

Birincil ve İkincil Mineral Kaynaklarından Nadir Toprak Elementlerinin Fiziksel ve Fizikokimyasal Yöntemlerle Üretim Proseslerinin İncelenmesi

Esra Baştürkcü^{1*}, Ceyda Şavran¹, İ. Servet Timur², A. Ekrem Yüce¹

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya ve Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*tanisali@itu.edu.tr^{ID}, savranc15@itu.edu.tr^{ID}, timur@itu.edu.tr^{ID}, yucea@itu.edu.tr^{ID}

Makale gönderme tarihi: 22.03.2021, Makale kabul tarihi: 03.06.2021

Öz

Nadir toprak elementleri (NTE), sahip olduğu özellikler sayesinde yüksek teknoloji gerektiren ürünlerde ve savunma sanayiinde kullanılmakta olup, stratejik öneme sahip olmaları ile son zamanlarda gündemdedirler. Üretim ve rezerv konusunda tekel konumunda olan Çin'in ihracata getirdiği sınırlamalar ile birlikte yüksek teknoloji üreten ülkeler kaynak arayışına başlamıştır. Ticari olarak birincil NTE mineralleri bastnazit, monazit ve ksenotimidir. Bu minerallere sahip olmayan ülkeler ikincil NTE minerallerinden [Eudialyte (Ödalit), loparit, piroklor, ankisit, aegirine (egrin)] üretimleri araştırmaya ve işlemeye başlamışlardır.

Bu çalışma kapsamında NTE mineralleri, dünyadaki rezerv ve üretim durumu, kullanım alanları gibi genel bilgilere değinildikten sonra, birincil ve ikincil mineral kaynaklarından konsantrasyon elde edilmesinde uygulanan yöntemler, yapılan çalışmalar ve proses akım şemaları ile ilgili bilgiler derlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gravite ayırması, flotasyon, konsantrasyon, NTE, zenginleştirme yöntemleri

The Investigation of Concentration Processes of Rare Earth Elements from Primary and Secondary Mineral Resources by Physical and Physico-chemical Methods

Abstract

Rare earth elements (REE) are used in products requiring high technology and the defense industry and they have recently been on the agenda with their strategic importance. With the restrictions imposed on exports by China, which has a monopoly in terms of production and reserve, other countries producing high technology have started to search for new REE resources. Primary commercial REE minerals are bastnasite, monazite, and xenotime. Countries that do not have these mineral resources have begun to search for new sources and new processes using secondary REE minerals such as eudialyte, loparite, pyrochlore, anklicite and aegirine.

Within the scope of this study, after giving general information such as REE minerals, reserves and production status in the world, and their usage areas, information about the concentration methods from primary and secondary mineral resources, case studies, and process flow charts are compiled.

Keywords: Gravity separation, flotation, concentration, REE, enrichment methods

GİRİŞ

Nadir toprak elementleri (NTE), periyodik tablodaki 17 elementi tanımlar. Atom numaraları 57'den 71'e uzanan toplam 15 element (lantanit grubu) ve yanında 3B grubunda yer alan skandiyum ve itriyum bu gruba dahildir. Bu elementlerin "nadir" olarak nitelendirilmesi, zenginleştirme yöntemleriyle seçimli olarak birbirlerinden ayrılmalarının ve saf

halde elde edilmelerinin zorluğundan kaynaklanmaktadır. Nadir toprak elementleri hafif nadir toprak elementleri (HNTE) ve ağır nadir toprak elementleri (ANTE) olarak kendi içinde iki gruba ayrılmaktadır. (Abaka-Wood vd., 2016; Suli vd., 2017; Goodenough vd., 2018). Bu elementlerin periyodik tabloda gösterimi Şekil 1'de verilmektedir.

Şekil 1. Periyodik tabloda NTE'lerin gösterimi

Nadir toprak metallere artan önemiyle beraber Çin hükümeti 2007'de nadir toprak metallerini “stratejik emtialar” olarak tanımlamıştır. NTE'lerin stratejik elementler olarak anılmasının sebeplerinden biri de savunma sanayisinde kritik rol almalarıdır. Bununla birlikte yenilenebilir enerji, hibrid araçlar, kalıcı mıknatıslar ve katalizörler gibi yüksek teknoloji gerektiren alanlarda kullanılmaktadır. Çin, tedarik zinciri boyunca nadir toprak metallere (NTM) üretimine hakimdir. Bu üretim, maden üretiminin %97'si, oksitlerin %97'si, metal alaşımlarının %90'ı, neodyum kalıcı mıknatısların %75'i ve samaryum kalıcı mıknatısların %60'ını oluşturmaktadır. Çin, sahip olduğu NTE rezervleri ve üretimindeki artış sayesinde tekel konumundadır ve hiçbir ülke bu sektörde Çin ile yarışabilir konumda değildir. Çin, kendi kontrolü altında NTE madenciliği

ve zenginleştirilmesi için çeşitli kısıtlamalar başlatılmıştır. Aynı zamanda NTE için yıllık ihracat kotalarını düşürerek bazılarının ihracatını tamamen yasaklamıştır. Çin'in üretiminin yanında tüketiminin de oldukça yüksek olması, kendi taleplerinin toplamın yaklaşık %70'ini oluşturması ile gelecekte bu talebe bağlı olarak yerli üretimin yetersiz kalabileceği gibi nedenler Çin'i NTE ithalatçısı haline getirebileceğinden, yüksek teknoloji üreten ülkelerin hem kendi ihtiyaçlarını hem de artan talepleri karşılamak amacıyla NTE üretiminin geliştirilmesi gerekmektedir (Campbell, 2014; Schuler vd., 2011; Mancheri, 2015). Tablo 1'de verilen USGS (United States Geological Survey) verilerine bakıldığında, 2019 yılına kıyasla 2020 yılında Dünya'da üretilen nadir toprak oksitlerinin miktarları yaklaşık 20 bin ton artmıştır. Bu üretimi yapan ülkelerin başında Çin gelmektedir

Tablo 1. NTE maden üretiminin Ülkelere göre dağılımı (USGS, 2021)

Ülkeler	Maden üretimi (ton)	
	2019	2020
Çin	132.000	140.000
ABD	28.000	38.000
Myanmar (Burma)	25.000	30.000

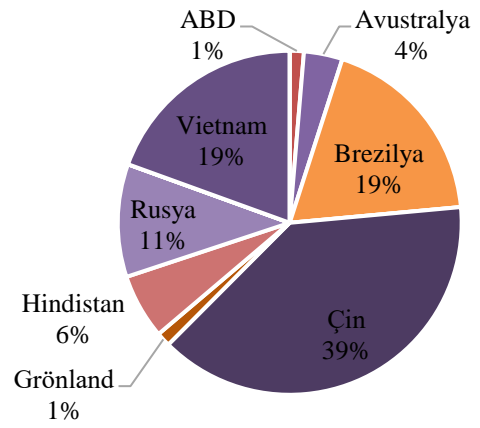
Research article/Araştırma makalesi
DOI: 10.29132/ijpas.897898

Avustralya	20.000	17.000
Madagaskar	4.000	8.000
Hindistan	2.900	3.000
Rusya	2.700	2.700
Tayland	1.900	2.000
Vietnam	1.300	1.000
Brezilya	710	1.000
Burundi	200	500
Diğer ülkeler	66	100

Üretimin yanında en yüksek tüketim yapan ülkelerin başında da Çin gelmektedir. Çin'i Japonya, ABD, Almanya ve Fransa takip etmektedir. 2015 yılı itibariyle NTE ihracatının %35'i ABD, %23,4'ü Brezilya, %9,5'i Çin, %8,5'i Avrupa Birliği, %8,3'ü Belçika'ya ve diğer ülkelere aittir. Toplam yapılan ihracat miktarı ise 7.660 tondur. 2015 yılından itibaren ithalat durumlarına bakıldığında ise toplam 5.149 ton NTE ithalatı, %18 Singapur, %17,7 Malezya, %12 Çin, %6,4 Avrupa Birliği %4 ABD, %4 ile Almanya'ya aittir (MTA, 2017).

Dünyadaki en büyük rezervlere sahip olan ülke Çin'dir. 2021 USGS verilerine göre dünya nadir toprak rezervleri yaklaşık 120 milyon tondur. NTE rezervleri ülkelere göre en yüksek rezerv %39 dilim ile Çin ve takiben %19 oranları ile Vietnam ve Brezilya gelmektedir (Şekil 2).

Kaynakların kısıtlılığı ve ticari savaşlar göz önünde bulundurulduğunda birincil kaynaklara sahip olmayan ve yüksek teknoloji üreten ülkeler alternatif kaynaklara yönelmektedir. Bu ikincil kaynaklar, endüstriyel artıklar; e-atık (hard diskler, floresan lambalar, NdFeB magnetler, vb.) ile maden artıkları; yan ürünler, kömür, kömür yıkama artıkları, termik santral taban ve uçucu külüdür (Zhang vd., 2020; Jyothi vd. 2020). Bu artıklardan NTE kazanımı ile hem çevresel sorunlara çözüm bulunmakta hem de doğal kaynakların korunması ve NTE rezervine sahip olmayan ülkeler için alternatif oluşturulması sağlanmaktadır (Costis vd., 2021)



Şekil 2. Dünya NTE rezerv dağılımı (USGS, 2021)

Nadir toprak elementlerinin temel olarak 4 farklı yatak oluşumundan söz edilmektedir. Bu yatak türleri: karbonatit, alkali-volkanik, iyon adsorpsiyon killer ve plaser yatak olarak sınıflandırılabilir. HNTE grubu mineraller karbonatit ve plaser tipli yataklarda yoğunlaşırken, alkali-volkanik kayalar ve iyon adsorpsiyon killerinde ağır NTE grubu mevcuttur (Dostal, 2017). Bu mineraller fosfat, karbonat, oksit ve silikat formlarında bulunabilmektedir. Nadir toprak elementlerinin 250'den fazla mineral yapısında yer aldığı bilinmektedir (Gupta & Krishnamurthy, 2005). Mineral oluşumuna göre HNTE bir diğer adı ile Seryum grubu, loparit, bastnazit, parisit, monazit, eshipit ve ortit minerallerinde bulunurken, ANTE/itriyum grubu elementler; itriyoparisit, samarskit, priyorit, ksenotim, gadolint gibi minerallerde yer alabilmektedir (Bulatovic, 2010).

Dünya'da ticari üretimin %95'i bastnazit, monazit ve ksenotim minerallerinden gerçekleştirilmektedir. Ticari olarak üretim yapılan maden yatakları ülke ve firma bilgileri Tablo 2'de verilmektedir. Ticari mineraller ile birlikte önemli

Research article/Araştırma makalesi
 DOI: 10.29132/ijpas.897898

sayılan ve üretim olanakları araştırılan diğer mineraller Tablo 3’de kimyasal bileşim, NTO (Nadir toprak oksit) içeriği ve cevher tipine göre gösterilmektedir.

Dünyadaki tüm yataklar göz önüne alındığında, 1927’de demir rezervi olarak keşfedilen ve

Moğolistan’da bulunan Bayan Obo yatağı, şu anda bilinen en büyük nadir toprak yataklanmasıdır. İkinci en büyük yatak ise Kaliforniya’da bulunan ve 1952’de işletmeye alınan Mountain Pass yatağıdır (Dushyanthaa vd., 2020).

Tablo 2. Dünya’da NTE üretimi yapılan sahalara ilişkin bilgiler (Dushyanthaa vd., 2020)

Firma	Ülke	Maden Yatağı
Molycorp, Inc.	ABD	Mountain Pass
Lynas Ltd.	Avustralya	Mount Weld
Avalon Rare Metals, Inc.	Kanada	Nechalacho (Thor Lake)
Alkaline Resources	Avustralya	Dubbo
Arafura Resources, Ltd.	Avustralya	Nolans Bore
Rare Element Resources, Ltd.	ABD	Bear Lodge (Bull Hill Zone)
Great Western Minerals Group, Ltd.	Kanada	Steenkampskraal
Greenland Minerals and Energy, Ltd.	Avustralya	Kvanefjeld
Quest Rare Minerals, Ltd.	Kanada	Strange Lake (B zone)
Tasman Metals, Ltd.	Kanada	Norra Karr
Stans Energy Corp.	Kanada	Kutessay II
Ucore Rare Metals, Inc.	Kanada	Bokan (Dotson)

Tablo 3. Önemli NTE mineralleri (MTA, 2017)

Mineral Adı	Kimyasal Bileşimi	Cevher Tipi	NTO, %
Allanit	(Ca,NTE,Th) ₂ (Al,Fe,Mg) ₃ Si ₃ O ₁₂ (OH)	Silikat	28
Apatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ F	Fosfat	12
Bastnazit	(Ce,La)FCO ₃	Fluorokarbonat	75
Brannerit	(U,Ca,Fe,Th,Y) ₃ Ti ₅ O ₁₆	Oksit	12
Serit	CaCe ₆ Si ₃ O ₁₃	Silikat	70
Öksenit	(Y,Ca,Ce,U,T)(Nb,Ta,Ti) ₂ O ₆	Oksit	12
Fergusonit	(Y,Sr,Ce,U)(Nb,Ta) ₂ O ₂	Oksit	46
Gadolinit	Be ₂ FeY ₂ Si ₂ O ₁₀	Silikat	48
Fluoserit	CeF ₃	Fluorür	70
Piroklor	(Na,Ca,Ce) ₂ Nb ₂ O ₆ F	Oksit	6
Samarskit	(Y,Ce,U,Ca)(Nb,Ta,Ti) ₂ O ₆	Oksit	22
Ksenotim	YPO ₄	Fosfat	62
Monazit	(Ce,La,Th,Y) PO ₄	Fosfat	65
Zirkon	(Zr,Th,Y,Ce)SiO ₄	Silikat	---

Nadir toprak elementlerinin kullanımına bakılacak olursa; 1890’lı yıllarda başlayan ve teknolojinin de ilerlemesi ile artarak devam eden trend göze çarpmaktadır. NTE’lerin yüksek elektrik iletkenliği, güçlü manyetizma ve yüksek parlaklık

gibi benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri bu elementleri vazgeçilmez bir konuma taşımıştır (Dushyanthaa vd., 2020). Nadir toprakların bilinen en önemli kullanım alanları katalizörler, nadir toprak mıknatısları, alaşımlar, toz üretimi ve fosforlardır.

Hem endüstriyel hem oto katalizörler olarak kullanılan katalizörler için genellikle lantan (La) ve seryum (Ce) kullanılır. Bu iki elementin diğer NTE'lere göre daha ucuz olmasından dolayı cam, cilalama, seramik gibi uygulamalarda da kullanımı yaygındır. Fosforlar için daha pahalı olan evropiyum (Eu) ve terbiyum (Tb) kullanılırken, magnetlerde ise neodyum (Nd), praseodim (Pr), disporisyum (Dy) ve terbiyum (Tb) kullanılmaktadır (Haque vd., 2014; Schuler vd., 2011; Dushyanthaa vd., 2020).

NTE'lerin en önemli kullanım alanlarından biri olan temiz teknoloji kapsamında yer alan ve yenilenebilir enerjinin en önemli kaynakları olan güneş panelleri ve rüzgar türbinleri için NTE'ler anahtar rol oynamaktadır. Güneş panellerinde güç dönüşüm verimliliğini artırmak amacıyla Pr, Gd, Eu ve Er elementleri nanopartikül bazlı malzemeler olarak kullanılır. Rüzgar türbinlerinde, rüzgar enerjisini elektriğe dönüştürmek için kalıcı mıknatıs jeneratörlerine ihtiyaç vardır ve bu jeneratörler içerisinde bulunan NTE'ler Nd, Tb ve Dy'dir. Hibrid elektrikli araçlarda, araçların bataryasında depolanan enerjiyi mekanik güce dönüştürmek amacıyla da NTE'ler kullanılmaktadır. NTE'lerin stratejik elementler olarak anılmasının nedenlerinden biri de askeri uygulamalarda kritik rol almalarıdır. Örneğin; samaryum kobalt (SmCo) ve neodyum demir bor (NdFeB) mıknatıslar gibi kalıcı mıknatıslar, füzeler, akıllı bombalar, saldırı cephaneleri, insansız uçaklar gibi birçok savunma uygulamasında yüksek oranda kullanılmaktadır. (Suli vd., 2017; Dushyanthaa vd., 2020; Abaka-Wood vd., 2016).

Nadir toprak elementlerinin birincil kaynaklardan konsantre üretim proseslerinde birçok parametre göz önünde bulundurulmalıdır. Zenginleştirme işlemlerinde seçilecek olan yöntemlere karar verilirken en temel unsurlar NTE mineral tipi, tane serbestleşme boyutu ve gang mineralleridir. NTE'ler oksit, fosfat, silikat, karbonat gibi farklı formlarda cevherleşmekte ve her bir tür farklı tip yataklarda oluşmaktadır. Bu yataklarda oluşan NTE minerali aynı olsa bile cevherleşme çok farklı olmakta, yan kayaçlar ve tane serbestleşmesi çeşitlilik göstermektedir. Dolayısı ile keşfedilen ve işletilen her bir saha için uygulanacak yöntem ve proses akım şeması farklılık göstermektedir. Örneğin; Karbonatit sahası olan Bayan Obo ve Mountain Pass'te temel mineral bastnazit iken Bear Lodge sahasında ankilit NTE mineralidir. Bir başka karbonatit sahası Songwe Hill'de NTE sinçesit ve

apatit ile birlikte bulunmaktadır (Goodenough et al., 2017).

Zenginleştirme işlemlerinde özgül ağırlık farkından faydalanarak ayırma, elektrostatik ayırma, manyetik ayırma ve flotasyon yöntemleri kullanılabilir (Jordan vd., 2013). Bu makale kapsamında ticari olarak üretimi yapılan birincil (bastnazit, monazit, ksenotim) ve ikincil (ödalit, loparit, piroklor, ankisit, fergusonit, egrin) NTE minerallerinin fiziksel ve fizikokimyasal zenginleştirme prosesleri güncel bir literatür derlemesi olarak sunulmaktadır.

BİRİNCİL NTE MİNERALLERİNDEN KONSANTRE ÜRETİMİ

Bastnazit

Bastnazit, bir florokarbonat mineralidir ve nadir toprak oksit içeriği yaklaşık %70'dir. Bunun ortalama %97'si Ce, La, Pr ve Nd'dir. Bastnazit genellikle karbonatlı silikat kayaçlarında izlenir. Bastnazit daha çok kalsit, barit, florit veya demir mineralleriyle bileşik halinde bulunmaktadır. Hem bastnazitin hem de yan kayacın kimyasal bileşimleri uygulanacak zenginleştirme yöntemini belirlemektedir. Bastnazitin zenginleştirilmesinde en çok tercih edilen yöntem ise flotasyondur (Yıldız, 2016; Jordens vd., 2013).

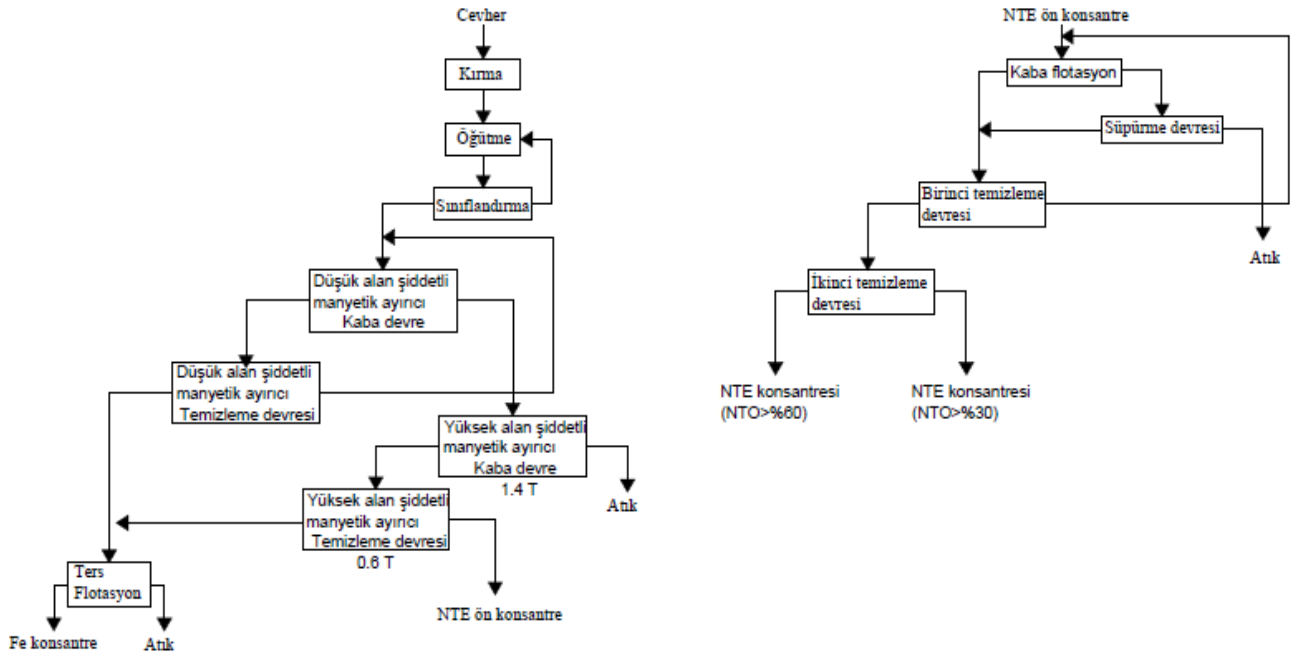
Türkiye'de Eskişehir- Beylikova Bölgesi'nde kompleks yapıda, 1 milyon tonluk, ortalama %3.42 NTO içerikli bir rezerv olup, NTE, barit, florit ve toryumla beraber bulunmaktadır. Bastnazit, bu bölgenin ana nadir toprak mineralidir. Özbayoğlu ve Atalay (2000), yaptıkları çalışmada bu bölgeden aldıkları cevheri kullanmışlardır. 1.65 mm altına kırılmış cevhere mekanik dağıtma uygulanmış, dağıtmayı takiben siklon ile ayırma yapılmış ve üst akımından %28 NTO içerikli ön konsantre niteliğinde bir şlam %72.6 verimle ayrılmıştır. Elde edilen ön konsantre, içeriği yükseltmek amacıyla Mozley multi-gravite ayırıcısına (MGS) verilmiştir. Bu zenginleştirme işlemi sonucunda bastnazit ön konsantresi %35.5 NTO içeriği ve %48 verimle üretilmiştir. Ön konsantrenin kimyasal içeriklerine bakıldığında %13.75 Ce, %11.81 La, %2.30 Nd, %1 Pr içermektedir. Ön konsantreye asit kavurması ve su liçi uygulamasıyla, %73-80 arası verimle NTE kazanımı gerçekleşmiştir.

%6 tenörlü 48 milyon ton rezervle dünyanın en büyük rezervi olarak bilinen Bayan Obo, hidrotermal kaynaklı 71 element ve 170 mineralden oluşan

Research article/Araştırma makalesi
DOI: 10.29132/ijpas.897898

kompleks bir polimetallik yataktır ve NTE, Nd ve Fe üretimi yapılmaktadır. 1927’de Fe madeni olarak keşfedilmiş, 1990’larda NTE üretimine başlanmıştır. Yatak yüksek tenörlü olmasına rağmen, nadir toprak elementleri yalnızca demir cevheri madenciliği ve zenginleştirme işlemlerinin yan ürünü olarak kazanılmaktadır. NTE’lerin %90’ı serbest olarak florit ve Fe mineralleri içerisinde yer almaktadır. 15 farklı NTE minerali bulunmasına karşın baskın olanlar basnazit ve monazittir. Bununla birlikte birçok oksitli Nd minerali bulunmaktadır. Başlıca gang mineralleri ise kuvars, apatit, dolomit ve florittir. Bu yatakta bulunan NTE minerallerinin çoğu ince tanelidir ve serbestleşme boyutu 74 ile 10 mikron arasında değişmektedir. Bundan dolayı NTE kazanımı oldukça zorlaşmaktadır (Faris vd., 2017; Li & Yang, 2014). 1950’lerden 1990’a kadar 20’ye yakın proses denenmiştir. 1990’da Changsha Metalurjik araştırma enstitüsü tarafından bugün kullanılan proses akım şeması geliştirilmiştir. 74

mikron altına öğütülen numune de, öncelikle düşük alan şiddetli manyetik ayırıcı (D.A.Ş.M.A.) ile manyetit zenginleştirilir. Artık numune yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı (Y.A.Ş.M.A.), manyetik alan şiddeti:1.4 T, ile zenginleştirilerek hematit ve NTE minerallerinin büyük çoğunluğu konsantrde kazanılır. Bir kademe daha yüksek alan şiddetli manyetik ayırma ile (manyetik alan şiddeti:0.6 T) temizleme kademesi uygulanır. Temizleme kademesinde hematit konsantrde alınırken NTE mineralleri artıktta kalmaktadır. Artıktta konsantrde olan NTE mineralleri zenginleştirilmek üzere flotasyon işlemine tabii tutulur. Düşük ve yüksek alan şiddetli Manyetik ayırıcıda zenginleştirme ile elde edilen konsantrde birleştirilerek Fe içeriğindeki safsızlıkların temizlenmesine yönelik ters flotasyon uygulanarak nihai Fe konsantrde elde edilir (Li ve Yang, 2014). Bayan Obo’nun basitleştirilmiş akım şeması Şekil 3’de verilmektedir.



Şekil 3. Bayan Obo basitleştirilmiş proses akım şeması (Li ve Yang, 2014)

NTE flotasyonunda 1970’den 1990’a kadar birçok reaktif denenmiştir. İlk olarak yağ asidi türevi olan oleik asit kullanılırken, daha sonra C_{5,9} hidroksamik asit kullanılmıştır. 1980’lerde naptelik asitten üretilen cyclic alkil hidroksamat kullanılmaya başlanmış ve %50-60 NTO konsantrde elde edilmiştir. İlerleyen yıllarda cyclic alkil ve alkil

hidroksamatların seçiciliğinin düşük olması nedeniyle aromatik hidroksamik asit olan H₂₀₅ olarak adlandırılan reaktif geliştirilmiştir. Bulunan bu yeni reaktifle birlikte aktivatör olarak kullanılan NaF’e bile gerek duyulmamıştır. 1990’lardan sonra H₂₀₅’den üretilen “No.8 flotasyon yağı” adı ile çift yönlü hidroksamik asit grubuna sahip reaktif geliştirilmiştir

Research article/Araştırma makalesi
DOI: 10.29132/ijpas.897898

olup flotasyon devresinde kullanılmaktadır (Li ve Yang, 2014).

Dünyadaki ikinci en büyük NTE yatağı, Kaliforniya'da bulunan ve MolyCorp tarafından işletilen Mountain Pass madenidir. 1960'larda işletilmeye başlayan yatağın NTO tenörü %6-12 arasındadır. İşletmenin yıllık kapasitesinin 15.000 ton olduğu bilinmektedir. Bu yatak, seryum grubu NTE'ler bakımından zengindir ve ağırlıklı olarak bastnazit ve monazit bulunmaktadır. Gang mineralleri arasında barit, kalsit, silikat, apatit, dolomit sayılmaktadır. Tesiste kullanılan zenginleştirme yöntemi flotasyondur (Yang vd., 2015; Yıldız, 2016; Abaka-Wood vd., 2016). Bastnazit cevheri, flotasyona girmeden önce %80'i 45 µm altında olacak şekilde öğütülür. Flotasyon devresine giren pülp, dört aşamalı kondüsyonlanmadan geçer ve bu aşamalarda sıcaklık 82 °C'de tutulmaktadır. İlk aşamada pH ayarlayıcı olarak kullanılan soda külü aynı zamanda gang minerallerini (barit, kalsit) bastırıcı etki gösterir. İkinci aşamada herhangi bir kimyasal eklemesi yapılmamaktadır. pH ve bastırıcı etkisinin tamamlanması beklenmektedir. Üçüncü aşamada gang minerallerini bastırmak amacıyla lignin sülfonat eklenmektedir. Dördüncü ve son aşamada ise toplayıcı olarak yağ asidi ilavesi yapılmaktadır. Kondüsyonlanma sonrası pülpün, pülpde katı oranı %40'tır ve üç aşamalı kaba flotasyon devresine verilmektedir. Kaba konsantre, dört aşamalı temizleme devresine gönderilmekte ve elde edilen konsantre %60-70 arasında NTO içeriğinde, %60-70 verimle elde edilmektedir (Anderson vd., 2016).

Monazit

Monazit, NTE üretiminin en çok yapıldığı ikinci kaynak olup genellikle sahil kumlarından zenginleştirilmektedir. Ayrıca granitler ve metamorfik kayalara bağlı minerallerde de oluşabilmektedir. Avustralya, Brezilya, Çin, Hindistan, Malezya, Güney Afrika, Sri Lanka, Tayland ve Amerika'da monazite rezervleri mevcuttur (Wall, 2014).

Karbonatit tip yataklarda baskın mineral genellikle bastnazit ve florakarbonatlı yapılar olmakla birlikte ikincil baskın NTE minerali monazittir. Dünyadaki iki büyük örneği Bayan Obo ve Mountain Pass'dir. Ülkemizde bulunan

Kızılcaören cevheri bu yatak tipine bir örnektir. Monazitin baskın bulunduğu bir diğer yatak tipi ise oksidasyon-sedimentasyon yatağıdır. Mount Weld ve Araxa bu yatak tipinin örneklerindedir (Chen vd., 2017). Sahil kumlarında bulunan monazitlerde karbonatit tip yataklara oranla daha yüksek Th ve U içeriği tespit edilmiştir (Dushyantha vd., 2020).

Monazit, genellikle rutil, ilmenit ve zirkon ile birarada sahil kumlarında yer alır. Mineral %10-40 La₂O₃, %4-12 ThO₂, %20-30 Ce₂O₃ ve yüksek miktarda Nd, Pr ve Sm içermektedir (Gupta ve Krishnamurthy, 2005).

Mount Weld yatağı, 2011 yılında işletmeye alınmıştır. Yaklaşık 2 milyon ton rezervi olan yataktan yıllık 26.5 ton NTO konsantresi elde edilmektedir (Lynas Rare Earth, t.y.). Monazitin büyük çoğunluğu ince boyutta (25 mikron altı) serbestleşebilen kompleks bir cevherdir. Monazit ile birlikte bulunan gang mineraller, demir oksitler, fosfatlar ve killerdir. Flotasyon ile zenginleştirilmenin uygulandığı bu proseste, flotasyon öncesinde şlam atılmakta olup, şlam boyutu NTE kaybı açısından önem taşımaktadır. Yapılan çalışmalarla 4 mikron altı şlamda NTE kaybı minimum olarak elde edilmiştir. Cevherin %80'i 65 mikron altına öğütüldükten ve şlamı uzaklaştırıldıktan sonra temizleme ve süpürme kademelerinin uygulandığı flotasyon zenginleştirilmesiyle nihai konsantre %58.5 içerik ve %77.5 verim ile elde edilmektedir. Köpürtücü olarak hidrokarbon yağı ile modifiye edilen yağ asidi ve monaziti canlandırmada Na₂S kullanılmaktadır. (Bulatovic, 2010).

Plaser yataklarda, monazitle birlikte bulunan başlıca mineraller ilmenit, zirkon, rutil ve kuvarstır. Manavalakurichi, Pulmoddai yatağı, Orissa ve Chavara ile Hindistandaki Aluva'da monazit bulunmaktadır (Gupta ve Krishnamurthy, 2005). Ayrıca Malezya, Güney Afrika, Hindistan'daki Kerala, Andhra Pradesh, Tamil Nadu ve Odisha yatakları da sahil kumlarındaki monazit yataklarına örnektir. Çin, Malezya ve Hindistan monazit üretiminde etkinliği ile bilinirken bu ülkeler dışında Brezilya ve Rusya da monazit üretimine giriş yapmış durumdadır (Balaram, 2019)

Sahil kumlarındaki zenginleştirme işlemi temel olarak gravite ile ayırma, manyetik ayırma ve elektrostatik ayırma işlemlerini kapsamaktadır. Bu

Research article/Araştırma makalesi
DOI: 10.29132/ijpas.897898

yöntemler, minerolojiye ve serbestleşme tane boyutuna bağlı olarak farklı kombinasyonlarla uygulanabilmektedir. Öncelikle gravite ayırma ile kuvars gibi yoğunluğu düşük mineraller ağır minerallerden ayrılmaktadır. Bu ayırma işlemlerinde sarsıntılı masa, spiral ile daha ince boyutta serbestleşen mineraller için knelson, falcon gibi santrifüjlü gravite ayırıcıları kullanılmaktadır. Gravite ayırmasında ilmenit, rutil, zirkon ve monazit ağır fraksiyonda yoğunlaşmaktadır. Elektrostatik iletkenliği olan ilmenit ve rutil ile yalıtılan monazit ve zirkon birbirinden ayrılmaktadır. Monazit paramanyetik bir mineral olup diamanyetik olan zirkondan yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı yardımı ile ayrılabilir. (Jordans vd., 2013 ; Kumari, vd. 2015; Terzi, 2017).

Mısır sahil kumlarında %30 oranda ağır mineraller (monazit, rutil, zirkon, ilmenit) mevcuttur. Moustafa ve Abdelfattah (2010) tarafından yapılmış olan çalışmada gravite ayırması ile kuvars uzaklaştırıldıktan sonra, manyetik ayırma ve elektrostatik ayırma yöntemlerini içeren çok kademeli proses akım şeması ile ağır mineraller seçimli olarak elde edilmiştir (Moustafa ve Abdelfattah, 2010).

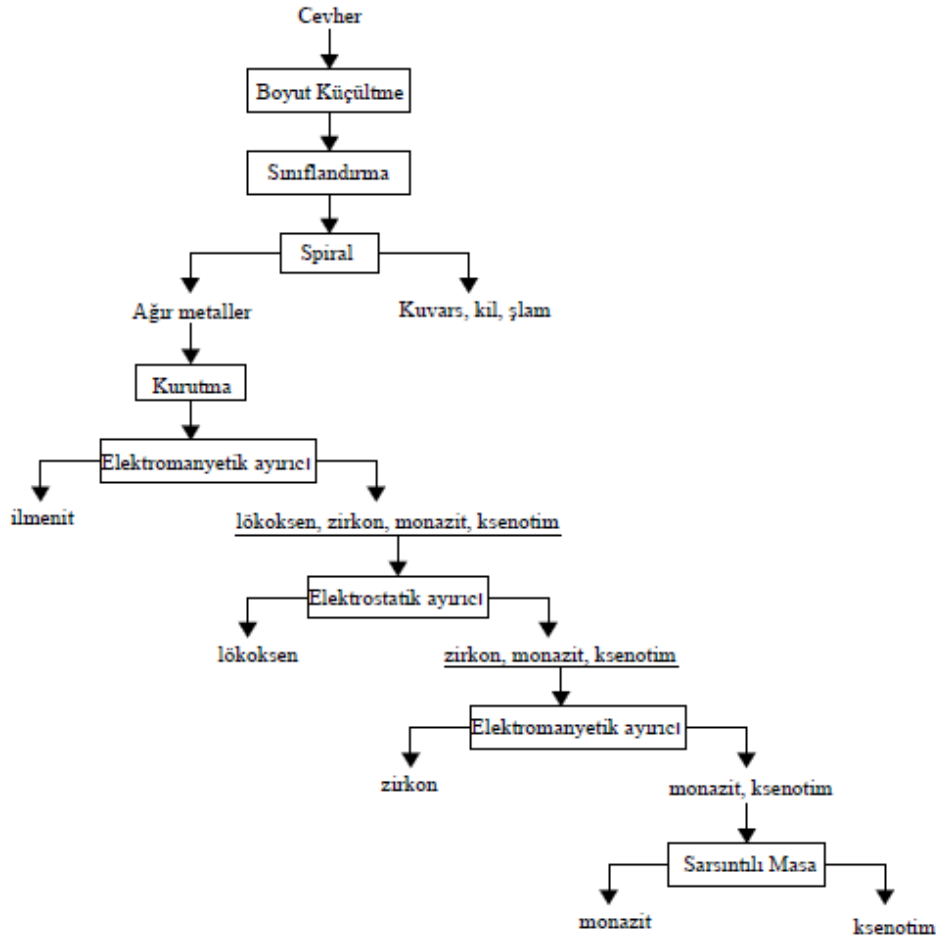
Ksenotim

Ksenotim esas olarak %54-65 NTO içeren bir itriyum fosfat (YPO₄) mineralidir. Ağır olarak ANTE (Y), toryum ve uranyum içerir. Genellikle ağır mineral kumların, pegmatitin ve magmatik kayaların bir bileşenidir. Ksenotim, monazite benzer bir oluşum sürecinden geçmiştir ve plaser yataklarda monazitle beraber bulunur. Bu tür yataklardaki ksenotim içeriği, monazitin yaklaşık %0.5-5'i kadar olmaktadır. Malezya'daki plaser kasiterit yataklarında, Avustralya ağır mineral kumlarının bazılarında,

Brezilya'daki alüvyon kalay madenlerinde ksenotim bulunduğu bilinmektedir. NTE taşıyan kayaçların erozyon süreci, monazit, ksenotim, ilmenit ve rutil gibi ağır mineralleri birarada yoğunlaştırmıştır (Gupta ve Krishnamurthy, 2005; Dushyantha vd., 2020). Rutil ve ilmenit dışında plaser ve sahil kumlarında manyetit, zirkon ve kasiterit de bulunmaktadır. Monazit ile ksenotim diğer minerallerin kazanılmasında yan ürün olarak elde edilmektedir. Monazit ve ksenotim mineralleri, yüksek özgül ağırlık ve kimyasal olarak tepkimeye girmemeleri ile ayırt edilebilmektedir. Elektrostatik ayırma sırasında ilmenit ve rutil iletken özellik göstermektedir. Manyetik özelliklerine göre sıralandığında en yüksek manyetik duyarlılığı ilmenit gösterirken diğer mineraller garnet, ksenotim, monazit şeklinde devam eder. Ksenotim, monazite göre çok daha yüksek manyetik özellik gösterdiğinden, manyetik ayırma sırasında ilmenit ile beraber alınır. Daha sonra ksenotim ve ilmeniti ayırmak için ise elektrostatik yöntem tercih edilmektedir (Yıldız, 2016; Gupta ve Krishnamurthy, 2005). Şekil 4'de sahil kumlarından monazit ve ksenotim eldesine yönelik oluşturulan proses akım şeması verilmektedir.

Çin'deki rutil cevheri numunesi üzerinde ön zenginleştirme uygulanmıştır. Bu işlem sonucunda ksenotim ön konsantresi elde edilerek deneylerde kullanılmıştır. Zhang (2016), yaptığı çalışmada, birçok kollektör denemesine karşın, en verimli olan kollektör oktano hidroksamik asit olmuştur. Ksenotimin diğer gang minerallerinden ayrılabilmesi için uygun pH 9'dur. Bastırıcı olarak sodyum silikat ve amonyum lignosülfatın, oktano hidroksamik asit ile, 80 °C'de verimli çalıştığını gözlemlenmiştir. Ancak bu bastırıcıların ilmenitin bastırılması üzerinde etkisi olmamıştır. Bu iki bastırıcının da, oda sıcaklığında ve sodyum oleat varlığında etkili olduğunu belirtmiştir.

Research article/Araştırma makalesi
 DOI: 10.29132/ijpas.897898



Şekil 4. Sahil kumlarından monazit ve ksenotim kazanımı (Yıldız,2016)

İKİNCİL NTE MİNERALLERİNDEN KONSANTRE ÜRETİMİ

Ülkemizde Eskişehir- Beylikova haricinde, Malatya Kuluncak Bölgesinde silikatlı NTE cevheri olan %24 tenörlü 1000 ton Britolit cevherleşmesi ön görülmektedir (MTA, 2017). Bununla birlikte Isparta civarındaki bir sahada NTE minerali olarak ortalama 725 ppm içerikli Allanit, Çevkinit ve Sfen bulunduğu tespit edilmiştir. NTE'lere ek olarak manyetit, zirkon, titanyum, skandiyum, niobyum, uranyum ve toryum diğer potansiyel yan ürünlerdir (Terzi, 2017). Allanit flotasyonu ile ilgili detaylı yüzey kimyası ve mikro flotasyon çalışmaları ile literatüre katkıda bulunulmuştur (Kurşun vd., 2019)

Amerika'daki Bear Lodge Projesinde cevher ortalama %4.5 tenörlü Anklisit (NTE minerali) ve yan kayaç olarak kalsit, demir oksitler ve strontiyanit

minerallerinden oluşmaktadır. Nihai zenginleştirme yöntemi olarak flotasyon uygulanan proses akım şemasında flotasyon verimini arttırmak için kaba zenginleştirme olarak manyetik ayırma uygulanmıştır. Uygulanan manyetik ayırma ile demir oksitler ayrılmıştır. Nihai konsantre %11.2 NTE oksit ve % 61.2 verimle zenginleştirilmiştir (Hao ve Corby, 2017).

İsveç sınırında bulunan Norra Karr yatağında bilinen ticari minerallerden farklı olarak Ödalit grup minerali işletilmektedir. Ödalit, Y ve diğer NTE kaynağı potansiyel bir kaynak olarak bilinmekle birlikte düşük U ve Th içeriği avantaj sağlamaktadır. Nefelinli siyenit yapısında yer alan Ödalit grubu ile birlikte zirkon da yapıda zengin içeriklerde bulunmaktadır. Norra Karr ile ilgili Almanya Aachen Üniversitesi tarafından yürütülen çalışmada ön

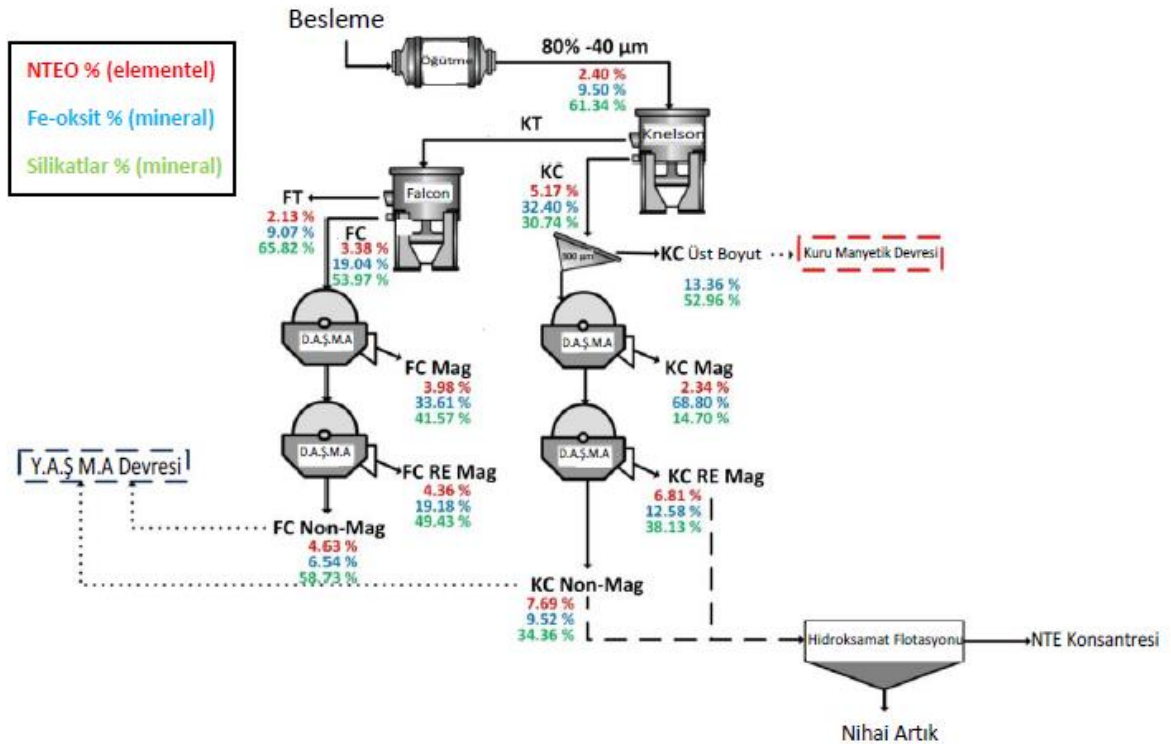
Research article/Araştırma makalesi
DOI: 10.29132/ijpas.897898

zenginleştirme olarak manyetik ayırma denenmiştir. Yüksek alan şiddetli kuru ve yaş manyetik ayırıcıları kullanılarak gang minerallerinin tek adımda ödalitden ayrılması amaçlanmıştır. Ancak gang minerali olan egrin ve ödalit'in manyetik duyarlılıkları birbirlerine çok yakın olduğu için yüksek verimli bir ayırım sağlanamamıştır. Bu çalışmada, manyetik ayırma ile bir ön konsantrenin alınması sonrasında flotasyon ile minerallerin birbirlerinden verimli bir şekilde ayrıldığı sonucuna ulaşılmıştır (Vaccarezza ve Anderson, 2018)

Rusya- Kola Peninsul'da bulunan Lovozero yatağında NTE minerali olarak esas mineral loparit tespit edilmiş ve üretimi yapılmaktadır. 1934 yılında keşfedilen yatak 1951 yılında işletilmeye başlanmıştır. %95 içerikli Loparit konsantresi gravite ve elektrostatik ayırma yöntemleri ile elde edilirken yan ürün olarak %96-98 argirine, %20.7 nefelin ve %31.7 feldspat konsantresi üretilmiştir. Bununla birlikte yapıda bulunan Ödalit minerali ile ilgili de çalışmalar yürütülmüştür (Hedrick vd., 1997).

Uygulanan flotasyon deneylerinde Na-oleat ve oleik asit toplayıcı olarak kullanılmıştır. %13.5 ZrO₂ ve %2.5 NTE bulunduran yatakta, yağ asitleri ile ters flotasyon uygulanarak egrin minerali yüzdürülmüştür (Vaccarezza ve Anderson, 2018).

Kanada- Nechalacho yatağından alınan örnek üzerinde yapılan çalışmada, Jordan ve ekibi flotasyon öncesi ön konsantre elde etmek için numuneyi 40 mikron altına öğüttükten sonra kademeli santrifüjlü ayırıcı kullanmıştır. Elde edilen konsantreler düşük alan şiddetli manyetik ayırıcı ve yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcıda, manyetik ve manyetik olmayan ürünler elde edilmiştir. Elde edilen ürünlere karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilerek ürünlerdeki mineraller tespit edilmiştir. XRD sonuçlarına göre NTE minerali olarak allanit ve basnazit pik vermiştir. Şekil 5'de yapılan deneylerin derlendiği proses akım şemasına ve NTO, demiroksitler ve silikat içeriklerine yer verilmektedir (Jordans vd., 2016).



Şekil 5. Kanada-Nechalacho yatağından alınan örnek üzerine geliştirilen akım şeması (Jordans vd., 2016)

Nb yataklarında oluşum gösteren Piroklor [(Na, Ca)₂Nb₂O₆(OH, F)], Nb rezervlerinin %95'inde bulunmaktadır. Dünyadaki en büyük Nb madenleri

Brezilya (Araxa ve Catalao) ve Kanada'da (Saint-Honoré) bulunmaktadır. Bu yataklarda yapılan zenginleştirme çalışmalarında Nb, katyonik

Research article/Araştırma makalesi
DOI: 10.29132/ijpas.897898

toplayıcılarla kademeli olarak flotasyon ile zenginleştirilmektedir. Katyonik kollektörün aynı zamanda metal kayıplarına da yol açması sebebiyle ön zenginleştirme olarak birçok adım gerçekleştirilmiştir. Manyetik ayırma, şlam giderimi, ters karbonat flotasyonu, manyetik ayırma ve piroklor flotasyonu gibi denemeler mevcuttur. Niobec

madeninde katyonik kollektörle kazanımda piroklorun %15'inin kaybedildiği bildirilmiştir. Pirokloru yüzdürmek için hidroksamik asit ve sodyum oleat alternatifleri denenilen bir çalışmada hidroksamik asitin ince boyutlarda daha yüksek verim sağladığı sonucuna varılmıştır (Liu vd., 2019)

GENEL DEĞERLENDİRME

Sahip olduğu birçok karakteristik özellikleri ile NTE, savunma sanayii ve yüksek teknoloji gerektiren malzemeler gibi stratejik alanlarda kullanım alanı bulmaktadırlar. Rezerv dağılımı ve üretim durumu göz önünde bulundurulduğunda Çin'in tekel konumunda olduğu ve ihracata yönelik kısıtlamalar getirdiği bilinmektedir. Dünyadaki üretimin yaklaşık %90'ı bastnazit, monazit ve ksenotim minerallerinden sağlanmaktadır. Avrupa gibi NTE kaynakları kısıtlı olan ve yüksek teknoloji üreten ülkeler bu sorunu çözmek için ikincil NTE mineralleri ve e-atık, maden artıkları, uçucu küller gibi artıklardan kazanıma yönelmişlerdir.

NTE konsantre üretiminde yan kayaçlar, tane serbestleşme boyutu ve mineral özelliklerinin farklılık göstermesi sebebiyle aynı yatak türlerinde bile zenginleştirme yöntemleri ve proses akım şemaları çeşitlilik gösterebilmektedir.

Son zamanlarda, Ülkemizde de NTE'lerin değerlendirilmesine yönelik çalışmalar oldukça yoğunlaşmış durumdadır. Gerek kurumlar ve gerekse de araştırma grupları bu konu üzerinde yoğun araştırmaları sürdürmektedir.

Bu kapsamda; Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK) 28 Mart 2020 tarihli ve 31082 sayılı resmi gazetede yayımlanan Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi ile enerji, maden, iyonlaştırıcı radyasyon, parçacık hızlandırıcıları ve nükleer teknoloji alanında hizmet etmek, Türkiye'nin rekabet gücünü artırmak ve sürekli kılmak, inovasyon ihtiyacını karşılamak, yeni ürünlerin üretimini ve var olanların geliştirilmesini sağlamak, araştırmacılara bilimsel ortam temin etmek, kamu ve özel hukuk kişileriyle iş birliği içinde bilimsel araştırmalar yapmak, yaptırmak, bu araştırmaları koordine etmek, teşvik etmek, araştırma ve geliştirme faaliyetlerine katkı sağlamak, bilimsel, teknik ve idari çalışmaları yapmak, yaptırmak, düzenlemek, desteklemek, iş birlikleri kurmak ve koordine etmek amacıyla kurulmuştur.

Bu derleme çalışması kapsamında güncel kaynaklardan bir literatür taraması yapılmış, Dünya'daki birincil ve ikincil NTE minerallerinden örnekler sunularak prosesler incelenmiştir. Özellikle kaynak arayışında olan ülkelerin şu an ticari avantajı daha düşük olan ikincil minerallerden NTE kazanımları ile ilgili yaptıkları çalışmalar gelecekte kaynakların azalması ile birlikte daha da önem kazanacaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazar/ Yazarlar bu makale ile ilgili herhangi bir çıkar çatışması bildirmemektedir.

ARAŞTIRMA VE YAYIN ETİĞİ BEYANI

Yazar/Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

KAYNAKLAR

- Abaka-Wood, G., Addai-Mensah, J. ve Skinner, W. (2016). Review of flotation and physical separation of rare earth element minerals. 4th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference, pp. 55-62, Tarkwa.
- Anderson, C. D., Taylor, P. R. ve Anderson, C. G. (2016). Rare earth flotation fundamentals: A review. IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings, pp. 1-15, Quebec. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact, *Geoscience Frontiers*, 10, 1285-1303.
- Bulatovic, S. M. (2010). Flotation of REO Minerals. *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice*, 151-173. doi:10.1016/b978-0-444-53082-0.00024-x
- Campbell, G. A. (2014). Rare earth metals: A strategic concern. *Miner Econ*, 27, 21-31. doi:10.1007/s13563-014-0043-y
- Chen, W., Honghui, H., Bai, T. ve Jiang, S. (2017). Geochemistry of monazite within carbonatite related REE deposits, *Resources*.

Research article/Araştırma makalesi
 DOI: 10.29132/ijpas.897898

- Costis, S., Mueller, K. K., Coudert, L., Neculita, C. M., Reynier, N. ve Blais, J.-F. (2021). Recovery potential of rare earth elements from mining and industrial residues: A review and cases studies, *Journal of Geochemical Exploration*.
- Dostal, J. (2017). Rare earth element deposits of alkaline igneous rocks. *Resources*.
- Dushyanthaa, N., Batapolaa, N., Ilankoonb, I., Rohithaa, S., Premasiria, R., Abeyasinghea, B. ve Dissanayakea, K. (2020). The story of rare earth elements (Rees): Occurrences, global Distribution, genesis, geology, mineralogy and global production, *Ore Geology Reviews*, 122, 1-17.
- Faris, N., Ram, R., Tardio, J., Bhargava, S., McMaster, S. ve Pownceby, M. I. (2017). Application of ferrous pyrometallurgy to the beneficiation of rare earth bearing iron ores – A review. *Minerals Engineering*, 110, 20-30.
- Goodenough, K. M., Wall, F. ve Merriman, D. (2018). The rare earth elements: Demand, global resources, and challenges for resourcing future generations. *Natural Resources Research*, 27, 201-216.
- Gupta, C. K. ve Krishnamurthy, N. (2005). *Extractive metallurgy of rare earths*. CRC Press.
- Hao, C. ve Corby, A. G. (2017). Alternative flowsheet for rare earth beneficiation of bear lodge ore. *Minerals Engineering*, 110, 166-178. doi:10.1016/j.mineng.2017.04.016
- Haque, N., Hughes, A., Lim, S. ve Vernon, C. (2014). Rare earth elements: Overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact. *Resources*, 614-635. doi:10.3390/resources3040614
- Hedrick, J. B., Sinha, S. P. ve Kosynkin, V. D. (1997). Loparite, A rare-earth ore (Ce, Na, Sr, Ca)(Ti, Nb, Ta, Fe)O₃, *Journal of Alloys and Compounds*, 250, 467–470.
- Jordens, A., Cheng, Y. P. ve Waters, K. E. (2013). A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 4, 97-114.
- Jordens, A., Christopher M., Grammatikopoulos, T., Hart, B. ve Waters, K. E. (2016). Beneficiation of the nechalacho rare earth deposit: Flotation response using benzohydroxamic acid. *Minerals Engineering*, 99, 158-169.
- Jyothi, R. K., Thenepalli, T., Ahn, J. W., Parhi, P. K., Chung, K. W. ve Lee, J.-Y. (2020). Review of rare earth elements recovery from secondary resources for clean energy technologies: Grand opportunities to create wealth from waste. *Journal of Cleaner Production*.
- Kumari, A., Panda, R., Jha, M. K., Kumar, J. R. ve Lee, J. Y. (2015). Process development to recover rare earth metals from monazite mineral: A review. *Minerals Engineering*, 79, 102-115.
- Kurşun, İ., Terzi, M. ve Özdemir, O. (2019). Determination of surface chemistry and flotation properties of rare earth mineral: Allanite. *Minerals Engineering*, 132, 113-120.
- Li, L. Z. ve Yang, X. (2014). China's rare earth ore deposits and beneficiation. ERES 2014: 1st European Rare Earth Resources Conference, pp: 26-36, Milos.
- Liu, M., Li, H., Jiang, T. ve Liu, Q. (2019). Flotation of coarse and fine pyrochlore using octyl hydroxamic acid and sodium oleate. *Minerals Engineering*, 132, 191-201.
- Lynas Rare Earth. (t.y.). Retrieved from <https://lynasrareearths.com/about-us/locations/mt-weld-western-australia/>
- Mancheri, N. A. (2015). World trade in rare earths, Chinese export restrictions, and implications. *Resources Policy*, 46, 262-271. doi:10.1016/j.resourpol.2015.10.009
- Moustafa, M. I. ve Abdelfattah, N. A. (2010). Physical and chemical beneficiation of the Egyptian beach monazit. *Resource Geology*, 60, 288–299.
- Schüler, D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S. ve Merz, C. (2011). *Study on rare earths and their recycling*. Darmstadt: Öko-Institut e.V.
- Suli, L. M., Ibrahim, W. H., Aziz, B. A., Deraman, M. R. ve Ismail, N. A. (2017). A review of rare earth mineral processing technology, *Chemical Engineering Research Bulletin*, 19, 20-35. Erişim adresi: <https://doi.org/10.3329/cerb.v19i0.33773>
- Terzi, M. (2017). Isparta Yöresi nadir toprak elementlerinin kazanımı için yeni proseslerin geliştirilmesi (Doktora Tezi). Yöktez Erişim No: 483710, İstanbul: İstanbul Üniversitesi.
- U.S. Geological Survey, 2021. Mineral Commodity Summaries 2021. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Vaccarella, V. ve Anderson, C. (2018). Beneficiation and leaching study of Norra Kärr ödalit mineral. In H. K. al., Rare Metal Technology, The Minerals, Metals & Materials Society.
- Wall, F. (2014). 13. Rare earth elements. Gunn, G. (Der). *Critical metals handbook*, pp. 312-340.
- Yang, X., Satur, J. V., Sanematsu, K., Laukkanen, J. ve Saastamoinen, T. (2015). Beneficiation studies of a complex REE ore. *Minerals Engineering*, 71, 55-64.
- Yıldız, N. (2016). Nadir toprak elementleri. Ankara.
- Zhang, Y. (2016). Froth flotation of xenotime. (YL Tezi). Colorado School of Mines, Arthur Lakes Library. Erişim adresi: <http://hdl.handle.net/11124/170057>
- Zhang, W., Noble, A., Yang, X. ve Honaker, R. (2020). A comprehensive review of rare earth elements recovery from coal-related materials. *Minerals*. doi:10.3390/min10050451