba,Pb)(UO_2)_2[(OH)_2[WO_4]] \cdot 12H_2O$
Koragoit	$(Mn,Fe)_3(Nb,Ta,Ti)_{62}(Nb,Mn)_2(W,Ta)_2O_{20}$	Welinit	$Mn_6(W,Mg)_{0.7}[(O,OH)_3 SiO_4]$
Mn-Khomyakovit	$Na_{12}Sr_3Ca_6Mn_3Zr_3W[Si_{25}O_{73}](O,OH,H_2O)_3(OH,Cl)_2$	Yttrotungsttit-(Ce)	$(Ce,Nd,Y)W_2O_6(OH)_3$
Meymakit	$WO_3 \cdot 2H_2O$	Yttrotungsttit-(Y)	$YW_2O_6(OH)_3$

Tungsten, tüm metaller arasında en yüksek erime noktasına sahip olduğundan dolayı diğer metalleri güçlendirmek için alaşım yapılır. Tungsten

ve alaşımları, ark kaynağı elektrotları ve yüksek sıcaklık fırınlarındaki ısıtma elemanları gibi birçok yüksek sıcaklık uygulamasında kullanılır.

Tungsten günlük hayatta elektrikli ve elektronik ürünlerde, aydınlatma ürünlerinde vb. yerlerde sıklıkla kullanılır. Şekil 2’de solda tungsten elektrot içeren bir sodyum ampulü ve sağda yeni teknoloji olan led aydınlatma ile sodyum ampulünün birlikte kullanıldığı bir mekân görülmektedir. Tungsten, eski tarz akkor ampullerin filamanları için yaygın olarak kullanılmaktaydı. Ancak bunlar birçok ülkede aşamalı olarak kullanımdan kaldırıldı. Bunun nedeni, ışıktan çok daha fazla ısı ürettikleri için enerji açısından çok verimli olmamalarıdır. Kalsiyum ve magnezyum tungstatlar, floresan aydınlatmada yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2: Tungsten içeren bir aydınlatma (solda) ve led ile sodyum ampulün birlikte kullanıldığı bir mekân (sağda)

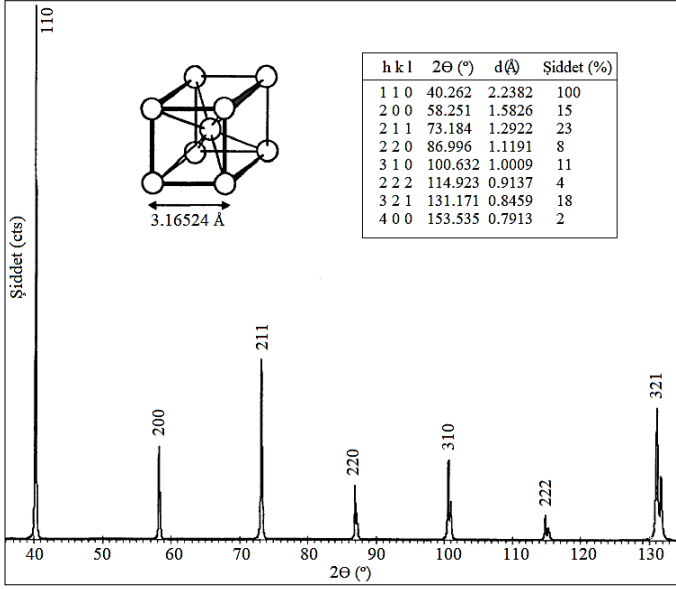
Tungsten karbür en önemli tungsten ürünüdür ve semente karbürler üretmek için kullanılır. Tungsten karbür son derece sert olduğu için metal işleme, madencilik ve petrol endüstrileri için çok önemlidir. Tungsten tozu ile karbon tozunun karıştırılması ve 2200°C’ye ısıtılmasıyla üretilir. Ultra yüksek hızlarda dönen yeni bir “ağırsız” dişçi matkabı da dâhil olmak üzere mükemmel kesme ve delme aletleri yapılır. Bu nedenle, tungsten kaynakları ekonomik ve sosyal kalkınmada vazgeçilmezdir.

Tungsten, Gümrük Tarife İstatistik Pozisyonu’na göre “2611-Tungsten cevherleri ve zenginleştirilmiş tungsten cevherleri” üst kategorisi altında “261100- Tungsten cevherleri ve konsantreleri” olarak sınıflandırılmaktadır.

1. OLUŞUM VE ÖZELLİKLER

Tungsten metalinin yapısal tipi A2 (W-tip) olup hacim merkezli kübik (bcc) kristal yapısına (uzay grubu $Im\bar{3}m$ (O_h^9)) sahiptir. Böyle bir yapı aynı zamanda alkali metaller, vanadyum, niyobyum, tantal, krom ve α -Fe’de

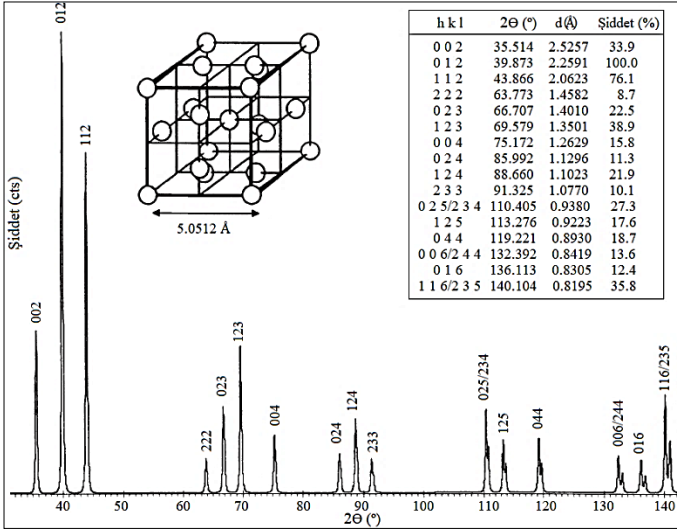
vardır. Kristal kafes temelinde, (0,0,0) ve (1/2,1/2,1/2) koordinatlarında iki atom içerir. Amorf tungstenin yanı sıra, üç polimorfu (α -, β - ve γ -tungsten) bilinmektedir. α -tungsten kararlı olan tek fazdır (Kurlov ve Gusev, 2013; Rieck, 1967; Schubert ve Lassner, 1999). Şekil 3’de, α -tungstenin kristal yapı modeli ile birlikte X-Işınları kırınımı grafiği görülmektedir.



Şekil 3: α -tungstenin X-Işınları kırınımı diyagramı (Schubert ve Lassner, 1999)

β -tungsten yarı kararlı bir yapı olarak ya da sadece 630°C’nin altında kararlı bir yapı olarak nitelendirilir. Şekil 4’de, β -tungstenin kristal yapı modeli ile birlikte X-Işınları kırınımı grafiği görülmektedir. β -tungsten, 630 ile 700°C’nin üzerine ısıtıldığı zaman α -tungstene dönüşür. Genellikle az miktarlarda oksijen içermektedir. Ancak oksijen eksikliğine rağmen W_3O olarak kabul edilmektedir. Ölçümler, β -yapının aslında allotropik bir tungsten modifikasyonu olduğunu gösterse de, oksijenin dışlanması onun oluşumunu engeller. Ancak, trioksitin metale indirgenmesinde rol oynar. β -tungsten, α -tungstenin yanı sıra tungsten oksitlerin, tungsten bronzların veya amonyum paratungstatın düşük sıcaklıkta hidrojen indirgenmesi sırasında en azından kısmen oluşur. P, As, Al, K, vb. gibi birkaç yabancı element, oluşumunu destekler ve ayrıca daha yüksek sıcaklıklarda stabilize edici bir etkiye sahiptir. Ayrıca, buharlaşma, sıçratma (sputtering) ya da kimyasal buhar biriktirme ile üretilen β -tungsten, fosfat eriyiklerindeki ve ince filmlerdeki WO_3 ’in elektrolitik indirgenmesi esnasında oluşur. β -tungstenin yapısal tipi A15 olup kübik kristal yapısına (uzay grubu $Pm\bar{3}n$ (O_h^3)) sahiptir. Kristal kafes (0,0,0), (1/2,1/2,1/2), (0, 1/4, 1/2), (0, 3/4, 1/2), (1/2, 0, 1/4), (1/2, 0, 3/4), (1/4, 1/2, 0) ve (3/4, 1/2, 0) koordinatlarında sekiz atom içerir.

γ -tungsten (A1 tipin yüzey merkezli kübik yapısı) sadece sıçratmanın başlangıcında amorf tungsten ve ince sıçratılmış tabakalarda bulunur. γ -tungsten 700°C ve üzeri sıcaklıklara ısıtıldığında α -tungsten yapısına dönüşecektir (Rieck, 1967; Schubert ve Lassner, 1999).



Şekil 4: β -tungstenin X-Işınları kırınımı diyagramı (Schubert ve Lassner, 1999)

Tungsten hacim merkezli kübik kristal yapıda olup, atom yarıçapı 0.1371 nanometredir. İyon yarıçapı 0.070 nanometredir (Callister ve Rethwisch, 2015).

Metalik bağ, atomların mümkün olan en sıkı küresel paketlenmesini destekler. Bir atomun mümkün olduğu kadar çok sayıda en yakın komşuya sahip olması gerektiği ilkesine sahiptir (büyük bir koordinasyon sayısı n). Metaller dış elektronlarını kolaylıkla kaybedebilen elementler olduğundan kristal yapıları pozitif yüklü atom paketi şeklindedir. Elektronlar atomlar arasında serbestçe hareket edebildiğinden dolayı metaller iyi seviyede ısı ve elektrik iletkenliğine sahiptir. Yapının simetrisi ve atomik boşluk, atomlar arasındaki kuvvetler tarafından yönetilir. Serbest elektronlar ve çekirdekler arasında çekim kuvvetleri vardır. Elektronların ve çekirdeklerin kendileri arasında ise itici kuvvetler vardır. İtme ve çekme kuvvetlerinin dengelendiği mesafe, yaklaşık olarak en yakın komşu atomlar arasındaki mesafedir (Tablo 4). En kararlı kristal simetrisi, atomların en güçlü biçimde bağlanmasıyla elde edilir. Mümkün olan en sıkı küresel paketleme yüzey merkezli kübik ve sıkı paket hegzagonal kristal yapılarında bulunmaktadır. Bu yapıları koordinasyon sayısı 12'dir. Diğer taraftan hacim merkezli kübik kristal yapısının koordinasyon sayısı 8'dir. Tungsten önceden de bahsedildiği gibi hacim merkezli kübik kristal yapısında bulunur. Tablo 4, yoğunluk, molar

hacim ve özgül hacim gibi kristalografik parametreler ve ilgili verileri sağlamaktadır.

Tablo 4: Tungstenin polimorfizmi: Kristalografik ve ilgili veriler. (Schubert ve Lassner, 1999)

Polimorf	α -W	β -W	γ -W
Model tipi	A2	A15 (Cr ₃ Si)	A1
Uzay grubu	$O_h^9 - Im\bar{3}m$ (No.229)	$O_h^3 - Pm\bar{3}n$	-
Atomlar arası en kısa mesafe (Å)	2.741	2.519 ve 2.816	-
Kafes parametresi (25°C)	3.16524 ± 0.00004	5.05 (hazırlama metoduna bağlı olarak 5.037-5.09)	4.13
Hesaplanan yoğunluk (g/cm ³)	19.246	18.9	15.8
Piknometrik yoğunluk (g/cm ³)	19.250	19.1	-
Erime noktasındaki özgül hacim (cm ³)	0.057 – 0.062	-	-
Molar hacim (cm ³)	9.53	-	-

Magmanın ayrılaşması esnasında, tungsten çözeltiler içerisinde zenginleşmekte ve pegmatitik evre ile birlikte mineral oluşturmaya başlamaktadır. Çözeltilerin içerisinde tungstik asit, heteropolisilik asit ve Na-tungstat kompleksleri biçiminde tungstenin taşındığı farz edilmektedir. Tungstenin çökmesi ise ortamın Eh, pH, iç basınç ve Mn, Fe, Ca, F, CO₂ gibi iyon ve gazların kısmi basınçlarındaki değişimler ile meydana gelmektedir. Tungsten yatakları yalnızca pinömatolitik ve yüksek sıcaklıklı hidrotermal süreçlerle oluşabilmektedir. Yüzeş şartlarında tungstenin oldukça zor bir şekilde çözünmesi ve taşınması nedeniyle nadir de olsa plaser tungsten yataklarının oluşmasına imkân sağlamaktadır (Temur, 2001).

Pinömatolitik tungsten (volfram) yataklarını meydana getiren pinömatolitik gaz ve çözeltilerin kaynağı asidik bileşimli derinlik kayaçlarıdır. Bilhassa granitlerdir.

Volfram yataklarının bağlı oldukları tüm granitoidler S tipidir. Tektonik olarak yitimli yaklaşan plaka sınırlarının yay gerisi bölgelerinde, kıtasal plaka içi ortamlarda ve çarpışan plaka sınırlarında oluşabilmektedir. Yatakların büyüklüğü kaynak sokulum kayacının büyüklüğü ile doğru orantılıdır. İntraplütönik, kontakt-metazomatik olanları daha yaygındır. Yatak geometrisi genellikle yankayaçlarının çatlak ve kırık sistemleri ile kontrol edilir. Işınsal damarlar yaygındır. Sokulum kayacının üst tavan kesimlerinde soğumaya bağlı olarak tabaka benzeri volfram birikmeleri mümkündür.

Ayrıca pipo, mercek veya ağsal damarlar şeklinde yataklanmalar görülebilir. Pinömatolitik gaz ve çözeltiler kimyasal olarak çok aktiftirler. Bileşimleri de içine sokuldukları kayaların bileşiminden genellikle çok farklıdır. Bu sebeple volfram yataklarının kenarlarında grayzenleşme (kuvars-mikaturmalin oluşumu), turmalinleşme, topazlaşma, mikalaşma, silisleşme, mermerleşme ve mikroklinleşme gibi yankayaç alterasyonları gözlenir (Temur, 2001: s. 247).

Temur (2001) plaser tipi tungsten yatakları için:

Volfram minerallerinin ağır olması ve yüzey şartlarında kimyasal etkilere karşı dayanıklı olduklarından plaser ortamlarında zenginleşebilmektedirler. Ancak birincil volfram minerallerinin dilinimleri boyunca kolay parçalanmaları sebebiyle taşınmış plaserlerde konsantrasyon olamamaktadır. Volfram bakımından zengin taktitlerin veya volfram yataklarının üzerinde veya yakın kesimlerindeki plaserlerde işletme tenörlerine ulaşarak yatak oluşturmaktadır (s. 248).

Dünyadaki öne çıkan tungsten yataklarının özellikleri Tablo 5’de listelenmiştir.

Tablo 5: Dünyadaki öne çıkan tungsten yataklarının özellikleri. (Han ve ark., 2021)

Yatak	Yatak tipi	Rezerv, Mt	Kalite, %WO ₃
Xihuashan (Çin)	W-Sn	81.3	1.08
Hemerdon (UK)	W-Sn	26.7	0.19
Mt Pleasant (Kanada)	W-Mo-Bi	14.4	0.26-0.33
Sangdong (Güney Kore)	W-Mo	13.3	0.43
Panasqueira (Portekiz)	W-Sn	10.3	0.24
Barruecopardo (İspanya)	W-Mo	8.7	0.30
Kilba (Avustralya)	W-Mo	5.0	0.27
Dzhida (Rusya)	W-Mo	1.4	0.15

Türkiye’de 10’un üzerinde ilde tungsten yatağı tespit edilmiştir. Bu yataklar Amasya (Merzifon/Bakırçay deresi), Bursa (İnegöl/Mesruriye, Orhaneli/Fındıcak ve Değirmendere, Merkez/Uludağ), Bilecik (Söğüt/Dudaş), Çanakkale (Yenice/Maden burun), Elazığ (Keban/Kebandere içi), Eskişehir (Merkez/Mayıslar, Sivrihisar), Kütahya, Niğde (Gümüşler), Kırklareli (Demirköy), Kırıkkale (Keskin/Çelebidağ), Kırşehir (Kaman/Kızıl) ve Yozgat (Akdağmadeni/Akçakışla)’da bulunmaktadır (Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, 1977; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2019).

Türkiye’deki en büyük tungsten rezervi Bursa ili Uludağ mevkiinde bulunmaktadır. Bu yatağın toplam rezervi 16587177 tondur. Bunun 6698338 tonu %0.44 WO₃ tenörlü görünür; 796638 tonu %0.41 WO₃ tenörlü görünür+muhtemel; 5302171 tonu %0.39 WO₃ tenörlü muhtemel, 3790030 tonu da mümkün rezervedir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü,

2010a). Bursa ili Uludağ mevki şelit yatağının özelliklerinden Temur (2001) şu şekilde bahsetmiştir:

Uludağ'ın zirvesinin 750 metre kuzeydoğusunda, 2200-2300 metre yükseklikte yer almaktadır. Cevherleşme mermerleri kesen üst Paleozoyik yaşlı granitoidlerle ilişkilidir. Mermerler yatık bir senklinal şeklinde kıvrılmışlardır. Yataklar mermerlerin tabanında, granitlerin üst zonlarında bulunmaktadır. Ana cevher Üst, Orta ve Alt olmak üzere üç kuşak halindedir. Alt Kuşak granitlerin içinde, Orta ve Üst Kuşak ise skarn zonunda yer almaktadır. Alt Kuşak'da şelitle birlikte volframite rastlanmaktadır. Breşik yapılıdır. 5-55 metre arasında kalınlık gösterir. %0.8 WO₃ tenörlüdür. Orta ve Üst kuşaklarda cevherin yayılımı daha geniştir. Ortalama %0.6 olan tenör yer yer %5'e kadar çıkmaktadır (s. 248,249).

Sahada tenörü %0.3-0.5 WO₃ arasında değişen beş ayrı cevherli zon bulunmaktadır. Burada 1988 yılında 89 bin ton tüvenan cevher zenginleştirilerek, 350 ton konsantre tungsten (%40 WO₃) elde edilmiştir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2019).

Granitlerden beslenen yüksek sıcaklıklı gaz ve çözeltiler tabaka ve kırık yüzeyleri boyunca karbonatlı kayaları metazomatoza uğratmışlardır. Böylece taktit zonları ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan mermer-granit kontaktında ortaya çıkan breşik kısımlar cevherleşerek yatak oluşturmuştur. Uludağ şelit yataklarında şelite volframit, manyetit, hematit, pirit, kalkopirit, sfalerit, kübanit, pirrotin, bizmutinit, bursayit eşlik etmektedir. Gang mineralleri ise diyopsit, hedenberjit, granatlar, tremolit, aktinolit, kuvars, epidot ve serisitir (Temur, 2001: s. 249).

Bilecik ili Dudaş sahasında %0.4 WO₃ içerikli 10000 ton mümkün rezerv; Çanakkale ili Yenice ilçesinde %0.5-10 CaWO₄ içerikli ekonomik olmayan bir rezerv; Elazığ ili Soğanlıköy sahasında %0.26 Mo, %0.051 WO₃ içerikli rezerv; Kırıkkale ili Çelebidağ sahasında ortalama %0.52 WO₃, %0.09 manyetit, %0.3 kassiterit içerikli 5000 ton görünür, 70000 ton muhtemel rezerv; Kırklareli ili Demirköy sahasında %0.3-0.4 Cu, %0.01-0.02 Mo, %0.01 WO₃ içerikli 8000000 ton görünür+muhtemel rezerv; Niğde ili Gümüşler sahasında %0.1 WO₃ içerikli 100000 ton mümkün rezerv belirlenmiştir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2010b; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2010c; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2010d; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2010e; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2010f; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2010g).

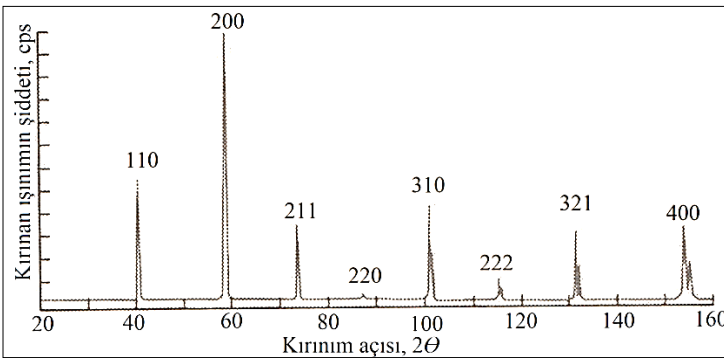
Tungsten, çok yüksek erime noktası aralığına sahip, gri-beyaz renkli katı bir refrakter metaldir. Bağ enerjisi 849 kJ/mol olup, ergime sıcaklığı 3390-3423°C ve kaynama noktası ~5930°C'dir. Yeniden kristalleşme sıcaklığı 1200°C'dir. Ortalama tane boyut dağılımı sırasıyla D10=2.64 µm, D50=6.58 µm ve D90=15.23 µm olan tungsten metalinin 20°C'deki bağlı yoğunluğu 19.35 g/cm³'tür. 3000°C'de buhar basıncı 1.0E-7 Pa sonucu ile çok düşük bir

değerdedir. Damıtılmış sudaki tungsten metalinin çözünmesine koruyucu olmayan bir oksit filminin oluşumu eşlik etmektedir. Tungsten metalinin çözünmesinin dengelenmesinin birkaç gün sürdüğü ve çözünmenin ilk altı saatten sonra yavaşladığı bulunmuştur. Tungstenin çözünmüş oksijen varlığında çözünmesinin, çözünmüş oksijen yokluğunda çözünme hızından bir kat daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. 25°C sıcaklıktaki suda çözünürlüğü 16509.0 $\mu\text{g/L}$ 'dir. Tungsten metali için kendiliğinden tutuşma sıcaklığının 310°C olduğu raporlanmıştır (Brown ve Pitfield, 2014; Callister ve Rethwisch, 2015; European Chemicals Agency, 2023).

Tablo 6'da ticari saflıktaki tungsten metalinin önemli özellikleri olan elastik modül, kayma modülü, poisson oranı, elektrik öz direnci, elektrik iletkenliği, akma dayanımı, çekme dayanımı, yüzde kopma uzaması cinsinden süneklik, ısıl genleşme katsayısı, ısı iletim katsayısı, özgül ısı ve Lorentz sabiti (L) değerleri verilmiştir. Şekil 5'de ticari saflıktaki bir tungsten toz örneğine ait X-Işınları kırınımı grafiği görülmektedir.

Tablo 6: Tungsten metalinin oda sıcaklığındaki bazı özellikleri. (Callister ve Rethwisch, 2015)

Elastik Modülü, GPa	407
Kayma Modülü, GPa	160
Poisson Oranı	0.28
Elektrik Öz Direnç, $\Omega \cdot \text{m}$	5.3×10^{-8}
Elektrik iletkenliği, S/m	18.2×10^6
Özgül Isı, J/kg·K	138
Isıl Genleşme Katsayısı, $10^{-6}(\text{°C})^{-1}$	4.5
Isı İletim Katsayısı, W/m·K	155
Lorentz sabiti L, $\Omega \cdot \text{W}/(\text{K})^2 10^{-8}$	3.20
Akma Dayanımı, MPa (<i>ksi</i>)	760 (110)
Çekme Dayanımı, MPa (<i>ksi</i>)	960 (139)
Kopma Uzaması, %	2



Şekil 5: Tungsten toz örneğinin X-Işınları kırınımı diyagramı (Smith, 2001)

Teknolojik açıdan en stratejik kompozitler, takviye fazının elyaf şeklinde bulunduğu kompozit malzemelerdir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin temel özelliği genellikle düşük ağırlığa sahip, yüksek dayanımlı ve/veya yüksek elastik modüllü olmalarıdır. Bu özellikler, özgül elastiklik modülü ve özgül dayanım terimleri ile ifade edilmektedir. Sırasıyla çekme dayanımının özgül ağırlığa oranı ve elastiklik modülünün özgül ağırlığa oranı olarak tanımlanır. Olağan dışı özgül dayanıma sahip olan elyaf takviyeli kompozitler düşük yoğunluklu elyaf ve matris malzemeleri ile üretilebilirler. Çap ve özelliklerine göre elyaf; visker (sakalcık), elyaf ve tel olmak üzere üç gruba ayrılır. Viskerler ve elyaf grubu malzemeler çalışma konumuzun dışında kalmaktadır. Metalik teller grubu ise genellikle çelik, tungsten ve molibdenden yapılmaktadır. İnce teller göreceli olarak kalın çaplıdır. Teller, otomobil lastiklerinde radyal çelik takviye olarak, roket gövdesinde elyaf sarma ile hazırlanarak ve yüksek basınç hortumlarında tel sarma ile hazırlanarak kullanılır. Elyaf takviyesi olarak tel formunda kullanılan tungstenin çekme dayanımı 2.89 GPa, özgül dayanımı 0.15 GPa ve özgül modülü 21.1 GPa'dır (Callister ve Rethwisch, 2015).

Aşındırıcı olarak kullanılan doğal veya sentetik elmasın oldukça pahalı olması sebebiyle tungsten karbür, silisyum karbür, silika kumu veya alüminyum oksit gibi aşındırıcı seramikler tercih edilmektedir. Tungsten metalinin en önemli tüketim ürünü olan tungsten karbür (WC), aşındırıcı seramik bir malzeme olarak yüksek aşınma dayanımı, yüksek sertlik ve yüksek kırılma dayanımı gibi özelliklere sahiptir. Tungsten karbürün Vickers sertlik değeri 22.1 GPa'dır (Callister ve Rethwisch, 2015).

2. YAPI SEKTÖRÜNDEKİ UYGULAMA ALANLARI

20. yüzyılın başlarında tungsten metali sadece akkor ampullerde filaman olarak ve çelikte alaşım elementi olarak kullanılırdı. Günümüzde ise oldukça yaygın kullanım alanına sahip olup aydınlatma, elektronik, yüksek sıcaklık teknolojisi, tıp, havacılık, askeri kullanımlar, spor vb. gibi oldukça farklı alanları kapsamaktadır. Tungsten özellikle ısı direncinin de gerekli olduğu yerlerde çelik alaşımlarına sertlik ve mukavemet kazandırmak için kullanılır.

Saf metalik tungstenin son derece yüksek erime noktası, iletkenliği ve sünekliği kombinasyonu, özellikle akkor ampulde filamentler, deşarj aydınlatma elektrotları ve vakum tüpleri ile ısıtma elemanları gibi elektrik ve elektronik uygulamalar için onu ideal hale getirmektedir. Tungstenin yapı sektöründeki önemli kullanım alanlarından birisi aydınlatma endüstrisidir. 90'lı yıllarda dünya çapındaki yıllık tungsten üretiminin yaklaşık %4-5'i aydınlatma endüstrisi tarafından tüketilmekteydi. Örneğin, 1995 yılında dünya çapında ~10.5 milyar akkor lamba üretilerek, en büyük pazarı oluşturmaktaydı. Ancak LED'lerin (light-emitting diodes) ortaya çıkması ile birlikte akkor ampullere olan talep azalmıştır. Bu yeni teknolojinin hem daha ucuz hem de çevre için daha uygun olması tercih edilme sebepleridir. Son

teknoloji ürünü olan beyaz LED'ler geleneksel 60 W akkor ampullerden 25 kata kadar daha uzun ömürlüdür ve %75'in üzerinde daha fazla enerji tasarrufu sağlayabilir. Bu tesislerin kurulumu 2-4 kat daha yüksek yatırım maliyeti getirir. Ancak, nominal elektrik fiyatları ve kullanım açısından, LED'lerin yıllık maliyeti akkor ampullere göre 3-6 kat daha az olabilir. LED'ler geri dönüştürülebilir özelliğe sahiptir. Hükümetler, son on dört yıldır enerji verimliliği standartlarını genişletti ve sıkılaştırdı. Avrupa Birliği 2009'da akkor ampulleri yasaklamaya başladı ve Eylül 2018'de yasağı halojen ampulleri de kapsayacak şekilde genişletti. Dünyadaki en büyük ampul üreticisi olan Çin, Ekim 2016'da akkor ampullerin (15W ve daha yüksek) satışını ve ithalatını yasakladı. Dünya çapında üretilen küresel elektrik enerjisinin yaklaşık olarak %19'u birkaç milyar lambanın ışık üretimi için kullanılmaktadır. Bu enerji tüketiminin büyük bir kısmını deşarj lambaları (yaklaşık %70) ve sadece minör kısmını (yaklaşık %30) akkor lambalar oluşturmaktadır. Işık tüketim pazarının %80'i profesyonel aydınlatmaya (sanayi, ticaret, kamu) ve sadece kalan %20 özel tüketicilere aittir. Son kırk yılda, akkor lambalar kademeli olarak daha verimli olan deşarj lambaları (CFL, floresan tüpler, HP civa buharı, metal halojenür, LP-sodyum veya HP sodyum, kısa ark lambaları) ve IRC- (kızılötesi kaplamalı) halojen lambalar ile yer değiştirdi. Daha verimli ışık kaynaklarının bu evrimsel değişimi, aydınlatma alanındaki tungsten tüketimini hiç düşürmedi. Çünkü tüm bu lambalar, ya sarmal filamanlar olarak ya da çeşitli şekillerdeki bir elektrot malzemesi olarak tungsten içermektedirler.

Tıpta X-ışınları tüplerinde hem filament hem de hedef metal genellikle tungsten veya tungsten alaşımıdır. Alaşimsız tungsten elektronik devre ara bağlantılarında, vakumlu metalleştirme fırınlarındaki filamentlerde ve otomotiv ateşleme sistemlerindeki dağıtım noktaları gibi elektrik bağlantılarında kullanılır.

Günümüzde tungsten için ana uygulamalar "sert metaller" yani kesme, delme ve aşınmaya dayanıklı parçalar veya kaplamalar için kullanılan tungsten karbür ve semente karbürlerdir. Tungsten karbür (WC) metal işleme (WC pazarının %40'ı), madencilik (%30) ve petrol (%20) endüstrilerinde önemli bir malzemedir. Başlıca uygulamaları özellikle yüksek sıcaklıklara dayanabilen takım tezgâhlarıdır (örneğin zımbalar, matkap uçları, kiremit ve cam kesiciler). Takım tezgâhları, sanayide imal edilen herhangi bir ürünün ortaya çıkmasında kullanılmaktadır. Bazı ürünler direkt olarak takım tezgâhı ile üretilirse de, takım tezgâhı ile imal edilmiş bir makine ya da kalıp kullanılarak üretilmektedir. Bu açıdan bakıldığında yapı sektörü içerisindeki bazı ürünler veya bazı ürünlerin ortaya çıkması için kullanılan birçok makine ve alet edevat, tungsten karbür içerikli takım tezgâhlarında üretilmektedir. Bunun dışında tungsten karbür zırh delici mühimmat, spor malzemeleri, çizilmeye dayanıklı mücevherat ve tükenmez kalem uçlarındaki dönen küre gibi eşyalarda kullanılmaktadır.

Tungsten, çeliğin özelliklerini geliştirmek için sistematik olarak çelikle alaşımlandırılan ilk elementlerden biridir. Yüksek hız çelikleri, ısıya dayanıklı çelikler ve takım çelikleri gibi özel çelik alaşımlar, çoğunlukla metal kesme ve uzmanlık gerektiren mühendislik alanlarında kullanılır. Yüksek hız çeliği (HSS) takım çeliğinin bir türüdür. Bu tür çeliklerde tungsten yaygın kullanılan ısıya dayanıklı bir alaşım elementidir. Yüksek hız çeliği geçmişi daha eski olan yüksek karbonlu çeliklerden daha üstün özelliklere sahip olup, daha yüksek sıcaklıklarda sertliğini kaybetmeksizin dayanabilmektedir. Bu özellik HSS'nin yüksek karbonlu çelikten daha hızlı kesmesine olanak sağladığı için bu ismi almasına neden olmuştur. Yüksek hız çeliğinin eklenen metallerin kombinasyonuna göre birçok farklı türleri ve tanımları vardır.

Süper yüksek hız çelikleri çok yüksek aşınma direnci, geliştirilmiş sıcaklık direnci veya bu özelliklerin her ikisine sahiptir. Bu çelikler yüksek kesme hızları, kuru veya yarı kuru kesme veya sadece takım ömrünü en üst düzeye çıkarmak için kullanılır. Yüksek sertlik ve aşınma direnci nedeniyle HSS ve sert metaller arasında bazı derecelerde bir köprü sağlandığı kabul edilir. Isıl işlem (genellikle bir lazer veya elektron ışını ile), yüzey bitirme ve kaplamalar önemli ölçüde gelişmiş HSS takım performansı sağlayabilir.

Tungsten içeren süper alaşımlar çeşitli zorlu ortamlarda çok yüksek korozyon ve aşınma dirençlerine sahip olduğundan dolayı havacılıkta, gaz türbini ve deniz türbini endüstrilerinde özel uygulamalara sahiptir. Baca gazı desülfürizasyon sistemleri ile ısı eşanjörleri, endüstriyel fırınlar, aşınma kalkanları ve jet motoru yanma odaları gibi kimyasal işleme bileşenleri örnek uygulamaları içerir.

Geleneksel tungsten ağır metal alaşımlarının (WHA) yüksek yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek süneklik, iyi korozyon direnci, yüksek radyasyon adsorpsiyonu yeteneği ve oldukça yüksek tokluk gibi kendine özgü özellikleri, X-ışınları ve radyasyon kalkanı, balans ağırlığı, kinetik enerji deliciler, titreşim sönümlenme cihazları, radyoaktif izotop muhafazası için tıbbi cihazlar, ağır hizmet elektrik temas malzemeleri ve jiroskoplar gibi çeşitli savunma ve sivil uygulamalar için onları uygun nitelikte yapmaktadır. Ekolojik zehirlenme endişeleri nedeniyle balıkçılıkta ağırlık olarak kurşun yerine WHA'lar kullanılmıştır. Bir oranda kalay, bakır veya naylon içeren bir tungsten alaşımı, av tüfeği saçmalarında kurşun saçma yerine de kullanılır.

Tungsten-bakır (WCu) alaşımları mükemmel termal ve elektriksel iletkenliğe sahip olan yoğun, yüksek performanslı ile kolayca işlenebilir malzemelerdir. WCu alaşımlarının elektrik bağlantısı, yüksek gerilim anahtarları, elektrotlar, devre kesiciler, refrakter parçalar, kendi kendini soğutan soğutucular gibi kullanımları oldukça yaygındır. Elektrotlar olarak düşük aşınma ve yüksek kontur keskinliğini koruma sergilerler.

Molibden-tungsten (MoW), tungsten-renyum (WRe), tantal-tungsten (TaW) ve niyobyum-tungsten (NbW) dâhil olmak üzere birkaç diğer tungsten alaşımı da mevcuttur. Bu alaşımlar üstün mukavemet, korozyon direnci,

sıcaklık kararlılığı vb. gibi özelliklere sahiptir. Cam, havacılık ve elektrik endüstrilerinde uzmanlık gerektiren uygulamalarda kullanılır.

Ara tungsten ürünlerinin çoğu kendi başlarına kullanır. Örneğin, amonyum paratungstat (APT) porselen endüstrisinde veya katalizörlerde renklendirici olarak kullanılabilir. Amonyum metatungstat (AMT) tıbbi teşhis sırasında kimyasal analiz için bir reaktif veya korozyon önleyici olarak kullanılır. Tungsten trioksit (WO_3) seramikler ve boyalarda katalizör veya pigment olarak kullanılabilir.

Tungsten ek olarak, yüksek ışık salıyıcı gerektiren kullanımların (fotolitografi, yarı iletken teknolojisi, IMAX projeksiyonu) veya modern lazer teknolojisinin yanı sıra ayrıca çevresel endüstri alanlarında (su temizleme) giderek daha fazla uygulama bulmaktadır (Brown ve Pitfield, 2014; Schade, 2010; Schubert ve Lassner, 1999; Sutherland, 2019).

3. DÜNYA FAALİYETLERİ

2019 yılı sonlarında başladığı tespit edilen COVID-19 salgını nedeniyle bazı ülkelerin madencilik faaliyetlerinde yavaşlamalar olduğu görülmektedir. Tungstenin, şimdiye kadar ekonomik olarak işlenebilir olduğu kanıtlanmamış yataklarını da kapsayan dünya rezervleri toplamı yaklaşık olarak 7 milyon ton (tungsten metali ile sınırlı) civarındadır. Kaynakların %30'unun volframit (yüzde 76.5 tungsten trioksit) ve %70'inin şelit (%80.5 tungsten trioksit) cevherleri olduğuna inanılmaktadır (Brown ve Pitfield, 2014).

Tungsten yaklaşık olarak 20 ülkede çıkarılmaktadır. Bu üretici ülkelerin en büyüğü olan Çin, 2021 yılı verilerine göre dünya toplam tungsten üretiminin dörtte üçünden fazlasını oluşturmaktadır.

3.1. Üretim

Dünya tungsten kaynakları coğrafi olarak yaygındır. Çin, tungsten kaynakları ve rezervleri açısından dünyada ilk sırada yer almaktadır. Ayrıca en büyük yataklardan bazılarına sahiptir. Antarktika hariç her kıtada önemli tungsten kaynakları tespit edilmiştir. Bazı ülkelerin tungsten rezerv miktarları Tablo 7'de verilmiştir. Birçok ülkede tungsten metaline ait rezerv tespit çalışmaları yapılmadığı için bu ülkelere ait net bir rezerv miktarlarının verilebilmesi mümkün değildir.

Tungsten cevherinin kalitesi tenörüne, safsızlık miktarına, yapısına ve tane boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Tungsten konsantrisindeki Au, Ag, Cu, Mo, Zn, Bi, Sn, Sb, Sn, Nb, Ta, Be ve REEs içeren bileşimlerin ekonomik değer taşıyan kısımları zenginleştirme aşamasında yan ürün olarak kazanılmaktadır. Eğer maden yatağında tungsten cevherinden başka bir metal işletilmeyecekse, en düşük ekonomik tungsten tenör değerinin %0.3-0.5 WO_3 olması gereklidir. Çok büyük rezerve sahip ve üretim kolaylığı olan maden yataklarında ekonomik tenör %0.2 WO_3 değerine kadar inmektedir. Zenginleştirme işleminden sonra konsantrenin WO_3 tenörünün %60 olması ve sülfür ve fosfat miktarının düşük olması istenilmektedir. Cevher özelliklerine

göre elle ayıklama, yerçekimi, flotasyon, manyetik ayırma, özütleme, ergitme, kavurma ve elektrostatik gibi zenginleştirme yöntemleri uygulanabilir (Yıldız, 2014).

Tablo 7: Bazı ülkelerin tungsten rezervi. (U.S. Geological Survey, 2023; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2019)

Ülkeler	Rezerv (ton)	Pay (%)
Türkiye	67300	1.77
Çin	1800000	47.37
Rusya	400000	10.53
Vietnam	100000	2.63
İspanya	56000	1.47
Avusturya	10000	0.26
Portekiz	3100	0.08
Diğer ülkeler	1363600	35.88
Toplam	3800000	99.99

Tungsten içeren kayalar çoğunlukla magmatik kökenli olup, damar veya pegmatitler içerisinde dağılmış olarak bulunmaktadır. Değme bölgelerinde oluşmuş şelit içeren mineraller florit, kalsit, piroksen, garnet, kuvars ve sülfür içermektedir. Tungsten için plaserler de önemli üretim kaynaklarıdır. Volframit ve şelit kırılma bir özelliğe sahip olduğundan dolayı öğütülmeleri kolaydır. Bu nedenle ince tane boyutlarına öğütülmeleri, metal kaybına sebep olabilir. Bu tip cevherlerin öğütme aşamasında şlam olmaya yatkın olmaları nedeniyle, serbestleşme boyutuna ulaşıldıktan sonra daha fazla öğütülmeleri gerekmektedir.

Yerçekimi yöntemiyle zenginleştirme devrelerinde %20-30 oranında tungsten şlam olarak ayrılmaktadır. Bu şlam içerisindeki tungstenin işletmenin ekonomisine kazandırılması için flotasyon devrelerinin kurulması gerekmektedir (Yıldız, 2014).

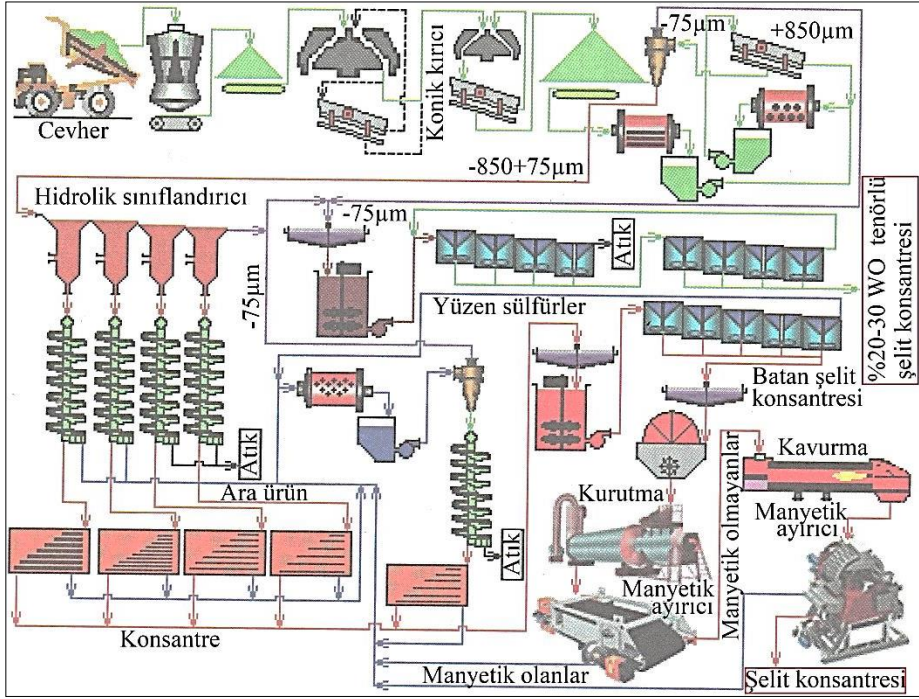
Tablo 8’de gösterildiği gibi, sert kaya yatakları volframitin ve şelitin başlıca kaynaklarıdır. Bununla birlikte, volframit plaser birikintilerinden de geri kazanılabilir. Günümüzde, skarn, damar/stokvörk, porfir ve tabakamsı (stratabound) yataklarda tungsten üretimi yapılmaktadır. Tungsten üretiminin sadece küçük bir miktarı dissemine, pegmatit, breş, salamura ve plaser yataklardan kaynaklanmaktadır.

Şekil 6’da şelit ve volframitin zenginleştirilmesi için örnek bir akım şeması verilmiştir. Bu akım şemasında, zenginleştirme işleminde bazı zorluklarla karşılaşmamak için öncelikle ağır mineraller flotasyon işlemi ile alınmaktadır. Daha sonra seçimli flotasyon uygulanarak prit yüzdürülmektedir. Son aşamada ise volframit ve şelit flotasyon yöntemiyle ya da düşük kapasiteli şlam masaları ile zenginleştirilmektedir.

Tablo 8: Dünyadaki tipik tungsten yataklarının değişkenleri. (Han ve ark., 2021)

Yatak Tipi	İşleme Yöntemi	Cevher Kalitesi %WO ₃	Tungsten Minerali	Eşlik Eden Ekonomik Metaller	Dünyadaki Maden Örneği
Skarn (yatak boyutu <10 ⁴ -5×10 ⁷ t)	Manyetik Yerçekimi Flotasyon	0.3-1.4	Şelit	Cu, Mo, Zn, ve Bi	Vostok-2 (Rusya), Uludağ (Türkiye), Mactung and Cantung (Kanada), Sang Dong (Güney Kore), King Island (Avustralya)
Damar/stokvörk (yatak boyutu <10 ⁵ -10 ⁸ t)	Manyetik Yerçekimi Flotasyon Ağır ortam Kimyasal liç	Değişken	Volframit	Sn, Cu, Mo, Bi ve Au	Panasqueira (Portekiz), Xihuashan (Çin), Bolsa Negra (Bolivya),Erzgebirge (Çek Cumhuriyeti), Hemerdon (UK)
Porfir (yatak boyutu <10 ⁷ -10 ⁸ t)	Yerçekimi Flotasyon	0.1-0.4	Volframit ve/veya şelit	Mo, Bi ve Sn	Xingluokeng (Çin), Yangchulin (Çin), Northern Dancer (Kanada),Climax (ABD)
Disemine (yatak boyutu <10 ⁷ -10 ⁸ t)	Manyetik Yerçekimi Flotasyon	0.1-0.5	Volframit ve şelit	Sn, Bi ve Mo	Shizhuyuan, Xihuashan ve Dangping (Çin), Akchatau, Kara-Oba ve Lultin (Rusya)
Tabakamsı (yatak boyutu <10 ⁶ -10 ⁷ t)	Yerçekimi Flotasyon	0.2-1.0	Şelit	Mo	Mittersill (Avusturya), Damingshan (Çin), Mount Mulgine(Avustralya)
Breş (az miktarda üretim)	Manyetik Yerçekimi Flotasyon	0.14-1.0	Volframit	Cu, Mo, Ag, Sb ve Sn	Wolfram camp(Avustralya), Doi Ngom ve Khao Soon (Tayland), Washington (Meksika)
Pegmatit (yatak boyutu <10 ⁶ -10 ⁷ t)	Flotasyon	0.5-0.8	Şelit ve/veya volframit	Li, Be, Nb, Ta, REEs ve Sn	Okbang mine (Güney Kore), Mawchi mine (Myanmar)
Plaser (yatak boyutu <3×10 ⁴ -10 ⁷ t)	Manyetik Yerçekimi Flotasyon	0.43	Volframit ve şelit	Sn	Heinze Basin (Myanmar), Andrew mine (ABD), Mergui district (Myanmar), Dzhida district (Rusya), Bodmin Moor (UK)
Salamura/evaporit (yatak boyutu <10 ⁴ -10 ⁵ t)	Kimyasal İyon değişimi	7×10 ⁻⁴	Göl tuzları	Karmaşık karışım tuzları	Searles Lake (ABD), other examples in the CIS ve the western ABD

Zenginleştirme işleminden sonra elde edilen konsantrenin ekonomik sayılabilmesi için WO_3 değerinin %65-70 olması gerekmektedir. Bazı cevherler karmaşık mineralojik yapıya sahip olduklarından dolayı zenginleştirme işlemi sonunda düşük tenöre sahip olmaktadır. Metal kazanım oranı, konsantr tenöründen daha önemli ise konsantr tenörünün WO_3 değeri %10-30 olabilir. Bu düşük tenörlü konsantrler sentetik şelit ve amonyum paratungstat (APT) tesislerine gönderilebilir (Yıldız, 2014).



Şekil 6: Volframit ve şelitin zenginleştirme tesisi akım şeması (Yıldız, 2014)

2021 yılı verilerine göre başlıca tungsten üreticisi ülkeler üretim miktarları göz önüne alındığında Çin, Vietnam, Rusya, Ruanda, Bolivya, Avusturya, İspanya, Portekiz, Güney Kore ve Brezilya olarak sıralanabilir. Diğer ülkelerin üretim değerleri düşük seviyelerdedir. Türkiye’de gerekli teknolojik yatırımların yapılmaması ve çeşitli nedenlerden dolayı 1990’lı yıllardan bu yana tungsten üretimi yapılmamaktadır.

Dünya tungsten üretim miktarı 2018 yılında 79947 ton iken 2021 yılına bakıldığında 100669 ton olduğu görülmektedir (Tablo 9). 20722 ton kadar bir artış gözlenmiştir. 2018-2021 yılı periyodunda en yüksek üretim miktarı 2021 yılında elde edilmiştir. Üretim miktarındaki bu artışın sebebi tüketim miktarının artışına bağlı olabilir. 2021 yılındaki tungsten üretiminin yaklaşık olarak %95’lik kısmını Çin, Vietnam, Rusya ve Ruanda oluşturmaktadır.

Dünya tungsten üretimine bakıldığında, Çin lider konumda olan ülkedir. Onu Vietnam takip etmektedir. Çin, küresel toplamın yaklaşık %47'si ile dünyanın en büyük tungsten cevheri kaynaklarına sahiptir. Sadece Xihuashan'daki toplam ham rezerv miktarı 81.3 milyon tondur. Çin'de en yüksek miktarda tungsten üretimi Hunan ve Jiangxi şehirlerinde yapılmaktadır.

Tablo 9'da, 2018 yılından 2021 yılına kadar olan süreçte Çin, Vietnam ve Burundi'de tungsten üretim miktarlarının bir önceki yıla kıyasla arttığı söylenebilir. 2020 ve 2021 yılları kıyaslandığında ise Portekiz, Güney Kore, Kongo, Myanmar ve Moğolistan'da tungsten üretim miktarlarının azaldığı, Vietnam, Rusya, Ruanda, Bolivya, Avusturya, İspanya, Burundi, Tayland, Meksika, Nijerya ve Uganda'da ise tungsten üretim miktarlarının arttığı gözlenmiştir.

Tablo 9: Ülkelerin 2018-2021 yılları arasındaki tungsten üretimi (ton). (British Geological Survey, 2023)

Ülkeler	2018	2019	2020	2021
Çin	64938	75452	76000	76000
Vietnam	4350	4816	8066	15858
Rusya	2661	2825	2692	2700
Ruanda	1039	1303	956	1281
Bolivya	1043	813	1030	1194
Avusturya	936	892	896	919
İspanya	856	414	238	643
Portekiz	715	518	535	502
Güney Kore	1370	1100	1192	500
Brezilya	400	400	400	400
Burundi	118	164	182	185
Kongo	230	246	137	127
Kırgızistan	100	100	100	100
Tayland	81	45	70	72
Myanmar	303	220	118	71
Moğolistan	543	463	42	40
Meksika	45	15	32	40
Nijerya	66	13	13	20
Uganda	144	110	9	10
Avustralya	5	5	5	5
Özbekistan	4	2	2	2
Dünya toplamı	79947	89916	92715	100669

3.2. Tüketim

Tungsten cevherinin uluslararası tanımlamada, “Tungsten cevherleri ve zenginleştirilmiş tungsten cevherleri (harmonized system code: 2611)” üst

kategori altında, “Tungsten cevherleri ve konsantreleri (harmonized system code: 261100)” olarak sınıflandırıldığından bahsedilmiştir.

261100 kodlu kategoride bazı tanımlamalar bulunmaktadır. Bu tanımlamalara göre, tungsten cevherleri genellikle kalay, kurşun, altın ve bakır gibi diğer minerallerde bulunur. Bu mineraller çıkarıldığında ayrıştırılır ve tungsten çıkarılır. Tungsten konsantreleri, diğer cevherlerden tungsteni ayırma sürecinde üretilir. Tungsten, alaşımlarda çok faydalıdır ve birçok endüstriyel uygulamaya sahiptir.

2021 yılında, 261100 kodlu tungsten cevherleri ve konsantreleri dünyada toplam 217 milyon dolarlık ticaret değerine ulaşmış ve en çok ticareti yapılan 3635. ürün olmuştur. 2020 ile 2021 yılları kıyaslandığında, dünya tungsten cevherleri ve konsantreleri ihracatı %59.2 artarak 136 milyon dolardan 217 milyon dolara yükselmiştir. Tungsten cevherleri ve konsantreleri ticareti toplam dünya ticaretinin %0.001’ini temsil etmektedir.

2021 yılında tungsten cevherleri ve konsantrelerinin en büyük ihracatçıları Ruanda (51.6 milyon dolar), Rusya (33.3 milyon dolar), Bolivya (32.3 milyon dolar), Burma (18.2 milyon dolar) ve Portekiz (13.9 milyon dolar) olurken, en büyük ithalatçılar ise Çin (55.7 milyon dolar), ABD (35.1 milyon dolar), Avusturya (24.3 milyon dolar), Vietnam (20.9 milyon dolar) ve Hollanda (17.1 milyon dolar) olmuştur (OEC, 2023).

2019-2022 yılları için Türkiye’nin 2611 sınıflandırması kapsamındaki toplam ithalat rakamları Tablo 10’da yer almaktadır. Türkiye’de tungsten üretimi olmadığı için ihracat değeri bulunmamaktadır. Ayrıca 2021 yılında ithalat yapılmamıştır. Türkiye 2022 yılı verilerine göre tungsten cevheri ihtiyacı olan 200 kilogramı ithalat yolu ile karşılamış ve 147706 TL ödemiştir. 2019, 2020, 2022 yılları için ithalat yapılan ülkeler sırasıyla 4-Almanya, 8-Danimarka ve 732-Japonya olmuştur.

Tablo 10: Türkiye tungsten cevherinin dış ticaret rakamları. (Türkiye İstatistik Kurumu, 2023)

	2019	2020	2022
İthalat/kg	25	9	200
İthalat/TL	8255	7907	147706

2020-2022 yılları için Türkiye’nin 28499030000 sınıflandırması kapsamındaki tungsten karbürün toplam ithalat ve ihracat rakamları Tablo 11’de yer almaktadır. Tablo 11’de ağırlık ve fiyat olarak ithal edilen tungsten karbürün ihraç edilenden çok daha fazla olduğu görülmektedir. Türkiye 2022 yılı verilerine göre tungsten karbür ihtiyacı olan 6164 kilogramı ithalat yolu ile karşılamış ve yaklaşık olarak 6 milyon TL ödemiştir. Türkiye 2022 yılında tungsten karbür ihracatından yaklaşık olarak 850 bin TL kazanmıştır. 2022 yılı Şubat ayı içerisinde en yüksek ihracat değeri elde edilmiştir. 2022 yılı Şubat ayında İran’a 1000 kilogram tungsten karbür ihracat edilmiş ve yaklaşık olarak 800 bin TL kazanılmıştır.

Tablo 11: Türkiye tungsten karbür dış ticaret rakamları. (Türkiye İstatistik Kurumu, 2023)

	2020	2021	2022
İthalat/kg	7535	5789	6164
İthalat/TL	2675670	3223598	6161835
İhracat/kg	1	63	1115
İhracat/TL	864	112363	850243

3.3. Fiyat

Türkiye’de, yer kabuğunda ve su kaynaklarında doğal olarak bulunan, ekonomik ve ticari değeri olan petrol, doğal gaz, jeotermal ve su kaynakları dışında kalan her türlü madde, 5177 sayılı kanuna göre madendir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından Maden Kanununda IV.Grup (c) bendi madenler grubunda ruhsatlandırılan tungstenin (volframit ve şelit) ülkemizde üretimi yapılmadığı için ocak başı satış fiyatı bulunmamaktadır.

2022 yılı %65 WO₃ konsantrite tungsten için Çin limanları ton fiyatı 16915 \$’dır (Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, 2023).

4. SONUÇLAR

Olağandışı özellikler, farklı sektörlerde geniş uygulama alanı, potansiyel ikame eksikliği ve coğrafi olarak yoğun üretim gibi faktörler tungsteni küresel ekonomide stratejik bir kaynak ve kritik bir element haline getirmektedir. Avrupa Birliği (AB) 2011 yılından beri tungsteni kritik hammaddelerden biri olarak listelemektedir. Ayrıca Mayıs 2018’de Amerika Birleşik Devletleri İçişleri Bakanlığı tarafından, Kritik Minerallerin Nihai Listesi 2018 (83 FR 23295) yayınlandı. Tungsten, bu listede kritik kabul edilen 35 minerale (veya mineral malzeme grubuna) dâhil edilmiştir. ABD ve AB’nin yanı sıra tungsten, Avustralya hariç her bölgede kritik bir element olarak nitelendirilir.

Çin, 1949 yılında dünya tungsten pazarına hâkim olmaya başlamış olup 70 yılı aşkın bir süredir birincil tungsten üreticisi konumundadır. Çin, 1949 ile 1985 yılları arasında %40’tan fazla, 1986 ile 2008 yılları arasında ise %66’dan fazla tungsten konsantrisi üretmiştir. 2020’de Çin, dünyadaki tungsten madeni üretiminin %82’sine ve dünya tungsten rezervlerinin %56’sına sahipti. Çin, 2017 yılından beri tungsten üretimi konusunda daha sıkı kirlilik kontrolü ve güvenlik düzenlemelerini benimsedi ve çok sayıda tungsten madencilik tesisini kapattı. Bu durum dünya pazarında tungsten arzının azalmasına ve tungsten emtia fiyatlarında yüksek volatiliteye neden oldu. Sonuç olarak, küresel tungsten talebini ve arzını dengelemek için pazarın dünya çapında yeni birincil yatakları keşfetmeye ve ikincil tungsten kaynaklarını kullanmaya güvenmesi gerekecektir.

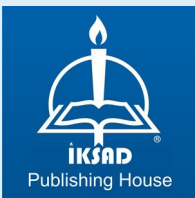
Türkiye’de konsantre tungsten üretimi Uludağ tungsten yatağından yapılmaktaydı. 1988 yılında çeşitli nedenlerden dolayı bu tesisin kapatılması sonucunda, Türkiye tungsten ürünlere olan ihtiyacını ithalat yolu ile karşılamaya başlamıştır. Türkiye’nin çeşitli yapılarıdaki tungsten ürünlere olan ihtiyacı yılda yaklaşık olarak 50 ton civarındadır. 2021 yılında, 261100 kodlu tungsten cevherleri ve konsantreleri dünyada toplam 217 milyon dolarlık ticaret değerine ulaşmıştır. Dünya tungsten ihracatının belirli ülkelerin elinde olmasına karşın, Uludağ tungsten işletmesinin tekrar aktif hale gelmesi ile Türkiye belirli bir ihracat değerine ulaşabilir. Aslında Türkiye için öncelikli olan konu, özellikle uzay ve savunma sanayisinde ihtiyacı olan tungstene dayalı teknolojik parçaların üretilebilmesi için yeni yatırımların yapılmasıdır. Bu teknolojik yatırımların yapılabilmesi için de, ihtiyacı olan cevherleri kendi öz yeraltı kaynaklarından elde etmesi ve dışa bağımlılığı azaltması gerekmektedir. Bu stratejik hamlenin gerçekleşmesi durumunda, Türkiye kendi kendine yetebilen bir ülke olabilme yolunda önemli bir adım atmış olacaktır. Sonraki aşamada ise katma değeri yüksek teknolojik tungsten ürünlerin ihracatı ile ülke ekonomisine katkı sağlanabilecektir.

Modern aydınlatma, enerji tasarrufu, CO₂ emisyonlarının en aza indirilmesi ve küresel ısınma gibi konularla ilgili mevcut tartışmalar yakın gelecekte tungsten talebi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmayacaktır.

KAYNAKÇA

- British Geological Survey. (2023). World Mineral Production 2017-2021. <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html>
- Brown, T. ve Pitfield, P. (2014). Tungsten. G. Gunn (Ed.), *Critical metals handbook* (s. 385-413) içinde. John Wiley & Sons.
- Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G. (2015). *Malzeme bilimi ve mühendisliği*. (K. Genel, Çev.). Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık (Orijinal eserin basım tarihi 2009, 8. Baskı).
- Cornelius, S. ve Hurlbut, Jr. (1982). *Mineraloji* (2. Cilt). (K. İnan, ve E. Tanyolu, Çev.). Doyuran Matbaası.
- European Chemicals Agency. (2023). Tungsten. European Union. <https://echa.europa.eu/registration-dossier/-/registered-dossier/15495>
- Han, Z., Golev, A. ve Edraki, M. (2021). A review of tungsten resources and potential extraction from mine waste. *Minerals*, 11, 701. <https://doi.org/10.3390/min11070701>
- Kurlov, A. S. ve A. I. Gusev (2013). *Tungsten carbides structure, properties and application in hardmetals*. Springer International Publishing.
- Lassner, E. ve Schubert, W. D. (1999). *Tungsten properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds*. Springer Science+Business Media.
- Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü (1977). *M.T.A. Enstitüsünce Bilinen Türkiye Yeraltı Kaynakları Envanteri No:168*. M.T.A. Enstitüsü Matbaası.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2010a). Bursa ili maden ve enerji kaynakları.https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/Bursa_Madenler.pdf
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2010b). Bilecik ili maden ve enerji kaynakları. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/Bilecik_Madenler.pdf
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2010c). Çanakkale ili maden ve enerji kaynakları. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/Canakkale_Madenler.pdf
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2010d). Elazığ ili maden ve enerji kaynakları. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/Elazig_Madenler.pdf
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2010e). Kırıkkale ili maden ve enerji kaynakları. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/Kirikkale_Madenler.pdf

- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2010f). Kırklareli ili maden ve enerji kaynakları.
https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/kirklareli_madenler.pdf
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2010g). Niğde ili maden ve enerji kaynakları.
https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/Nigde_Madenler.pdf
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2019). Dünyada ve Türkiye’de tungsten (volfram).<https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/11Tungsten.pdf>
- Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü. (2023). Maden istatistikleri.
<https://www.mapeg.gov.tr/Custom/Madenistatistik>.
- OECD. (2023). Tungsten Ore. <https://oec.world/en/profile/hs/tungsten-ore>
- Open University Geological Society. (2011). Hemerdon Tungsten Mine.
<https://ougs.org/southwest/event-reports/251/hemerdon-tungsten-mine/>
- Rieck, G. D. (1967). *Tungsten and its Compounds*. Pergamon Press.
- Schade, P. (2010). 100 years of doped tungsten wire. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28, 648-660.
- Smith, W. F. (2001). *Malzeme bilimi ve mühendisliği*. (N. G. Kınıkoğlu Çev.). Literatür Yayınları (Orijinal eserin basım tarihi 1986, 3. Baskı).
- Sutherland, B. R. (2019). Burden of energy inefficiency. *Joule*, 3(10), 2279-2281.
- Temur, S. (2001). *Metalik Maden Yatakları*. Nobel Yayın Dağıtım.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2023). Dış ticaret istatistikleri.<https://www.tuik.gov.tr/>
- Yıldız, N. (2014). *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme*. Ertem Basım.
- U.S. Geological Survey. (2023). Mineral Commodity Summaries 2023: Tungsten. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2023>.
- Uz, B. (1994). *Mineraller Kristallografi Mineraloji* (2. Baskı). Birsen Yayınevi.



ISBN: 978-625-367-350-5