

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SOMA TERMİK SANTRAL TABAN KÜLÜNDEN NADİR TOPRAK
ELEMENTLERİNİN (NTE) KAZANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tülin ULUCAN

Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı

Cevher Hazırlama Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SOMA TERMİK SANTRAL TABAN KÜLÜNDEN NADİR TOPRAK
ELEMENTLERİNİN (NTE) KAZANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tülin ULUCAN
505191107**

Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı

Cevher Hazırlama Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fırat BURAT

HAZİRAN 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 505191107 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Tülin ULUCAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SOMA TERMİK SANTRAL TABAN KÜLÜNDEN NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNİN (NTE) KAZANIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Fırat BURAT**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. A. Ekrem YÜCE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Kenan ÇİNKU
İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa

Teslim Tarihi : 24 Mayıs 2023
Savunma Tarihi : 15 Haziran 2023





Aileme ve sevdiklerime ,



ÖNSÖZ

Bu tez kapsamında Manisa/Soma bölgesinde yer alan Konya Şeker San. ve Tic. A.Ş. 'ye ait Soma Termik Santral taban külü numunesinden nadir toprak elementlerinin (NTE) cevher hazırlama zenginleştirme yöntemlerinden fiziksel ve kimyasal zenginleştirme yöntemleri ile kazanımı amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalarda Konya Şeker San. ve Tic. A.Ş.'den temin edilen taban külü numuneleri ile çalışılmış, özgül ağırlık farkına dayalı zenginleştirme yöntemi ve alkali liç ile asit liçi çalışmalarının bu numunenin zenginleştirilmesindeki etkisi incelenmiştir.

Bu tezin gerçekleştirilmesine olanak sağlayan İ.T.Ü. Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü'ne ve Bölüm Başkanı sayın Prof. Dr. Feridun BOYLU'ya, yüksek lisans eğitimim boyunca bana her türlü desteği sağlayan, bilgi ve tecrübesini sunan çok değerli hocam, tez danışmanım Doç. Dr. Fırat BURAT'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca bilgi ve tecrübelerini paylaşan çok değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Gülay BULUT, Prof. Dr. A. Ekrem YÜCE ve Doç. Dr. Hüseyin BAŞTÜRKÜ'ye, her daim yanımda olan arkadaşım Gülşah GÜVEN ve araştırma görevlisi arkadaşlarım Nazlım İlkyaz DİNÇ, Esra BAŞTÜRKÜ, Zeynep ÜÇERLER, Tülay TÜRK, , Oğuzhan Mert GÜRKAN, Ceyda ŞAVRAN, Yusuf Enes PURAL, Naşide Merve SÜTÇÜ, Ceyhun ERMAN, Berkan ÖZKAN ve Orhan APAYDIN olmak üzere tüm İTÜ Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarına ve bana destek olan Barış AYDEMİR, İbrahim EMRAH ve diğer arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, beni yetiştiren ve her türlü desteği sağlayan annem Güllü ULUCAN, babam Ali ULUCAN, ablam Tuba ULUCAN AKSU, kardeşim Cem ULUCAN ve yeğenim Deren AKSU'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez TENMAK, TKİ ve İTÜ [Proje No: A2.H1.P22] tarafından ortaklaşa koordine edilmektedir. Bu projenin gerçekleştirilmesini sağlayan TENMAK/NATEN başkanı sayın Dr. Belma SOYDAŞ SÖZER'e ve TENMAK Uluslararası İlişkiler Koordinatörü sayın Kimya Yük. Müh. Berna YÜKSEL'e çok teşekkür ederim. Bu çalışma için numune sağlayan TKİ ve Soma Termik Santrali Yöneticilerine teşekkür ederim. Ayrıca bu proje kapsamındaki desteklerinden dolayı TENMAK/NATEN proje ekibine ve İTÜ Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü proje ekibine teşekkür ederim. Tez ve proje için analiz desteği sağlayan Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Haziran 2023

Tülin ULUCAN
(Cevher Hazırlama Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİ	3
2.1 Nadir Toprak Elementleri.....	3
2.1.1 Nadir toprak elementlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri	4
2.1.2 Nadir toprak elementlerinin kullanım alanları	4
2.1.3 Nadir toprak elementlerinin bulunduğu maden yatakları	5
2.2 Dünya’da ve Türkiye’de Nadir Toprak Elementleri	6
2.2.1 Dünyada’ki NTE rezervi ve üretimi.....	6
2.2.2 Türkiye’de NTE yataklanmaları	9
2.3 NTE İçeren Mineraller	10
2.4 NTE Üretim ve Zenginleştirme Yöntemleri.....	11
2.4.1 NTE’lerin fiziksel, fiziko-kimyasal ve kimyasal zenginleştirme yöntemleri ile kazanımı	13
2.4.2 Fiziksel zenginleştirme yöntemleri	13
2.4.2.1 Özgül ağırlık farkı ile zenginleştirme yöntemi	13
2.4.2.2 Manyetik ayırma yöntemi	19
2.4.2.3 Elektrostatik ayırma yöntemi	19
2.4.3 Fiziko-kimyasal zenginleştirme yöntemi	20
2.4.3.1 Flotasyon	20
2.4.4 Kimyasal zenginleştirme yöntemi.....	23
2.5 İkincil NTE Kaynağı: Kömür ve Kömür Yan Ürünleri	26
2.5.1 Kömür	26
2.5.1.1 Dünya’da kömür.....	27
2.5.1.2 Türkiye’de kömür.....	29
2.5.1.3 Kömür, kömür yan ürünleri ve NTE	31
2.5.1.4 Kömür ve kömür yan ürünlerinden NTE kazanımı.....	34
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	37
3.1 Malzeme ve Yöntem	37
3.1.1 Malzeme.....	37
3.1.1.1 Soma havzası jeolojisi.....	38
3.1.2 Yöntem.....	39
3.2 Numunenin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	44
3.2.1 Fiziksel özellikler	44

3.2.2 Kimyasal özellikler	45
3.3 Zenginleştirme Deneyleri Sonuçları	48
3.3.1 Jig ile yapılan zenginleştirme deney sonucu	48
3.3.2 Sarsıntılı masa ile yapılan zenginleştirme deney sonucu	50
3.3.3 MGS ile yapılan zenginleştirme deney sonuçları.....	51
3.3.3.1 -0,3 mm boyutunda MGS deney sonucu.....	51
3.3.3.2 -0,106 mm boyutunda MGS deney sonucu	53
3.3.4 İnce boyutlarda Knelson ile zenginleştirme deneyi sonuçları.....	55
3.3.4.1 -0,3 mm boyutunda zenginleştirme deney sonucu	55
3.3.4.2 -0,106 mm boyutunda zenginleştirme deney sonucu	57
3.3.4.3 -0,038 mm boyutunda zenginleştirme deney sonucu	60
3.3.5 Kimyasal zenginleştirme deneyi sonuçları.....	61
3.3.5.1 Alkali liç (NaOH liçi) deney sonuçları	62
3.3.5.2 Asit liçi (HCl) deney sonuçları.....	67
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	81

KISALTMALAR

ANTE	: Ağır Nadir Toprak Elementleri
ASTM D6357	: İz Element Analizi (ICP)
GW	: Gigawatt
HCl	: Hidroklorik asit
HNTE	: Hafif Nadir Toprak Elementleri
NaOH	: Sodyum Hidroksit
NTE	: Nadir Toprak Elementi
NATEN	: Nadir Toprak Elementleri Araştırma Enstitüsü
NTM	: Nadir Toprak Metalleri
NTO	: Nadir Toprak Oksiti
MGS	: Multi Gravity Separator
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
MW	: Megawatt
PKO	: Pülpte Katı Oranı
TENMAK	: Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
XRF	: X-Işını Floresans



SEMBOLLER

dev/dak	: Dönme hızı
g/cm³	: Yoğunluk
g/t	: Miktar
L/dak	: Basınç
mm	: Milimetre, uzunluk birimi
mol/L	: Molarite (M)
pH	: Potansiyel hidrojen
sa	: Saat
µm	: Mikrometre, uzunluk birimi
Σ	: Toplam



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: NTE'lerin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	4
Çizelge 2.2: NTE maden üretiminin ülkelere göre dağılımı.....	8
Çizelge 2.3: Dünya'da NTE üretimi yapılan sahalara ilişkin bilgiler.....	9
Çizelge 2.4: Ekonomik değer taşıyan NTE mineralleri.....	11
Çizelge 2.5: NTE flotasyonu için tesislerde en çok kullanılan toplayıcı türleri.....	21
Çizelge 2.6: Uçucu kül ve taban külü fiziksel özellikleri.....	32
Çizelge 3.1 :Alkali liç ve asit liçi deney koşulları.....	44
Çizelge 3.2: Taban külü tane boyut dağılımı.....	44
Çizelge 3.3: Taban külü boyut ve boyuta göre toplam NTE içerik ve dağılımları (küle göre).....	47
Çizelge 3.4: + 1 mm boyutunda Jig deneyi sonucu (küle göre).....	49
Çizelge 3.5: + 1 mm boyutunda Jig deneyi sonucu (deneye göre).....	49
Çizelge 3.6: -1+0,3 mm boyutunda sarsıntılı masa deney sonucu (küle göre).....	51
Çizelge 3.7: -1+0,3 mm boyutunda sarsıntılı masa deney sonucu (deneye göre).....	51
Çizelge 3.8: -0,3 mm boyutunda MGS deney sonucu (küle göre).....	52
Çizelge 3.9: -0,3 mm boyutunda MGS deney sonucu (deneye göre).....	52
Çizelge 3.10: -0,106 mm boyutunda MGS deney sonucu (küle göre).....	54
Çizelge 3.11: -0,106 mm boyutunda MGS deney sonucu (deneye göre).....	54
Çizelge 3.12: -0,3 mm boyutunda Knelson deney sonucu (küle göre).....	56
Çizelge 3.13: -0,3 mm boyutunda Knelson deney sonucu (deneye göre).....	56
Çizelge 3.14: -0,106 mm boyutunda Knelson deney sonucu (küle göre).....	58
Çizelge 3.15: -0,106 mm boyutunda Knelson deney sonucu (deneye göre).....	58
Çizelge 3.16: -0,038 mm boyutunda Knelson deney sonucu (küle göre).....	60
Çizelge 3.17: -0,038 mm boyutunda Knelson deney sonucu (deneye göre).....	60
Çizelge 3.18: Üç farklı boyutta alkali liç sonrası kek miktarlarındaki değişim oranları.....	63



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: NTE periyodik tablo.....	3
Şekil 2.2: Nadir toprak elementlerinin genel kullanım alanları.....	5
Şekil 2.3: Dünya NTE rezerv dağılımı.....	8
Şekil 2.4: Türkiye’de NTE yataklanmasına uygun bölgeler.....	10
Şekil 2.5: NTE ham konsantrenin endüstriyel kullanıma geçiş süreci akım şeması.....	12
Şekil 2.6: Gravite ayırmada kullanılan ortamlar ve cihazlar.....	14
Şekil 2.7: Sarsıntılı masanın genel görünümü.....	15
Şekil 2.8: Sarsıntılı masada tanelerin hareketi.....	15
Şekil 2.9: Jig cihazı şematik görünüm.....	16
Şekil 2.10: C-900 tipi laboratuvar/pilot ölçekli MGS’nin genel görünümü.....	17
Şekil 2.11: Standart tip Knelson cihazı.....	18
Şekil 2.12: Nadir toprak elementlerinin eldesinde kullanılan metalurjik proses.....	24
Şekil 2.13: Turba (a); linyit (b); taş kömürü (c); antrasit (d); grafit (e).....	27
Şekil 2.14: Ülkelere göre dünya kömür rezervleri.....	28
Şekil 2.15: 2021 yılına göre dünya kömür üretimi.....	28
Şekil 2.16: 2021 yılı dünya kömür tüketimi.....	29
Şekil 2.17: Türkiye linyit sahaları.....	30
Şekil 2.18: 2022 yılı Türkiye kömüre dayalı kurulu gücü.....	30
Şekil 2.19: Soma Termik Santrali uçucu kül numunesi XRD analizi sonucu.....	33
Şekil 3.1: Soma termik santrali.....	38
Şekil 3.2: Proje sahası ve ekibi.....	39
Şekil 3.3: Numune homojenizasyon çalışması.....	40
Şekil 3.4: Temsili elek analizi ve kimyasal analiz numunesi (a); nem analizi uygulanan numune (b).....	40
Şekil 3.5: Deneyde kullanılan jig.....	41
Şekil 3.6: Deneyde kullanılan Wilfey tipi sarsıntılı masa.....	41
Şekil 3.7: Deneylerde kullanılan MGS santrifüj tipi ayırıcısı.....	42
Şekil 3.8: Deneylerde kullanılan Knelson santrifüj ayırıcısı.....	43
Şekil 3.9: Liç ünitesi (a); alkali liç çözeltisi (b); asit liç çözeltisi (c); liç keki (d).....	43
Şekil 3.10: Taban külü numunesi kümülatif elek altı eğrisi.....	45
Şekil 3.11: Taban külü numunesine ait temel oksit içeriği.....	45
Şekil 3.12: ASTM D6357 standartına göre külleme işlemi yapılan taban külü numunesi.....	46
Şekil 3.13: Taban külü numunesi boyut gruplarına göre temel oksit içeriği.....	47
Şekil 3.14: Taban külü numunesinin boyut gruplarında birleştirilmiş temel oksit-toplam NTE içeriği.....	48
Şekil 3.15: +1 mm boyutunda Jig deneyi akım şeması.....	49
Şekil 3.16: +1 mm boyutunda Jig deney ürünleri ve Σ NTE içeriği.....	50
Şekil 3.17: -1+0,3 mm boyutunda sarsıntılı masa deneyi akım şeması.....	50
Şekil 3.18: -0,3 mm boyutunda MGS deneyi akım şeması.....	52
Şekil 3.19: -0,3 mm boyutunda MGS deney ürünleri ve Σ NTE içeriği.....	53

Şekil 3.20: -0,106 mm boyutunda MGS deneyi akım şeması.....	54
Şekil 3.21: -0,106 mm boyutunda MGS deney ürünleri ve Σ NTE içeriği.....	55
Şekil 3.22: -0,3 mm boyutunda Knelson deneyi akım şeması.....	56
Şekil 3.23: -0,3 mm boyutunda Knelson deney ürünleri ve Σ NTE içeriği.....	57
Şekil 3.24: -0,106 mm boyutunda Knelson deneyi akım şeması.....	58
Şekil 3.25: -0,106 mm boyutunda Knelson deney ürünleri ve Σ NTE içeriği.....	59
Şekil 3.26: -0,038 mm boyutunda Knelson deneyi akım şeması.....	60
Şekil 3.27: -0,038 mm boyutunda Knelson deney ürünleri ve Σ NTE içeriği.....	61
Şekil 3.28: Tuvenan numuneye uygulanan liç deneyleri akım şeması.....	62
Şekil 3.29: -0,3 mm boyutundaki numuneye uygulanan liç deneyleri akım şeması...	62
Şekil 3.30: -0,106 mm boyutundaki numuneye uygulanan liç deneyleri akım şeması.....	63
Şekil 3.31: Üç farklı boyutta alkali liç işlemi sonucu SiO_2 içeriğindeki değişim oranları.....	64
Şekil 3.32: Üç farklı boyutta alkali liç işlemi sonucu Al_2O_3 içeriğindeki değişim oranları.....	64
Şekil 3.33: Üç farklı boyutta alkali liç işlemi sonucu CaO içeriğindeki değişim oranları.....	65
Şekil 3.34: Üç farklı boyutta alkali liç işlemi sonucu Fe_2O_3 içeriğindeki değişim oranları.....	65
Şekil 3.35: Üç farklı boyutta alkali liç işlemi sonucu Na_2O içeriğindeki değişim oranları.....	66
Şekil 3.36: Üç farklı boyutta alkali liç işlemi sonucu NTE içeriğindeki değişim oranları.....	67
Şekil 3.37: Üç farklı boyutta uygulanan asit liçi çözeltisindeki Al_2O_3 verimi değişim oranları.....	68
Şekil 3.38: Üç farklı boyutta uygulanan asit liçi çözeltisindeki CaO verimi değişim oranları.....	68
Şekil 3.39: Üç farklı boyutta uygulanan asit liçi çözeltisindeki Fe_2O_3 verimi değişim oranları.....	69
Şekil 3.40: Üç farklı boyutta uygulanan asit liçi çözeltisindeki Na_2O verimi değişim oranları.....	69
Şekil 3.41: Üç farklı boyutta uygulanan asit liçi çözeltisindeki Σ NTE verimi değişim oranları.....	70

SOMA TERMİK SANTRAL TABAN KÜLÜNDEN NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNİN (NTE) KAZANIMI

ÖZET

Bu tez kapsamında, Manisa/Soma bölgesinde faaliyetlerini yürüten Konya Şeker San. ve Tic. A.Ş.'ye ait Soma Termik Santrali'nden temin edilen taban külü numunesinden nadir toprak elementlerinin kazanımına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda fiziksel ve kimyasal zenginleştirme yöntemleri kullanılmıştır. Fiziksel zenginleştirme yöntemi olarak özgül ağırlık farkına göre ayırma işleminin yapıldığı jig, sarsıntılı masa ve santrifüjlü cihazlar (MGS, Knelson) kullanılmıştır. Kimyasal zenginleştirme deneyleri kapsamında alkali liç ve asit liçi deneyleri yapılmıştır.

Elek analizi deney sonuçlarına göre taban külü numunesinin d_{80} boyutu 0,98 mm olarak bulunmuştur. Fiziksel zenginleştirme deneyleri kapsamında ilk aşamada belirli miktarda taban külü numunesi 1 mm ve 0,3 mm'lik elekler kullanılarak sınıflandırılmıştır. +1 mm boyutundaki malzeme ile jig, -1+0,3 mm boyut grubundaki malzeme ile sarsıntılı masa, -0,3 mm'deki malzeme ile santrifüj tipi ayırıcılar (MGS, Knelson) kullanılarak zenginleştirme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, zenginleştirme işlemlerinde boyutun etkisini araştırmak amacıyla 0,106 mm ve 0,038 mm altına öğütülen numuneler santrifüj ayırıcılara beslenmiştir. Fiziksel zenginleştirme deneyleri tamamlandıktan sonra taban külü numunesine kimyasal zenginleştirme yöntemlerinden alkali liç ve asit liçi uygulanmıştır. Alkali liç deneylerinde sıcaklık 90°C, süre 4 saat, sıvı:kıta oranı 8:1, karıştırma hızı 800 dev./dak. ve 5 mol/L NaOH olarak seçilmiştir. Asit liçi deneylerinde %37 saflıktaki HCl ile 3 mol/L, 4 mol/L ve 5 mol/L asit konsantrasyonlarında çözündürme deneyleri yapılmış olup, sıcaklık 90°C, liç süresi 3 saat, sıvı:kıta oranı 10:1 ve karıştırma hızı 400 dev./dak. olarak seçilmiştir.

En iri boyut grubunda (+1 mm) jig kullanılarak yapılan zenginleştirme deneyi sonucunda Σ NTE içeriği 154 g/t olan hafif bir ürün elde edilmiştir. -1+0,3 mm boyutunda yapılan sarsıntılı masa deneyi sonucunda Σ NTE içeriği 130 g/t olan bir ağır üretilirken hafif ürünündeki Σ NTE içeriği ise 136 g/t olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre iri boyutta yapılan klasik gravite yöntemleri ile sınırlı bir başarı elde edileceği anlaşılmıştır.

-0,3 mm'de yapılan MGS deney sonucunda, Σ NTE içeriği 187 g/t olan bir ağır ürün %34,7 kazanma verimi ile elde edilmiştir. -0,106 mm boyutunda yapılan MGS deney sonucunda ise Σ NTE içeriği 168 g/t olan bir ağır ürün %34,8 kazanma verimi üretilmiştir. Daha yüksek yerçekimi kuvvetlerine ulaşan Knelson ayırıcısı ile -0,3 mm'de yapılan deney sonucunda, ağırlıkça %36,6 oranında bir ağır ürün 187 g/t Σ NTE içeriği ve %41,0 kazanma verimi ile elde edilmiştir. -0,106 mm boyutunda gerçekleştirilen Knelson deney sonucuna göre ağırlıkça %7,0 oranında bir ağır ürün 204 g/t Σ NTE içeriği ve %10,1 kazanma verimi ile üretilmiştir. -0,038 mm boyutunda yapılan deney sonucunda Σ NTE içeriği 158 g/t olan bir ağır ürün %6,3 kazanma verimi ile elde edilmiştir. Sonuç olarak, özgül ağırlık farkına göre yapılan ayırma işlemlerinin bu malzemedeki NTE eldesi için uygun olmadığı belirlenmiştir.

Silisli yapıda kapanım halinde olarak bulunan NTE'lerin asit liçindeki çözünürlüğünü arttırmak için ilk aşamada alkali liç deneyi yapılmış, daha sonra filtre keki alınarak asit liçine tabi tutulmuştur. 3 mol/L, 4 mol/L ve 5 mol/L HCl kullanılarak yapılan asit liçi sonucunda tuvenan malzeme için Σ NTE çözündürme verimi sırasıyla %77,2, %83,2 ve %82,7 olarak bulunmuştur. -0,3 mm boyutundaki malzeme ile yapılan asit çözündürme işlemi sonucunda Σ NTE çözündürme verimleri sırasıyla %84,0, %80,3 ve %85,3 olarak tespit edilmiştir. -0,106 mm boyutundaki malzemenin Σ NTE çözündürme verimleri ise sırasıyla %84,7, %87,0 ve %87,2'dir. Sonuç olarak, en yüksek Σ NTE çözündürme verimine -0,106 mm boyutunda 5 mol/L HCl kullanılarak ulaşılmıştır. En uygun asit liçi koşulları sıcaklık 90 °C, süre 3 saat, sıvı:kati oranı 10:1 ve karıştırma hızı 400 dev./dak. olarak belirlenmiştir.



RECOVERY OF RARE EARTH ELEMENTS (REEs) FROM SOMA THERMAL POWER PLANT BOTTOM ASH

SUMMARY

Within the scope of this thesis, experimental studies were carried out for recovering rare earth elements (REEs) from the bottom ash sample obtained from the Soma Thermal Power Plant of Konya Şeker San, which carries out its activities in the Manisa/Soma region. In this context, physical and chemical enrichment methods were used. As the physical enrichment method, jig, shaking table, and centrifugal devices (MGS, Knelson) in which the separation process is performed according to the specific gravity difference were used. In chemical enrichment experiments, alkali and acid leaching experiments were carried out.

According to the sieve analysis test results, the d_{80} size of the bottom ash sample was found as 0.98 mm. In physical enrichment experiments, at the first stage, a certain amount of bottom ash samples were classified using 1 mm and 0.3 mm sieves. The jig was used for the material above 1mm, the shaking table test was used for the material in the size group of $-1+0.3$ mm, and the centrifugal-type separators (MGS, Knelson) were used for the material below 0.3 mm. In addition, the experiments were also tested at -0.106 mm and -0.038 mm fractions to investigate the effect of centrifugal-type separators, which are effective at finer sizes. For this purpose, a certain amount of bottom ash sample was ground below 0.106 mm and 0.038 mm. After the physical enrichment experiments, alkali leaching and acid leaching were applied to the bottom ash sample. In alkali leaching experiments, the optimum parameters were determined as 90°C of temperature, 4 hours of leaching time, the liquid: solid ratio of 8:1, 800 dev./dak. stirring speed, and 5 mol/L NaOH concentration. In the acid leaching experiments, dissolution experiments were carried out with 37% pure HCl at acid concentrations of 3 mol/L, 4 mol/L, and 5 mol/L. The other optimum parameters were determined as the following: the temperature of 90°C , the leaching time of 3 hours, the liquid: solid ratio of 10:1, and the stirring speed of 400 rev./min.

As a result of the enrichment experiment using the jig in the largest size group ($+1$ mm), a light product with $\sum\text{REE}$ content of 154 g/t was obtained. As a result of the shaking table test with a size of $-1+0.3$ mm, a heavy product with an $\sum\text{REE}$ content of 130 g/t was produced, while the $\sum\text{REE}$ content in a light product was found to be 136 g/t. According to these results, it has been understood that limited success will be achieved with the classical gravity methods made in the coarse fraction.

As a result of the MGS test performed at -0.3 mm, a heavy product with an $\sum\text{REE}$ content of 187 g/t was obtained with 34.7% recovery efficiency. As a result of the MGS test with a size of -0.106 mm, a heavy product with an $\sum\text{REE}$ content of 168 g/t was produced with a recovery efficiency of 34.8%. As a result of the experiment performed with the Knelson separator, a heavy product of 36.6% by weight was obtained with 187 g/t $\sum\text{REE}$ content and 41.0% recovery efficiency at -0.3 mm. According to the results of the Knelson test carried out in -0.106 mm size, a heavy product of 7.0%

by weight was produced with 204 g/t Σ REE content and 10.1% recovery. As a result of the experiment with a size of -0.038 mm, a heavy product with an Σ REE content of 158 g/t was obtained with a recovery of 6.3%. As a result, it has been determined that the separation processes made according to the specific gravity difference are not suitable for obtaining REEs from this material.

To increase the solubility of REEs in the form of inclusions in siliceous structure in acid leaching, an alkali leaching test was carried out in the first stage, then the filter cake was taken and subjected to acid leaching. As a result of acid leaching using 3 mol/L, 4 mol/L, and 5 mol/L HCl, Σ REE dissolution efficiency for the leached material was found to be 77.2%, 83.2%, and 82.7%, respectively. As a result of the acid dissolution process with -0.3 mm material, Σ REE dissolution efficiencies were determined as 84.0%, 80.3%, and 85.3%, respectively. Finally, the Σ REE dissolution efficiencies of the -0.106 mm material were found to be 84.7%, 87.0%, and 87.2%, respectively. As a result, the highest Σ REE solubilization efficiency was achieved using 5 mol/L HCl with a size of -0.106 mm. The optimum acid leaching conditions were determined as 90 °C of temperature, 3 hours of leaching time, 10:1 of liquid: solid ratio, and 400 rev./min of stirring speed.

1. GİRİŞ

Nadir toprak elementleri sahip oldukları eşsiz fiziksel ve kimyasal özellikler ile birçok sektörde özellikle de yüksek teknoloji üreten savunma sanayi gibi kritik alanlarda sıkça kullanılmaktadır. Ülkeler tarafından kritik hammaddeler içerisinde gösterilen NTE'ler, tedarik riski yüksek olduğu için artan bir öneme sahiptir. NTE rezervi ve üretimi açısından lider ülke konumunda bulunan Çin'in, nadir topraklar konusunda izlemiş olduğu politika neticesinde diğer ülkeler alternatif NTE kaynak arayışına yönelmiştir. Bu alternatif kaynaklar içerisinde enerji sektörünün en çok kullandığı malzemelerden kömür ve kömür yan ürünleri, potansiyel NTE kaynağı olarak görülmektedir.

Ülkemizin sahip olduğu kömür kaynakları ve buna bağlı atıkları NTE açısından değerlendirildiğinde kaçınılmaz bir fırsattır. Literatürde yapılan çalışmalar neticesinde ülkemizdeki kömür ve yan ürünlerinde NTE bulunduğu, bu NTE'lerin kömürdeki inorganik kısım yani külde kalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Bu bakımdan özellikle de termik santral atıkları olan uçucu küller ve taban külleri potansiyel NTE kaynakları olarak düşünülmektedir. Ülkemizde var olan ve halen işletilmekte olan termik santrallerdeki bu malzemelerin cevher hazırlama yöntemleri ve disiplini ile değerlendirilip ülkeye katkı sağlaması stratejik planlar açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışma kapsamında Manisa/Soma bölgesinde faaliyet gösteren Konya Şeker San. ve Tic. A.Ş.'ye ait Soma Termik Santrali taban külü numunesinden nadir toprak elementlerinin (NTE) fiziksel ve kimyasal zenginleştirme yöntemleri ile kazanımı amaçlanmıştır. Fiziksel zenginleştirme yöntemi olarak özgül ağırlık farkına göre ayırma işleminin yapıldığı jig, sarsıntılı masa ve santrifüjlü cihazlar (MGS, Knelson) kullanılmıştır. Kimyasal zenginleştirme deneyleri kapsamında da literatür verileri dikkate alınarak alkali liç ve asit liç deneyleri yapılmıştır.



2. GENEL BİLGİ

2.1 Nadir Toprak Elementleri

Periyodik tabloda atom numaraları 57 (Lantanyum) - 71 (Lutesyum) arasında değişen ve lantanitler olarak da bilinen, 15 kimyasal elementten oluşan bu grup nadir toprak elementleri olarak adlandırılmaktadır. Lantanitlerle benzer kimyasal özellik gösterdiği için atom numarası 39 olan yitriyum ile 21 olan skandiyum elementleri de nadir toprak elementleri içerisinde yer almaktadır (Lin ve diğ, 2017).

Nadir toprak elementleri için sınıflandırma işlemi iki grup şeklinde yapılmaktadır. Atom numaraları 57- 64 arasında olanlar hafif nadir toprak elementleri ve atom numaraları 65- 71 arasında olanlar ise ağır nadir toprak elementleri olarak sınıflandırılmaktadır (MTA, 2017). Bir diğer sınıflandırma da kömür içerisinde bulunan NTE'ler için yapılmaktadır. Kömürdeki NTE'lerin sınıflandırılması da üç kategoride gerçekleştirilmektedir. Bunlar, hafif (HNTE, La - Sm), orta (ONTE, Eu - Y) ve ağır (ANTE, Ho - Lu) NTE'lerdir. NTE'ler yeryüzünde bulunma miktarı ve kullanım beklentilerine göre de kritik (Y, Nd, Eu, Tb, Dy, Er), çok kritik (Ce, Ho, Tm, Yb, Lu) ve kritik olmayan (La, Pr, Sm) NTE'ler olarak sınıflandırılmaktadır (Wang ve diğ, 2019). Nadir toprak elementlerinin periyodik tablodaki gösterimi Şekil 2.1'deki gibidir (Yıldız, 2016).

Şekil 2.1: NTE periyodik tablo.

2.1.1 Nadir toprak elementlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

NTE'ler renk olarak parlak olup gümüş rengindedirler. Yapısal olarak kolay şekil alabilen, yumuşak, tepkimeye girebilen ve haddelenebilen elementlerdir. Elektron dizilimleri bu elementlere özel manyetik ve optik özellik kazandırmaktadır. Ergime noktaları ise metal üretim sürecinde doğrudan etkili olup periyodik tabloda seri boyunca artma eğilimi göstermektedir (MTA, 2017).

Nadir toprak elementleri adlandırıldıkları gibi nadir olmayıp aksine yer kabuğunda oldukça bol miktarda bulunmaktadır. Nadir olarak adlandırılmasının sebebi, madencilikleri ve prosesleri bakımından göz önüne alındığında ekonomik sayılabilecek konsantrasyonlarda bulunmamalarıdır. NTE'lerin bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 2.1'de verilmektedir (Sastri ve diğ, 2003).

Çizelge 2.1: NTE'lerin fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Element	Sembol	Atom Numarası	Atom Ağırlığı, g/mol	İçerik, g/t	Ergime Noktası, °C	Kaynama Noktası, °C	Yoğunluk, g/cm ³
Yitriyum	Y	39	88.90	28	1522	3338	4.469
Lantan	La	57	139.91	18	918	3464	6.145
Seryum	Ce	58	140.12	46	798	3433	6.770
Praseodim	Pr	59	140.90	5.5	931	3520	6.773
Neodimyum	Nd	60	144.24	24	1021	3074	7.007
Prometyum*	Pm	61	147.00	-	1042	3000**	7.260
Samaryum	Sm	62	150.35	6.5	1074	1794	7.520
Evropiyum	Eu	63	151.96	1	822	1529	5.243
Gadolinyum	Gd	64	157.25	6.4	1313	3273	7.900
Terbiyum	Tb	65	158.92	0.9	1356	3230	8.229
Disprozyum	Dy	66	162.50	4.5	1412	2567	8.550
Holmiyum	Ho	67	164.93	1.2	1474	2700	8.755
Erbium	Er	68	167.26	2.5	1529	2868	9.066
Tülyum	Tm	69	168.93	0.2	1545	1950	9.321
İterbiyum	Yb	70	173.04	2.7	819	1196	6.965
Lutesyum	Lu	71	174.97	0.8	1663	3402	9.84

*Pu bozunma ürünü; **Tahmini değer;

2.1.2 Nadir toprak elementlerinin kullanım alanları

İlk olarak 1788 yılında keşfedilen NTE'lerin üretimi ve tüketimi 1950'lerden önce dünyada 5000 metrik ton NTO'nun altında olup, 1960'lı yıllara kadar günlük hayattaki kullanımları neredeyse yok gibidir. 1960'lı yıllardan sonra günlük hayatta kullanılmaya başlayan NTE'ler televizyon ekranları, petrol endüstrisi ve bilgisayar sistemleri gibi çeşitli alanlarda uygulanmıştır (Zhou ve diğ, 2017). Nadir toprak metalleri stratejik bir öneme sahip olup birçok sektörde kullanılmaktadır. Bu sektörler

genel olarak; temiz enerji üretimi, sağlık hizmetleri, petrol rafineri ve elektronik olarak sıralanabilmektedir (Lin ve diğ, 2017).

Yeni nesil motorlar, taşımacılık, manyetik ayırıcı ve elektronik endüstrisi gibi çeşitli çalışma alanlarından gelen isteğe göre nadir toprak elementlerinin kullanımı geniş bir dağılım göstermektedir. Sektör açısından nadir toprak elementlerinin kullanımı incelendiğinde bu alanı mıknatıslar, katalizör, fosfor üretimi, parlatma ve hidrojen alaşımlar oluşturmaktadır (MTA, 2017). Şekil 2.2’de nadir toprak elementlerinin genel kullanım alanları verilmiştir (Yıldız, 2016).



Şekil 2.2:Nadir toprak elementlerinin genel kullanım alanları.

ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu (2021) verilerine göre, nadir toprakların son kullanımlarının tahmini dağılımı şu şekildedir: katalizörlerde %74, metalurjik uygulamalar ve alaşımlarda %6, seramik ve camda %10, parlatmada %4 ve diğerleri olarak %6’dır. Ayrıca ekonomik açıdan incelenecek olursa, ABD’nin 2020’de ithal ettiği nadir toprak bileşiklerinin ve metallerinin tahmini değeri 109 milyon dolar iken bu değer 2021 yılında 160 milyon dolara yükselmiştir (USGS, 2022).

2.1.3 Nadir toprak elementlerinin bulunduğu maden yatakları

NTE’ler jeolojik olarak çeşitli magmatik tortul ve metamorfik kayaçlarda bulunmaktadır. Genellikle NTE kaynakları dört jeolojik ortamda yer almaktadır; Peralkali magmatik kompleksleri, zengin ağır nadir toprak elementleri içeriği nedeniyle araştırılmaktadır. Ayrıca, NTE içeren sistemlerdeki peralkali magmatik kaya türleri, kaynaklarına bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterebilmektedir. Karbonatitler, stoklardan, yassı gövdelerden, dayklardan, düzensiz şekilli kütlelerden damarlara kadar çeşitli şekillerde ve karbonat kimyasal bileşimlerinde meydana

gelmektedir. Ancak karbonatitlerin bileşimi diğer kalsitik, dolomitik, demir-karbonat veya siderit türlerinden farklıdır. İyon adsorpsiyonlu kil yatakları, güney Çin'deki ağır nadir toprak elementlerinin dünyadaki birincil kaynağıdır. Bu birikintiler genellikle farklı jeolojik süreçlerle orta ila yüksek yağışlı tropik bölgelerde oluşmaktadır. Monazit-ksenotim içeren plaser tortuları, kıyı ve kıyıya yakın kum ve silt tortuları ve akarsu ve nehir tortuları (flüviyal tortular) olmak üzere iki geniş yerleşim tortusudur. Her iki tortuda da ağır yoğun mineraller (monazit dahil) fiziksel olarak sınıflandırılmakta olup su hareketi ve yerçekimi ile birlikte birikmektedir (Arellano Ruiz ve diğ, 2021). Genel olarak nadir toprak elementleri yatakladıkları kayaçlarla olan ilişkisine göre birincil ve ikincil yataklar olarak sınıflandırılmaktadır:

A- Birincil yataklar;

- 1- Volkanik kayaçlarla ilişkili yataklar,
- 2- Granitik kayaçlarla ilişkili yataklar,
- 3- Pegmatitlerle ilişkili yataklar,
- 4- Alkalın-ultramafik ve karbonatitlerle ilişkili yataklardır.

B- İkincil yataklar;

- 1- Alüvyal (Akarsu) plaser yataklar ve
- 2- Sahil plaser yataklardır (MTA, 2017).

2.2 Dünya’da ve Türkiye’de Nadir Toprak Elementleri

2.2.1 Dünyada’ki NTE rezervi ve üretimi

Nadir toprak elementleri doğada tek başına saf olarak yer almamaktadır ve ana kaynağı magmatik kayalar olan yaklaşık olarak 200’den fazla mineralde bulunmaktadır (Cornelius ve diğ, 2021). Nadir toprak elementleri, isimlerinin aksine doğada oldukça yaygın bulunmaktadır. Yerkabuğundaki konsantrasyonları yaklaşık 150-220 g/t ve bu içerik birçok ana metal elementten daha yüksektir (Şen ve diğ, 2012). Yerkabuğunda en bol bulunan nadir toprak elementleri seryum, itriyum, lantan ve neodimdir (Gupta ve Krishnamurthy, 1992). Doğada daha çok oksit formunda bulunup bu şekilde pazarlanan NTE’ler "nadir toprak metalleri, NTM" ya da “nadir toprak oksitleri, NTO” olarak da tanımlanmaktadır (Yıldız, 2016).

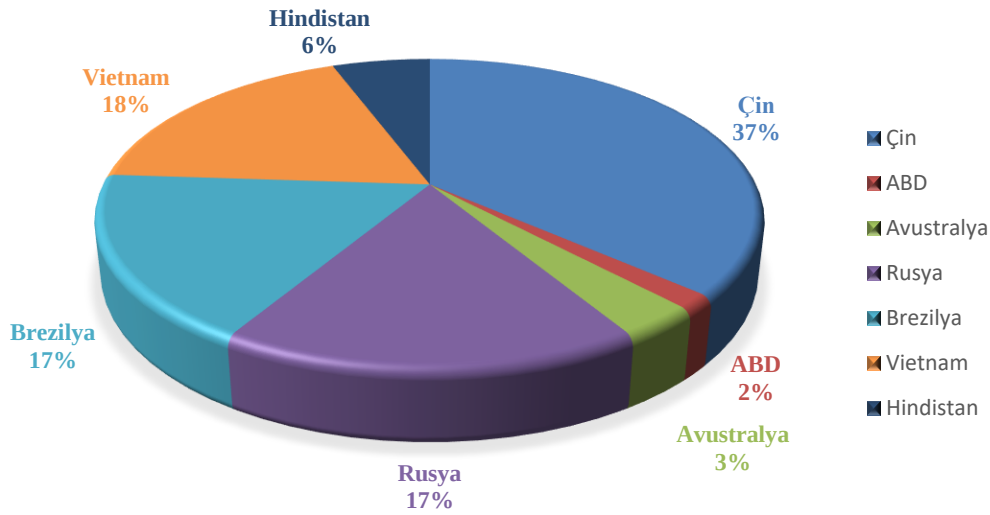
NTE'ler doğada elemental hallerde veya tek nadir toprak bileşikleri olarak bulunmayıp genellikle bazalt, granit, gnays, şeyl ve silikat gibi kaya oluşumlarında karışık nadir toprak bileşikleri olarak yer almaktadır ve farklı türlerde nadir toprak minerallerini oluşturmaktadır. Ancak dağılımları, farklı mineraller arasında önemli ölçüde değişmektedir. NTE'ler düşük konsantrasyonları nedeniyle çeşitli cevherlerin işlenmesi sırasında yan ürün olarak veya işlenmiş atıklardan geri kazanılan nadir toprak elementleri olarak üretilmektedir (Yasuo ve Masaharu, 2006).

Dünya'daki görünür nadir toprak oksit rezervleri incelendiğinde 30'dan fazla ülkeye dağılım gösterdiği ve bu miktarın yaklaşık yüz milyon ton olduğu bilinmektedir (Zhanheng, 2011). 1980'lere kadar Amerika Birleşik Devletleri NTE üretiminde lider ülke konumunda iken 2011 yılından itibaren Çin, NTO üretiminin %97'sini kapsayacak şekilde ilerleme göstermiş olup neredeyse küresel pazarda tek lider ülke konumunda bulunmaktadır (Grasso, 2013).

Çin'in NTE'ler için uyguladığı politikalar, küresel pazarda üretimde doğrudan söz sahibi olduğunu kanıtlar niteliktedir. NTE üretiminde lider ülke konumundaki Çin'i takip eden diğer ülkeler ise Burma, ABD, Avustralya ve Hindistan'dır. Çin, 2012-2017 yılları arasında NTE'lerin %80'den fazlasını konsantre, araürün ve kimyasallar olarak üretmiştir. Ancak, 2019 yılına gelindiğinde toplam NTE üretiminin neredeyse %62.9'unu kaybetmiştir. 1995-2019 yılları arasında Çin'in NTE rezervi % 50'den %36.7'ye gerileme göstermiştir (Jyothi ve Parhi, 2021).

Ülkelerin stratejik planlarından dolayı verilen rezerv bilgilerinin gerçekliği üzerinde tartışmalar var olmakla birlikte tahmini olarak bu değerlerden çok daha yüksek rezerv olduğu bilinmektedir (MTA, 2017).

Hükümetler ve endüstri kaynakları dikkate alınarak ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu tarafından elde edilen verilere göre, dünya genelinde yaklaşık olarak 120 milyon metrik ton NTE rezervi olduğu tahmin edilmektedir. Şekil 2.3'te Dünya NTE rezerv dağılımı ve Çizelge 2.2'de NTE maden üretiminin ülkelere göre dağılımı gösterilmektedir (USGS, 2022).



Şekil 2.3: Dünya NTE rezerv dağılımı.

Çizelge 2.2: NTE maden üretiminin ülkelere göre dağılımı.

Ülkeler	Maden üretimi, ton	
	2020	2021
Çin	140.000	168.000
ABD	39.000	43.000
Burma	31.000	26.000
Avustralya	21.000	22.000
Madagaskar	2.800	3.200
Hindistan	2.900	2.900
Rusya	2.700	2.700
Tayland	3.600	8.000
Vietnam	700	400
Brezilya	600	500
Burundi	300	100
Diğer ülkeler	100	300
Dünya toplamı (Yuvarlatılmış)	240.000	280.000

Şekil 2.3'te paylaşılan rezerv değerleri incelendiğinde en yüksek NTE rezervi %37 ile Çin'e ait olup, onu sırasıyla %18 Vietnam ve %17 paylarla Brezilya ile Rusya izlemektedir. Çizelge 2'de verilen USGS verilerine bakıldığında 2021 yılında NTE maden üretimi 2020 yılına göre yaklaşık 40 bin ton artış göstermekte ve bu üretimi yapan Çin ülkeler arasında ilk sırada yer almaktadır.

Moğolistan'da yer alan ve 1927'de demir rezervi olarak keşfedilmiş olan Bayan Obo yatağı, dünyadaki en büyük nadir toprak yataklanması olarak bilinmektedir. Kaliforniya'da 1952'de işletmeye alınan Mountain Pass yatağı ise ikinci en büyük nadir toprak yataklanmasıdır.

Dünya’da NTE’lerin ticari üretiminin %95’i bastnazit, monazit ve ksenotim minerallerinden gerçekleştirilmektedir. Çizelge 2.3’te ticari olarak NTE üretimi yapılan maden sahaları ülke ve firma bilgisi ile gösterilmektedir (Dushyanthaa ve diğ, 2020).

Çizelge 2.3: Dünya’da NTE üretimi yapılan sahalara ilişkin bilgiler.

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

İleri teknolojik süreçlerde kritik rolleri nedeniyle hem Avrupa Komisyonu hem de ABD Enerji Bakanlığı, NTE'yi kritik hammaddeler olarak görmektedir. Bununla birlikte küresel pazarda Çin, madencilik, zenginleştirme, rafine etme ve üretimden oluşan NTE tedarik zincirine hakimdir ve NTE hammaddelerinin ve oksitlerinin %85'inden fazlasını üretmektedir. NTE'nin tedarik zorluğuyla ilgili endişeler, kalıcı NTE mıknatısları, nikel metal-hidrit piller ve lamba fosforları gibi ömrünü tamamlamış ürünler ile kömür ve kömür yakma ürünleri gibi ikincil kaynaklardan NTE'nin geri kazanılmasına yönelik ilginin ve araştırmaların artmasına neden olmuştur (Lin ve diğ, 2017).

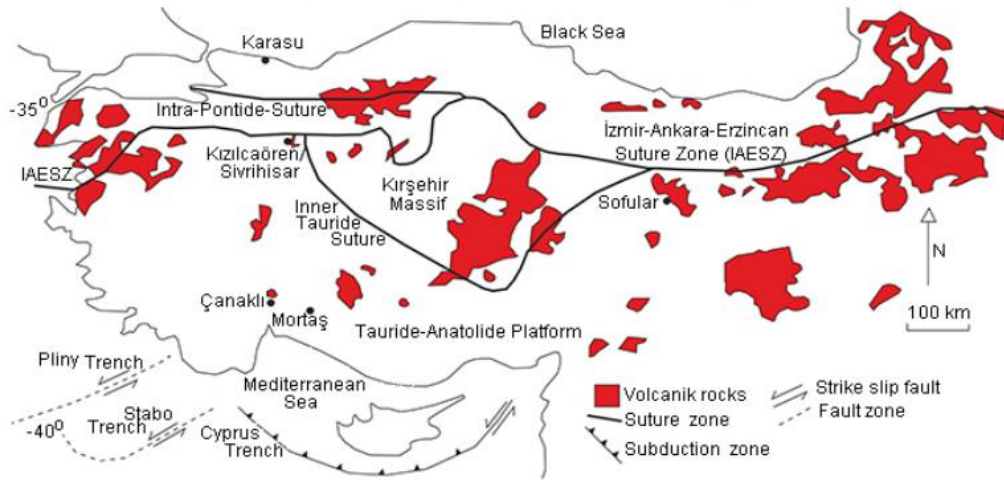
2.2.2 Türkiye’de NTE yataklanmaları

Ülkemizde NTE için yapılan çalışmalarda cevherleşmenin granitler, granitik pegmatitler, peralkalin, peraliminyumlu volkanikler, alkalin-ultramafik ve karbonatit komplekslerinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Denizel ya da alüvyal plaserler şeklinde biriken ikincil yataklar ise birincil nadir yataklarının ayrışması sonucu oluşmuştur (Gültekin, 1998).

MTA'nın (2017) yayımladığı rapora göre Türkiye'de NTE rezervine yönelik yapılan yaklaşık olarak 20 çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar 1965-2004 yılları arasında yer almakta olup çalışma alanları şu şekildedir:

- Eskişehir-Sivrihisar-Kızılcaören bölgesi ağırlıklı olmak üzere,
- Manisa-Turgutlu,
- Malatya-Darende ve
- Samsun- Bafra yöreleridir.

MTA Genel Müdürlüğü kaynaklarına göre Türkiye'deki en önemli NTE yatağı yaklaşık %3 tenörlü, 4.000.000 ton rezerve sahip olan Eskişehir – Kızılcaören bastnazit-fluorit-barit yatağıdır. Ayrıca %24 tenörlü, 1000 ton britolit cevherleşmesinin olduğu tahmin edilen Malatya–Kuluncak yöresi de önemli bir kaynak olarak görülmektedir (MTA, 2017). Şekil 2.4'te Türkiye'de NTE yataklanmasına uygun bölgeler gösterilmiştir (Yıldız, 2016).



Şekil 2.4: Türkiye'de NTE yataklanmasına uygun bölgeler.

2.3 NTE İçeren Mineraller

NTE'ler doğada saf metal olarak bulunmayıp genellikle bileşik halinde bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda oksit, karbonat, silikat ve fosfat bileşikleri şeklinde NTE içeren çok sayıda mineral bulunmaktadır. NTE'ler üretim kaynağı açısından incelendiğinde en önemli minerali bastnazittir. Ayrıca NTE'lerin bulunduğu diğer kaynaklar ise ksenotim, plaser yataklar, uranyum, bozuşmuş killer ve karbonatitlerdir (Yıldız, 2016). Ticari ölçekte çıkarılan nadir toprak elementi içeren

mineraller sadece bastnazit, monazit ve ksenotimdir (Jordens ve diğ, 2013). Ancak ekonomik açıdan değerlendirildiğinde işlenebilir mineral sayısı yaklaşık 10 olup bu mineraller Çizelge 2.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4: Ekonomik değer taşıyan NTE mineralleri.

Mineral Adı	Kimyasal Bileşimi	NTO içeriği, %	Yoğunluğu, gr/cm ³
Bastnazit	[(Ce,La)CO ₃]F	72	4.95-5.0
Monazit	(Ce,La,Nd,Th)PO ₄	60-70	4.6-5.4
Ksenotim	YPO ₄	53-65	4.4-5.1
Cerit	(Ca,Mg) ₂ Ce ₈ (SiO ₄) ₇ .3H ₂ O	60-70	4.70-4.86
Aeschynite	(Y,Er,Ce,U,Pb,Ca)(Nb,Ta,Ti) ₂ (O.OH) ₆	16-29	4.82-4.93
Samarskit	(Y,Er,Fe,Mn,Ca,U,Th,Zr)(Nb,Ta) ₂ (O.OH) ₆	10-38	5.6-5.8, Ort=5.69
Fergusonit	(Y,Ce,U,Th,Ca)(Nb,Ta,Ti)O ₄	31-44	4.3-5.8, Ort=5.05

2.4 NTE Üretim ve Zenginleştirme Yöntemleri

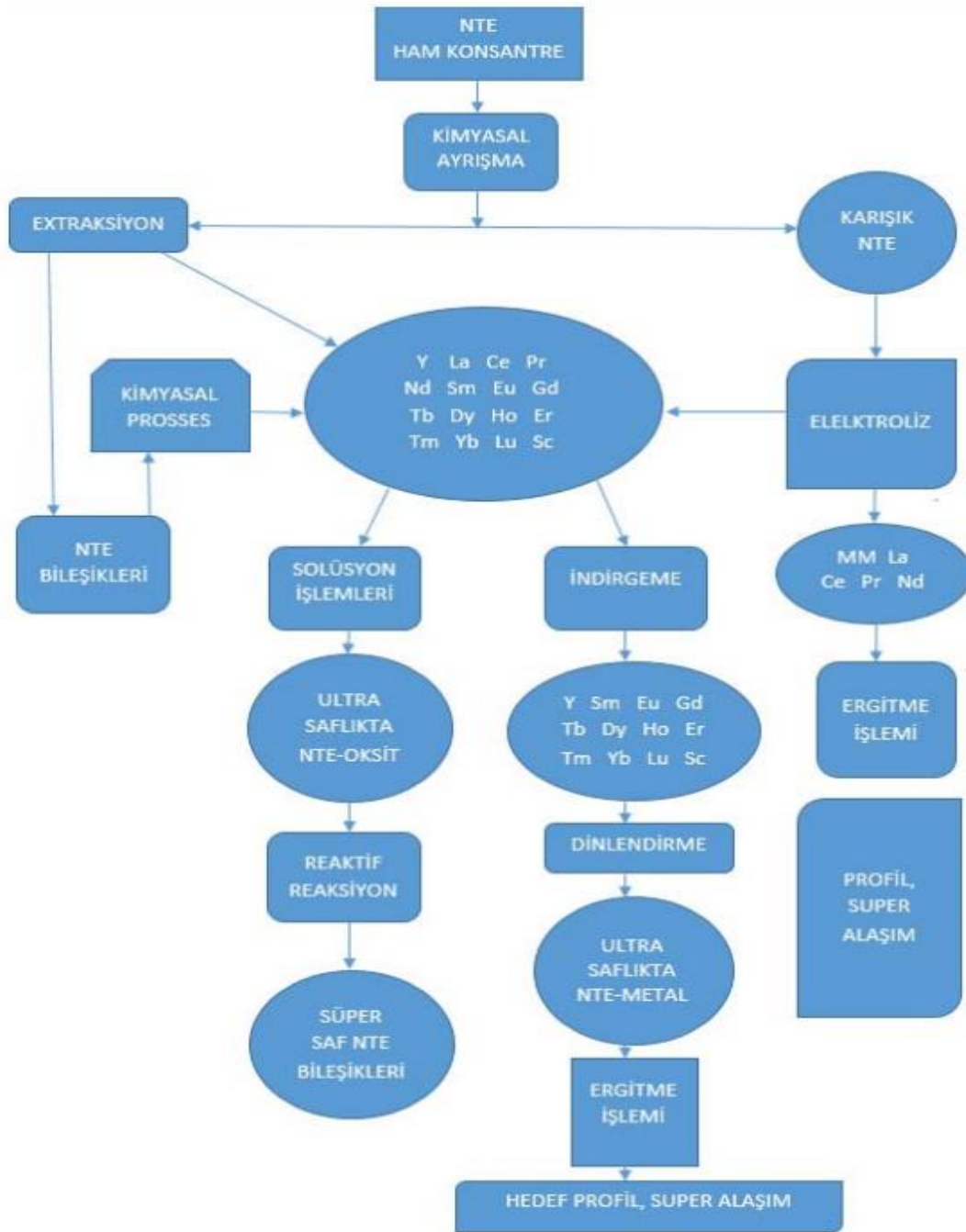
NTE üretim yöntemleri genel olarak;

- Çözelti madenciliği,
- Yer altı madenciliği ve
- Açık işletme yöntemlerinden oluşmaktadır.

Bunlar içerisinde çözelti madenciliği ülkelerin belirlediği izinler çerçevesinde kullanılmaktadır. Çıkarılan hammaddelerin ürün haline gelmesi ise kırma, öğütme, kimyasal ve metalürjik işlemler neticesinde olmaktadır. NTE ham konsantrenin endüstriyel kullanıma geçiş süreci Şekil 2.5'te gösterildiği gibidir (MTA, 2017). Dünya'da nadir toprak minerallerinin oksit formunda üretimi ticari öneme sahip olan bastnazit (yaklaşık %80'i), monazit ve ksenotimden (yaklaşık %4'ü) gerçekleşmektedir. Bu minerallerin zenginleştirilmesinde büyük bir öneme sahip olan kimyasal zenginleştirme yöntemi hidrometalurjik proseslerdir. Hidrometalurjik prosesler içerisinde, kavurma, liç, ayırma, saflaştırma ve kazanma kademeleri yer almaktadır. Fiziksel ve fizikokimyasal zenginleştirme yöntemleri;

- Gravite farkına göre ayırma,
- Manyetik ayırma,

- Elektrostatik ayırma ve
- Flotasyon prosesleridir (Tanaydın, 2021).



Şekil 2.5: NTE ham konsantrenin endüstriyel kullanıma geçiş süreci akım şeması.

NTE'lerin kullanım amacına göre zenginleştirme yöntemleri belirlenmektedir ve oldukça karmaşık bir prosestir. İlk kademede NTE içeren mineraller toplu konsantre olarak ayrılmaktadır. Bu aşamanın ardından seçimli konsantre ayrımı

gerçekleştirilmektedir ve NTE konsantresi eldesine kadar proseste çok farklı metotlar uygulanmaktadır (Yıldız, 2016).

2.4.1 NTE'lerin fiziksel, fiziko-kimyasal ve kimyasal zenginleştirme yöntemleri ile kazanımı

Son yıllarda yüksek tenörlü rezervlerin azalmaya başlaması ile birlikte, dünyada düşük tenörlü rezervlerin yüksek metal kazanımlarıyla ekonomik olarak değerlendirilmesi konusu dikkat çekmektedir. Mineraller sahip olduğu değişik özellikler ile fiziksel ve kimyasal ortamlarda farklı davranışlar gösterebilmektedir. Tüm bu farklılıklar zenginleştirme ve ayırma işlemlerinde, mineral özelliklerinin daha çok incelenmesini ve uygun proses kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Buna bağlı olarak cevher hazırlamada minerallerin özelliklerine göre fiziksel, fiziko-kimyasal ve kimyasal zenginleştirme yöntemleri bulunmaktadır (Yıldız, 2014).

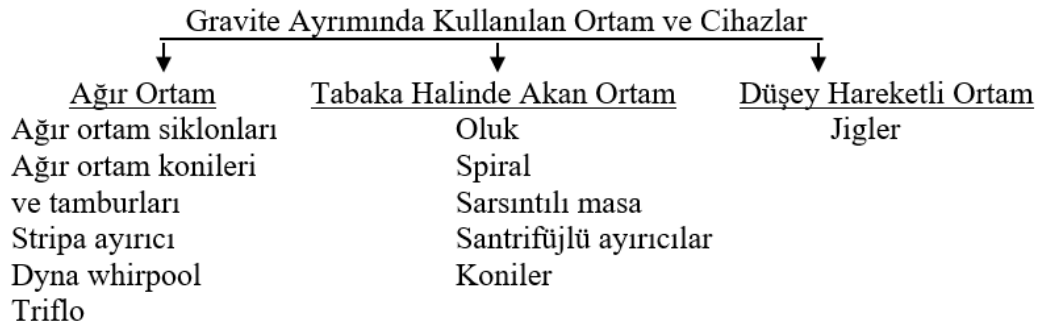
2.4.2 Fiziksel zenginleştirme yöntemleri

2.4.2.1 Özgül ağırlık farkı ile zenginleştirme yöntemi

Fiziksel yöntemler, aralarında yoğunluk farkı bulunan mineralleri ve sahip oldukları safsızlıkları birbirinden ayırmak için cevher hazırlamada en çok kullanılan ve ekonomik olan metotlardır. Plaser ya da sahil kumlarından zirkon, rutil ve ilmenitin üretimi sırasında yan ürün olarak elde edilen monazit ve ksenotim gibi mineraller genellikle fiziksel yöntemlerden gravite ile kazanılmaktadır. Dünyada NTE üretimine yönelik yapılan çalışmaların %75'i plaser yataklardan gerçekleştirilmekte olup bu yataklardaki değerli mineral içeriği genellikle ağırlıkça %3-5 arasında değişmektedir. Bu değer düşük olması zenginleştirme işleminde daha fazla malzeme ile çalışılmasına sebep olmaktadır. Zenginleştirme işleminin başlangıcında şlam ve atığın ayrılmasıyla malzeme miktarı düşürülmekte ve yapılacak işin ekonomik olması sağlanmaktadır. Kuru ve yaş yöntemlerin birlikte kullanıldığı plaser yataklardaki NTE 'lerin kazanımı için gravite, manyetik ve elektrostatik yöntemler kullanılmaktadır. Plaser yataklarda bu yöntemlerle birbirinden ve safsızlıklarından ayrılan mineraller; ilmenit, rutil, lökoksen, zirkon ve monazittir. Daha ince boyutlarda çalışılması durumunda kullanılan yöntemler değişmektedir. Örnek olarak eğer cevher 100 µm altına öğütülürse gravite ile zenginleştirme bu boyutta zor olmaktadır ve bu durumda cevher flotasyon yöntemiyle zenginleştirilmektedir (Yıldız, 2016).

Özgül ağırlık farkına göre yapılan zenginleştirme işlemi, kısmen yüksek yoğunluğa sahip ($4-6 \text{ g/cm}^3$) nadir toprak minerallerinin düşük yoğunluğa sahip gang minerallerinden ayırmak için kullanılan etkili bir yöntemdir (Jordens ve diğ, 2013). Literatürde yer alan çalışmalara bakıldığında, Özbayoğlu ve Atalay (2000), yapmış oldukları çalışmalarda dağıtma-yıkama-siklon-multi gravite ayırma işlemleri kullanılmış olup %7,9 içeriğine sahip NTO'lerden %35,5 verimle %48 NTO içerikli bir konsantre elde edilmiştir. Khanchi ve diğ. (2014) yapmış olduğu diğer bir çalışmada ise toplam NTO içeriği 2860 g/t olan İran monazit cevherini, Humphrey spirali kullanarak %58 verimle konsantre içeriği 6050 g/t olan NTO olarak elde etmişlerdir.

Genel olarak gravite ile ayırmada kullanılan ortamlar ve cihazlar Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Celep, 2005).

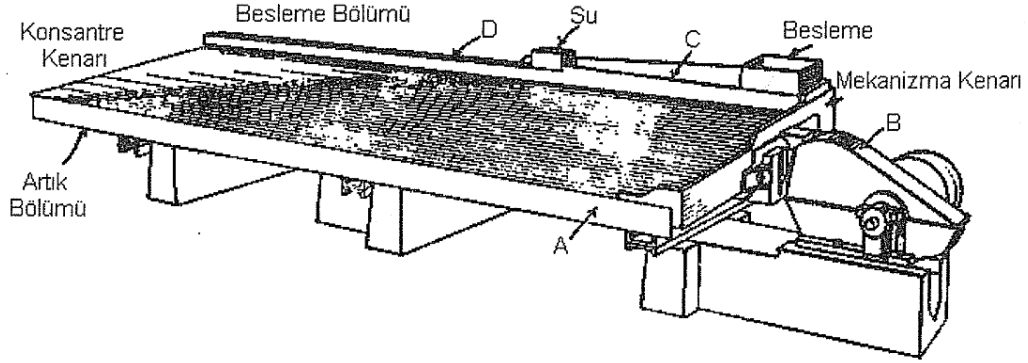


Şekil 2.6: Gravite ayırmada kullanılan ortamlar ve cihazlar.

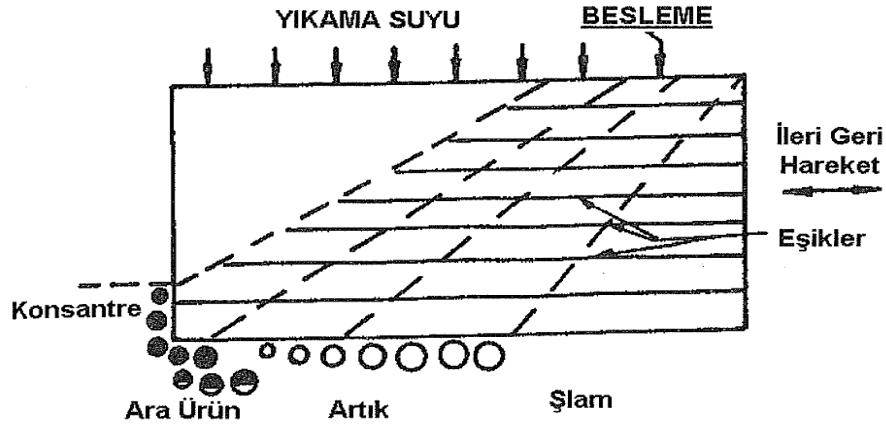
Sarsıntılı masa

Sarsıntılı masa, yıllardır cevher hazırlamada kullanılan geleneksel gravite cihazlarından biridir. Ayırma prensibi esas olarak beslemedeki minerallerin özgül ağırlığına, tane boyutuna ve tane şekline göre gerçekleştirilmektedir (Abaka-Wood ve diğ, 2019). Yatay su akımı ile zenginleştirme yapan sarsıntılı masalar, dikdörtgen, paralelkenar ve yamuk şeklinde olabilmektedir. Masa, uzun eksen doğrultusunda ileri-geri olacak şekilde hareket etmesini sağlayan bir mekanizmaya sahiptir. Yatay yüzey ile hafif eğim yapan bu cihazların yüzeyi ayırma etkinliğini artırmak için eşikler ile kaplıdır. Eşik yükseklikleri masada ürünlerin alınacağı noktalara göre farklılık göstermektedir. Mekanizma kenarından konsantre kenarına doğru azalan ve konsantre ucunda sıfırlanan bir eşik yüksekliği sistemi vardır. Günümüzde en sık kullanılan masa dikdörtgen şekline yakın olan Wilfley sarsıntılı masasıdır. Tanelerin ayrımı gravite kuvveti, su ve diyagonal masa hareketi ile gerçekleşir. Tanelerin masadaki davranışına

göre sarsıntılı masadan konsantre, araürün, artık ve şlam ürünleri alınmaktadır. Sarsıntılı masanın genel görünümü ve tanelerin masadaki davranışı sırasıyla Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de verilmektedir.



Şekil 2.7: Sarsıntılı masanın genel görünümü.



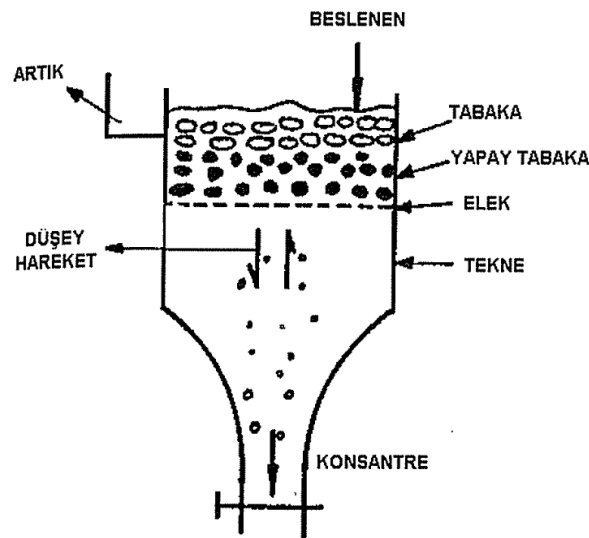
Şekil 2.8: Sarsıntılı masada tanelerin hareketi.

Sarsıntılı masanın çalışmasında etkili olan faktörler makine ve besleme olarak iki parametre şeklinde incelenebilmektedir. Makine parametreleri genel olarak masa hareketinin hız ve genliği, eğim, eşik tertibi ve masa yüzeyidir. Besleme parametreleri ise katı özellikleri ve pülp özellikleridir. Katı özellikleri besleme boyutu, kapasite, ürün alma oluklarının çalışma düzeni oluştururken; pülp özelliklerini ise besleme oranı, yoğunluk ve yıkama suyu oluşturmaktadır. Ayırmanın verimli olabilmesi için beslenen malzeme dar boyut gruplarına ayrılmaktadır. Masaya beslenen malzemenin cevher için boyutu 3 mm kadar olabilmektedir. Kömür zenginleştirilmesinde ise üst besleme boyutu 10 mm’ye çıkabilmektedir. Masaya beslenen pülpün katı oranı genellikle cevherler için %20-30 iken kömürde bu aralık %40 kadar olmaktadır. Ayrıca besleme boyutu ve zenginleştirme amacına göre masaya verilen yıkama suyu 1-2 L/dak ile 100 L/dak arasında değişebilmektedir (Acarkan ve Önal, 2014).

NTE mineralleri nispeten daha yüksek özgül ağırlığa ($4-7 \text{ g/cm}^3$) sahip oldukları için gravite yardımıyla düşük özgül ağırlığa sahip kuvars gibi gang minerallerinden kolayca ayrılabilir. Gravite ayırımının en yaygın uygulama alanı ağır mineral kumlarından monazit eldesidir (Jordens ve diğ., 2013). Literatürde yer alan ikincil kaynaklar içerisinde verilen kömür ve atıklarından NTE kazanımı üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, gravite farkına dayalı olarak yapılan zenginleştirme deneyleri kapsamında sarsıntılı masa kullanımı ile NTE'lerin yalnızca 1,1 kat zenginleştiği tespit edilmiştir (Zhang ve diğ., 2020).

Jig

Jig, düşey hareketli bir ortamda mineral tanelerinin gravite farkına dayalı olarak ayrılmasının sağlayan cihazdır. Akışkan ortamı genellikle su oluşturur, ancak hava da nadiren de olsa akışkan ortam olarak kullanılmaktadır. Ayrıca jig gravite cihazı zenginleştirme amaçlı olarak çok eskilerden beri iri kömür ve cevherlerde uygulanmaktadır. Jig cihazında tanelerin farklı özgül ağırlıklara sahip olması nedeniyle bir tabakalaşma oluşmaktadır. Bu tabakalaşma ile en ağır tabaka jig yatağının altında oluşurken, en hafif tabaka ise en üstte meydana gelmektedir. Ağır tabaka, jig gravite cihazındaki eleğin altından tekne ürünü olarak ya da elek üstünden alınırken; hafif tabaka ise serbest taşma ile beslemenin karşısında bulunan uçtan alınmaktadır. Ayrıca jig cihazında gravite kuvvetinin dışında etkili olan başka kuvvetler de bulunmaktadır. Şekil 2.9'da jig cihazına ait şematik görünüm verilmiştir (Acarkan ve Önal, 2014).



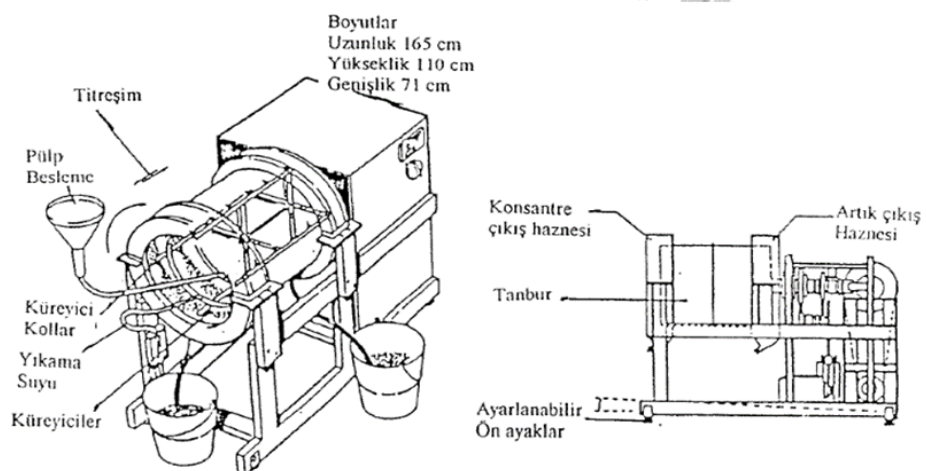
Şekil 2.9: Jig cihazı şematik görünümü.

Santrifüjlü gravite ayırıcılar

Yoğunluk farkına dayalı zenginleştirmelerde, santrifüj kuvvetin etkinliği ile çok ince taneli ağır minerallerin kazanımı söz konusudur. Gravite kuvvetine göre yaklaşık 50 kat daha üstün olan santrifüj kuvveti, şiddetinin artırılmasıyla daha ince boyutlu tanelerin kazanılmasına olanak sağlamaktadır (Celep ve diğ, 2006).

Bu tip ayırıcılarda merkezkaç kuvveti etkin olup yatay akışkan ortam içerisinde tanelerin ayrılması sağlanmaktadır. Endüstriyel ölçekte en çok MGS, Knelson ve Falcon santrifüj cihazları kullanılmaktadır. Knelson ve Falcon santrifüj cihazları düşey eksenli etrafında dönen kova tipi ayırıcılar olarak adlandırılırken, MGS santrifüj cihazı ise yatay eksenli etrafında dönen tambur tipi ayırıcı olarak bilinmektedir.

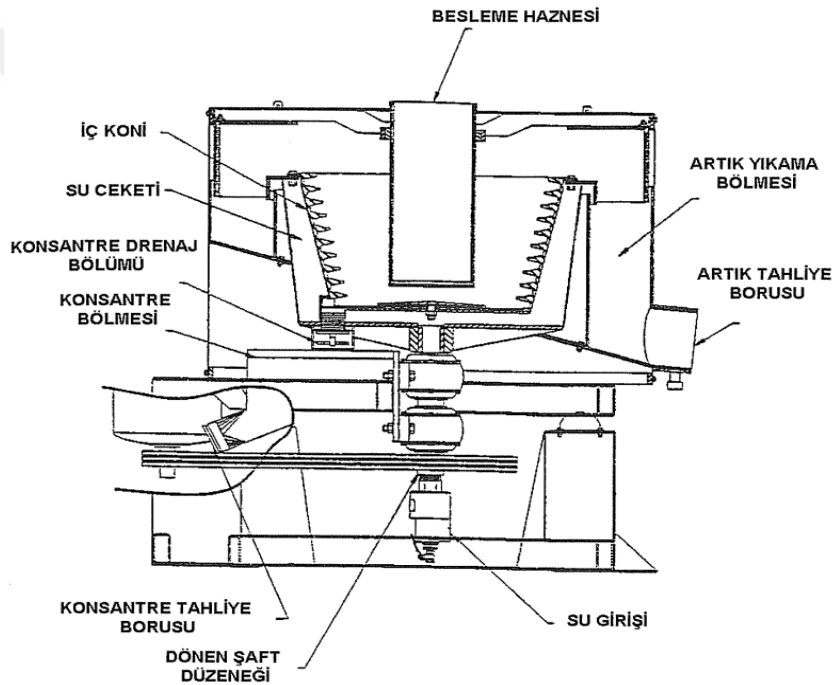
MGS’de tanelerin birbirinden ayrılma işlemi, %20-50 pülpte katı oranına sahip malzemenin belli bir eğime sahip tamburun içerisinde yaklaşık 150-300 dev/dak hızla dönmesiyle gerçekleşmektedir. Akışkan tabakanın alt kısmında gravite ve merkezkaç kuvvetinin etkisiyle ağır taneler yarı katı bir form oluştururken, tabakanın üst kısmında ve yarı sulu haldeki hafif taneler boşalma ucuna doğru hareket etmektedir. Tambur tabanında bulunan ağır taneler küreyiciler yardımıyla yukarı taşınıp tamburun üst kısmından alınmaktadır. Tabakanın üst kısmında kalan hafif taneler ise yıkama suyunun etkisiyle birlikte tamburun alt kısmından alınmaktadır. Şekil 2.10’da C-900 tipi laboratuvar/pilot ölçekli MGS cihazına ait şematik görünüm verilmiştir (Chan ve diğ, 1991).



Şekil 2.10: C-900 tipi laboratuvar/pilot ölçekli MGS’nin genel görünümü.

Knelson santrifüj cihazındaki ayırım, konik bir haznenin içinde tanelerin engelli çöküşünden yararlanarak gerçekleştirilmektedir. Haznenin içerisinde 60 g’ye kadar

ıkan bir kuvvet oluşmaktadır. Cihazın mekanik yapısı da engelli çöküő ortamını oluşturmaya yardımcı olmaktadır. Haznenin etrafında basınçlı su sistemi yer almaktadır. Yaklaşık %70 pülp te katı oranına sahip malzeme haznenin orta kısmına beslenmektedir. Besleme devam ettikçe ağır taneler haznede hafif tanelerin yerini almakta olup bu işlem haznede ağır taneler kalana kadar devam etmektedir. Yıkama ile ağır taneler hazneden alınırken, hafif taneler ise cihaz çalışırken haznenin içinden yukarıya doğru hareket ederek dışarıya alınmaktadır. Standart tipteki Knelson cihazı kesikli olarak çalışmaktadır. Standart tip dışında merkezi boşaltmalı ve değişken boşaltmalı olmak üzere 3 farklı tipte imal edilen Knelson cihazı bulunmaktadır. Standart tip Knelson cihazı şekil 2.11’de verilmiştir (Acarkan ve Önal, 2014).



şekil 2.11: Standart tip Knelson cihazı.

Kiser ve diğ. (2015) yapmış olduğu bir çalışmada ABD’deki Eagle kömür damarı, Fire Clay kömür damarı ve Fire Clay Rider kömür damarlarından alınan numuneler üzerinde MGS santrifüj cihazı kullanılarak birtakım zenginleştirme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre MGS santrifüj cihazı daha çok orta ve yüksek yoğunluğa sahip fraksiyonlardaki NTE’leri zenginleştirmede etkili olmuştur. Yüksek yoğunluğa sahip fraksiyonun NTE içeriğinin fazla olması kül içeriğinde meydana gelen artışla ilişkilendirilmiştir. Ancak beslenen malzemeye göre zenginleştirme ürünleride yeterli düzeyde NTE konsantrasyonu elde edilememiştir.

Kömür ve yan ürünlerinden NTE kazanımına yönelik yapılan zenginleştirme işlemlerinden gravite farkına dayalı ayırma metodu, liç işleminden önce daha yüksek konsantrasyonlarda NTE minerallerinin hazırlanması için önemli bir tekniktir. Ancak gravite farkına dayalı zenginleştirme yöntemi ile konsantrasyonda önemli miktarda gang minerali içeren düşük zenginleştirme ve düşük konsantrasyonlu NTE ürünleri elde edilmektedir. Ayrıca bu yöntemde kömürden NTE'leri etkili bir şekilde kazanmak için büyük ölçüde öğütme gerekmektedir ve bu da enerji kullanımının artmasına neden olup ekonomik açıdan olumsuz bir etki oluşturmaktadır (Eterigho-Ikelegbe ve diğ., 2021).

2.4.2.2 Manyetik ayırma yöntemi

Nadir toprak minerallerinin zenginleştirilmesinde kullanılan bir diğer fiziksel zenginleştirme yöntemi manyetik alan farkına göre yapılan zenginleştirmedir. Daha seçici ayırma işlemlerinden önce manyetit gibi yüksek alan şiddetli manyetik mineralleri ortadan kaldırmak için kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca paramanyetik mineral olan monaziti, rutil ve zirkon gibi manyetik olmayan ağır gang malzemelerden ayırmak için de kullanılmaktadır.

Ksenotim minerali monazite kıyasla manyetik ayırma yöntemine daha duyarlı olmasına rağmen ince boyutlarında ($<100\ \mu\text{m}$) flotasyon ile zenginleştirme yöntemi kullanılmaktadır. (Jordens ve diğ., 2013).

Manyetik ayırma yöntemi, liç işleminde demir ile kirlenme riskini en aza indirdiği için avantajlı olabilmektedir (Eterigho-Ikelegbe ve diğ., 2021).

2.4.2.3 Elektrostatik ayırma yöntemi

Elektrostatik ayırmanın nadir toprak elementlerinin zenginleştirilmesindeki kullanım amacı, monazit ve ksenotim gibi minerallerin kendileri ile benzer özgül ağırlık ve manyetik özelliklere sahip olan gang minerallerinden ayrılmasını sağlamaktır. En çarpıcı örneği sahil kumlarındaki ağır minerallerin manyetik ayırma işleminin sonucunda konsantrasyona edilmesidir. İlmenit iletken bir mineral olduğu için ksenotimden ayrılması elektrostatik ayırma ile gerçekleşmektedir. Elektrostatik ayırma sahil kumlarındaki nadir toprak minerallerinin zenginleştirilmesinde önemli olmasına rağmen büyük bir dezavantaja da sahiptir. Elektrostatik ayırma için kullanılacak malzemenin kuru olması gerekmektedir. Sahil kumlarındaki nadir toprak mineralleri

haricinde bilinen diğer nadir toprak kaynakları için (iyon adsorbe edilmiş killer dışında) elektrostatik ayırma öncesinde boyut küçültme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla kullanılacak malzeme de çoğunlukla pülp halinde beslenmektedir. Elektrostatik ayırma işleminin gerçekleştirilmesi için öğütülmüş cevherin tamamen kuru hale getirilmesi amacıyla harcanak olan enerji, maliyet açısından değerlendirilmektedir. Tüm değerlendirmeler sonucunda elektrostatik ayırmanın endüstriyel olarak kullanımının maliyet açısından uygun olmadığı belirtilmektedir. Birçok çalışma, elektrostatik ayırma yöntemini demir madeni atıklarından, bastnazit cevherlerinden ve diğer ikincil kaynaklardan NTE'leri kazanmak için kullanmıştır. Öte yandan, NTE kazanımı için kömürü elektrostatik ayırmaya tabi tutan çalışma sayısı oldukça azdır (Moghise ve diğ, 2016).

2.4.3 Fiziko-kimyasal zenginleştirme yöntemi

2.4.3.1 Flotasyon

Flotasyon ile zenginleştirme yöntemi, yerçekimi yöntemiyle zenginleştirilmesi zor olan ince boyutlarda mineral kayıplarını engellemek için tercih edilen bir diğer metottur. Serbestleşme boyutu 100 µm ile 15 µm arasında olan veya doğal olarak bulunan mineraller flotasyon yöntemiyle zenginleştirilmektedir (Yıldız, 2016).

En önemli nadir toprak mineralleri bastnazit, monazit ve ksenotim olup başlıca gang minerallerini barit ve kalsit oluşturmaktadır. Flotasyon yöntemiyle bu minerallerin sahip olduğu yüzey özelliklerindeki farklılıklar ile zenginleştirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Ancak hem kıymetli hem de gang minerallerinin oksitli yapıya sahip olması nadir toprak minerallerinin flotasyonunu zorlaştırmaktadır (Anderson ve diğ, 2016).

Çin'deki Bayan Obo demir yatağından NTE kazanımı yanı sıra ekonomik olarak farklı zenginleştirme kademelerinde manyetit, hematit, florit ve niobiyum gibi mineraller elde edilmektedir. Bu amaçla önce boyut küçültme işlemi ile cevherin 75 µm boyutuna öğütülmesi gerçekleştirilmektedir. Flotasyon ile zenginleştirme işlemi için ortam pH'ı Na_2CO_3 ile bazik olarak ayarlanmaktadır. Toplayıcı olarak da parafin kullanılmaktadır ve bazik ortamda demir ve silikat mineralleri bastırılmaktadır. Batan kısımdan da demir ve niobiyum mineralinin kazanımı yapılmaktadır.

Şlamı uzaklaştırılan ve safsızlıkları kısmen temizlenen NTE minerallerinin flotasyonunda ortam pH'ının ayarlanması için Na_2CO_3 , safsızlıkların bastırılması için Na_2SiO_3 ve Na_2SiF_6 , toplayıcı olarak da hidroksamik asit kullanılmaktadır. Kalsit, florit ve barit pH 5-6 civarında bastırılmaktadır. Yapılan seçimli flotasyon sonucunda içerisinde monazit ve bastnazit bulunduran %45'lik NTE konsantresi %80 verimle elde edilmektedir (Yıldız, 2016).

Nadir toprakların flotasyon ile zenginleştirilmesinde tesis bazında kullanılan ve sıkça tercih edilen toplayıcılar oleik asit ve hidroksamik asittir. Ayrıca flotasyon işleminde baskın olan adsorpsiyon türünün de kimyasal adsorpsiyon olduğu tahmin edilmektedir. Tesislerde en çok kullanılan toplayıcı türleri de Çizelge 2.5'te gösterildiği gibidir.

Çizelge 2.5: NTE flotasyonu için tesislerde en çok kullanılan toplayıcı türleri.

Mineral Adı	Toplayıcı Türü	Örnek	pH
Monazit ya da Bastnazit	Alkil karboksilik asit	Yağ asidi, Oleat, Talol	6-9
Bastnazit	Alkil fosforik asit	Alkil fosfat Easter P538	4-5
Bastnazit	Hidroksamik asit	Hidroksamik H205	8-8.5
Bastnazit	Aromatik fosforik asit	Stiren fosforik asit	6-10
Bastnazit	Aromatik karboksilik asit	Ftalik asit	5
Bastnazit	Aromatik amit	-	5-6
Monazit ya da Bastnazit	Reaktif Birleşimi	Yağ asidi ve Hidroksamik karışımı	-

Nadir toprak minerallerinden ksenotim ve monazitin flotasyon ile zenginleştirme işlemi pH 7'den büyük olduğu değerlerde anyonik toplayıcı olan oleik asit ve sodyum oleatın kullanılması ile gerçekleştirilebilmektedir. Bastırıcı olarak sodyum metasilikat ve sodyum sülfat kullanılarak gang mineralleri uzaklaştırılabilmektedir. Yapılan çalışmalarda da bastnazitin monazitten seçimli flotasyonunda toplayıcı olarak benzoik asit, bastırıcı olarak da potasyum alum kullanılarak flotasyon ile zenginleştirme işlemi yapılabilmektedir (Zhang ve diğ, 2015).

Flotasyon yöntemi, minerallerin yüzey özelliklerindeki farklılıklarının yanı sıra kömür gibi malzemeler için de kullanılan bir zenginleştirmedir. Tane boyutları 50 μm ile 400 μm arasında değişen çok çeşitli cevherler işlenebilmektedir (Sinnott ve Towler, 2020).

Zhang ve diğ. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, köpürtücü ve toplayıcı olarak sırasıyla metil izobütil karbinol ve dizel kullanılmış olup ince atık kömürden NTO zenginleştirilmesinde dekarbonizasyon (karbon uzaklaştırma) işlemi kullanılmıştır. pH kontrol kimyasalları olarak hem HCl hem de NaOH kullanmıştır ve %10 kül ve

%85 yanıcı malzeme içeren temiz bir kömür ürünü elde etmişlerdir. Böylece, NTE'nin zenginleştirilmesinden önce kömür kazanımı da sağlanarak ekonomik bir proses amaçlanmıştır.

Honaker ve diğ. (2016), üç kömür damarından (Fire Clay, Fire Clay rider, Eagle Seam) numune alarak birtakım flotasyon deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu amaçla kömür numunelerinde bulunan monazitin kazanımı için pH 9.5'ta üç yağ asidini (Talon 9400, sodyum oleat ve oleik asit) toplayıcı olarak kullanmışlardır. Talon 9400 ve sodyum oleat toplayıcıları ile %65–%70'lik bir toplam NTE kazanım değeri ile düşük NTE konsantresi elde edilmiştir. Oleik asit kullanımı ile %50'yi aşmayan düşük kazanım değerlerine sahip, 380 g/t içerikli oldukça zengin bir NTE konsantresi elde edilmiştir. Çalışma, kaba devre ve temizleme devrelerini içeren optimize edilmiş bir flotasyon ile 1182 g/t'lik bir NTE kazanımıyla sonuçlanmıştır.

Huang ve diğ. (2018), farklı parçacık boyutlarına sahip üç kömür hazırlama tesisinden (Fire Clay, Fire Clay Rider, Eagle Seam) elde edilen kömür araürünlerini ve atıklarını zenginleştirmek için flotasyon yöntemini kullanmıştır. Toplayıcı ve köpürtücü olarak sırasıyla MIBC ve gazyağı kullanılmıştır. Flotasyon, gang minerallerinin etkili bir şekilde uzaklaştırılması için bir başlangıç aşaması ve iki temizleme aşamasından oluşur. Sonuçlar, 20 µm'dan daha küçük parçacık boyutlarında, flotasyon atıklarındaki NTE içeriğinin, kül içeriğindeki artışla arttığını göstermiştir.

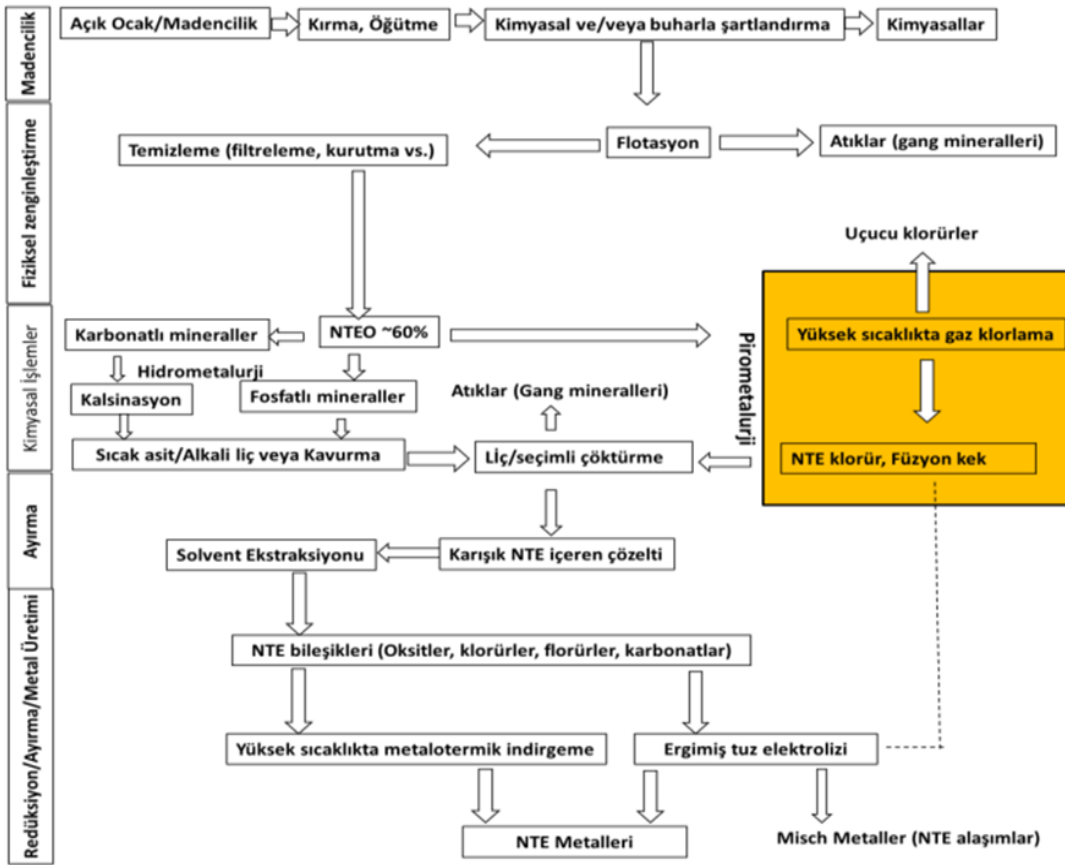
Flotasyon, hidrometalurjik prosesler öncesi NTE bakımından zengin bir ön konsantrenin üretilmesi için uygun bir ön zenginleştirme yöntemidir. Bununla birlikte, ana dezavantajı, uygun bir NTE zenginleştirmesi elde etmek için besleme malzemesi olarak son derece ince bir boyuta ulaşılması gerekliliğidir. Bu durum enerji ve maliyet açısından zorlu bir süreç oluşturmaktadır ve bir sonraki aşamada saflaştırma maliyetlerini artırmaktadır. (Eterigho-Ikelegbe ve diğ, 2021). Fiziksel ayırma işlemlerinin genel hedefi, yüksek NTE içeren bir fraksiyonu düşük NTE içeren bir fraksiyondan ayırmaktır. Bu nedenle, fiziksel ayırma işlemi, numunede bulunan istenmeyen malzemenin ortadan kaldırılması amacıyla yaygın olarak ön zenginleştirme adımı olarak kullanılmaktadır. Bu işlemler, işlenecek malzeme miktarını sınırlayarak, NTE'leri belirli bir fraksiyonda yoğunlaştırmaya yardımcı olmaktadır. Ayrıca, NTE'lerin kazanımı sırasında kullanılan asit miktarını azaltarak kazanım sürecini zorlaştıran demir oksitlerin varlığını azaltmaya yardımcı olmaktadır (Jyothi ve Parhi, 2021).

Kömür yakma külleri için fiziksel ayırma işlemi, NTE'leri önceden konsantre hale getirmek için kullanılmakta olup, böylece kimyasal zenginleştirme işlemlerine daha yüksek içerikli bir besleme malzemesi sağlayarak genel kazanım maliyetinde bir azalmaya neden olmaktadır.

Fiziksel zenginleştirme ile ilişkili düşük kazanım ve yüksek üretim maliyetleri göz önüne alındığında, birçok araştırmacı, NTE'lerin kömür atıklarından doğrudan kimyasal olarak eldesini değerlendirmiştir. Böylece, asit liçi ile öncesinde termal ve alkali işlem uygulamalarının, NTE'lerin liç verimlerinde olumlu etkiler gösterdiği tespit edilmiştir (Zhang ve diğ, 2020).

2.4.4 Kimyasal zenginleştirme yöntemi

Metalurjik zenginleştirme yöntemi olan hidrometalurjik prosesler, cevherden nadir toprak elementleri kazanmak için kullanılan en etkili yöntem olarak bilinmektedir. Nadir toprak elementleri için sıkça kullanılan metalurjik proses Şekil 2.12'de gösterilmektedir (Tanaydın, 2021). Nadir toprak elementlerinin konsantreleri incelendiğinde yapısında su içinde çok az miktarda çözülebilen karbonat, florit, fosfat, oksit veya silikat gibi bileşikler bulundurduğu tespit edilmiştir. Birtakım kimyasal proseslerden sonra bu konsantreler su ve mineral asitlerinde çözülebilir kıvama getirilmektedir. Çözündürme işlemi tamamlandıktan sonra uygulanan ayırma, saflaştırma, yoğunlaştırma ve ısıtma işlemi gibi uygulamalarla farklı formlarda nadir toprak elementlerinin üretimi gerçekleştirilmektedir. Üretilen bu bileşikler asit, alkali ve klorla özütleme metotlarının kullanımıyla bir sonraki kademedeki ayrıştırılmaktadır. Asit ile yapılan işlemlerde kullanılan kimyasallar sırasıyla hidroklorik, sülfürik ve hidroflorik asitleridir. Alkali yöntem ile ayrıştırmada da ve sodyum hidroksit ve soda ile kavurma yöntemleri uygulanmaktadır. Yapılan tüm bu işlemler sonucunda NTO içeriği %60 oranlarından %90'lara kadar çıkabilmektedir (Yıldız, 2016).



Şekil 2.12: Nadir toprak elementlerinin eldesinde uygulanan metalurjik proses.

Çin'deki Bayan Obo prosesinde NTE'lerin kazanılmasına yönelik yapılan çalışmalarda işlem olarak bastnazitin sülfürik asitle kavrulması söz konusudur. Bu amaçla konsantre cevher %98'lik H_2SO_4 çözeltisi ile birkaç saat boyunca yaklaşık $500^\circ C$ 'ye ısıtılmaktadır. Yapılan işlemin temelinde NTE'lerini sülfatlarına dönüştüren florokarbonat matrisini ayrıştırma yer almaktadır ve bu prosesin sonucunda dikkat edilmesi gereken unsur serbest bırakılan CO_2 ve HF gazlarıdır. Monazit yapısında yüksek miktarda toryum içerdiği için bastnazit gibi içerisindeki metallere yönelik uygulanacak liç işleminde bazı önemli şartlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla konsantre cevher liç işleminden önce öğütülmektedir ve monazitin ayrışması için $150^\circ C$ 'de sülfürik asit veya sodyum hidroksit ile liç işlemi yapılmaktadır. İşlem tamamlandıktan sonra NTE'lerini ve toryum hidroksiti içeren kek konsantresi, daha sonraki aşamalarda NTE'lerini ayırmak için sıcak bir asidik çözelti ile liç edilmektedir. İşlem sonucunda yan ürün olarak elde edilen trisodyum fosfat geri kazanılıp satılabilir ürün haline dönüştürülebildiği gibi eş zamanlı olarak liç işlemine de tabii tutulabilmektedir. Ancak bu işlem sırasında radyoaktif ürünlerin oluşabileceği riski dikkate alınarak proses tasarımı yapılması gerekmektedir. Monazit cevheri indirgeyici

ve sülfitleştirici bir atmosfer ortamında CaCl_2 ve CaCO_3 ile ısıtılarak da işlenebilmektedir. Bu işlem NTE fosfatlarının NTE oksisülfürlere ($\text{NTE}_2\text{O}_2\text{S}$) ve oksiklorürlere (NTEOCl) dönüşmesini sağlayıp kararlı bir toryum oksit ve kloropatit ($\text{Ca}_5\text{Cl}(\text{PO}_4)_3$) oluşturmaktadır. Toryumun yol açtığı zararlı etkileri yok etmek için %3'lük HCl çözeltisi ile NTE'leri seçici olarak liç edilebilmektedir. Bu yöntem ise alkali yöntemler ile karşılaştırıldığında NTE geri kazanım oranı çok daha düşük olup önemli bir yan ürün olan Na_3PO_4 üretimini engellemektedir. Monazitin fiziksel zenginleştirme işleminde yan ürün olarak elde edilen ksenotimden de NTE'lerin kazanımı için sülfürik asit veya alkali liç işlemi uygulanmaktadır (Tanaydın, 2021).

Hidrometalurji, düşük enerji tükettiği ve yüksek saflıkta ürünler üretebildiği için mineralleri işlemek için en uygun teknik olarak kabul edilir. Hidrometalurjik süreç, NTE içeren minerallerin ayrışmasını ve NTE'lerin çözeltiliye geçmesini sağlar. Genel olarak, liç sırasında, NTE'leri yüklü bir liç solüsyonunda çözmek için malzeme istenen temas süresi boyunca belirli bir sıcaklıkta uygun bir liç reaktifi (su, asit veya tuz) ile temas ettirilir. Bu yöntemin etkinliği, liç reaktifinin, pH'sını ve konsantrasyonunu değiştirerek diğer istenmeyen bileşenlerden nadir toprak ekstrakte etme yeteneğine bağlıdır. Çözündürme işlemi tamamlandıktan sonra çözelti filtre edilir ve kek analiz için toplanır. Geleneksel olarak NTE liçinde kullanılan en yaygın asitler, sülfürik asit (H_2SO_4), hidroklorik asit (HCl), nitrik asit (HNO_3) veya bunların kombinasyonlarıdır (Eterigho-Ikelegbe ve diğ., 2021).

Middleton ve diğ. (2020), NTE'nin çözünürlüğünü incelemek için Güney-Batı ABD'ye ait bir kömür atığını 1 M HCl kullanarak asit liçine tabi tutmuştur. Pülp yoğunluğu 70 g/L-80 g/L olacak şekilde ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre numuneden yaklaşık olarak %80 NTE kazanımı söz konusudur. Ayrıca, düşük pH değerlerinde, NTE taşıyan minerallerin pozitif bir yüzey yükü sergileme eğiliminde olduğunu ve bu durumun pozitif yüklü NTE'lerin kil mineralleri üzerine emilimini engellediğini belirtmişlerdir.

Liç sırasında daha fazla NTE kazanımı elde etmek için termal aktivasyon işlemi ve bazı ön kimyasal işlemleri gereklidir. Bu işlemler liç süresini azaltırken, NTE kazanımını ve liç verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca, ön kimyasal/termal aktivasyon işlemi ile daha kısa sürede daha fazla NTE kazanıldığı için işlemin maliyet fizibilitesi de olumlu yönden etkilenebilmektedir (Eterigho-Ikelegbe ve diğ., 2021).

NTE'ler alüminosilikat camsı fazda bulunur. Bu nedenle, HCl ve H₂SO₄ gibi asitlerle basit bir liç, NTE'leri tamamen çözmemektedir. Bu nedenle, araştırmacılar tarafından bazı alternatif süreçler önerilmiştir. Wang ve diğ. (2019) yaklaşık %70 oranında NTE'lerin amorf cam yapıda bulunduğunu bildirmiş olup, art arda asit ve alkali liç uygulandığını bildirmişlerdir. NaOH ve silis tarafından çöktürülen NTE hidroksitlerinin, çözünür hale geldiği tespit edilmiştir. Kral ve diğ. (2018) benzer bir teknolojiyi Appalachians, Illinois ve Power River Basın'den (ABD) alınan üç kömür yakma ürünü örneğine uygulamıştır. Power River Basın'den alınan numunenin ekstraksiyon işleminden sonra, NTE'lerin kazanım oranının %99 civarında olduğu bildirilmiştir (Jyothi ve Parhi, 2021).

2.5 İkincil NTE Kaynağı: Kömür ve Kömür Yan Ürünleri

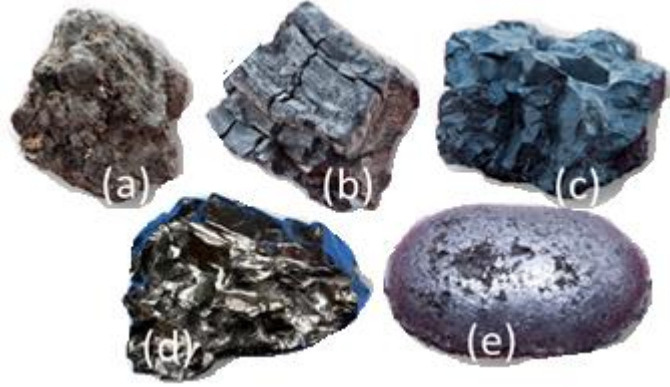
Günümüzde hızla devam eden enerji tüketimi, gelecek yıllarda da nüfusun artmasıyla orantılı olarak artış gösterme eğiliminde olacaktır. Bu nedenle birçok ülke enerji ihtiyacını hangi kaynaklardan karşılayabileceği yönünde arayış içerisinde. Dünyadaki enerji ihtiyacının yaklaşık % 80'lik kısmı kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlarla sağlanmaktadır. Dünya fosil yataklarının bilinen rezerv dağılımının petrol eş değeri olarak % 68'ini kömür, % 18'ini petrol ve % 14'ünü doğalgaz oluşturmaktadır. Bu değerler incelendiğinde fosil yakıtların ömrü, bilinen petrol rezervleri açısından 40 yıl, doğalgaz olarak 60 yıl ve kömür için de 220 yıl'dır. Ateşok (2017), belirttiği gibi alternatif enerji kaynaklarını aramaya yönelik çalışmalar olsa da fosil kaynakların önemi yerini korumakta olup özellikle kömürün, sahip olduğu uzun ömür ve dünyadaki homojen dağılımı sebebiyle diğer iki kaynağa göre daha fazla kullanım sıklığı göstermesi beklenmektedir.

2.5.1 Kömür

Kömür, organik bitki örtüsünün ısı ve basınç etkisi altında jeolojik aktivitelerle milyonlarca yıl boyunca çürümesi ve ayrışması ile oluşan tortul bir kayadır. Kömür, dünyanın ikinci büyük enerji kaynağını oluşturur ve enerji tüketiminin yaklaşık dörtte birini oluşturur (Jyothi ve Parhi, 2021).

Kömürün yapısında organik kısmı oluşturan karbon, hidrojen ve oksijen elementleri bulunmaktadır. Başlıca elementi karbon olup, kömür kalitesi ve enerji üretimi hakkında büyük bir öneme sahiptir. Kömür çeşitleri içerdiği karbon miktarına göre

sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre en az karbon içeren kömür turba olup artan karbon içeriğine göre bu sıra linyit, taş kömürü ve antrasit biçimindedir. Şekil 2.13’ te kömür çeşitleri verilmektedir (Url-1).



Şekil 2.13: Turba (a); linyit (b); taş kömürü (c); antrasit (d); grafit (e).

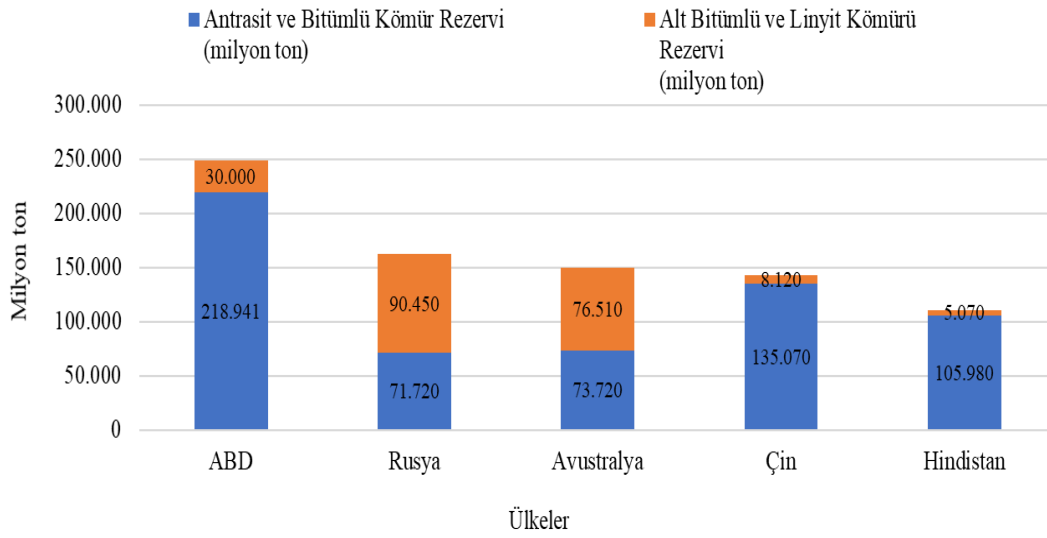
Kömürleşme süreci, organik maddenin bünyesinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler ile gerçekleşmektedir. Sıcaklık ve basınç şartlarının bu organik kütleleri etkilemesi sonucu sırası ile (turbadan – alt bitümlü kömür aşamasına kadar) su ve su buharı, CO₂, CO (taşkömürü aşamasında), CH₄, O₂ ve en ileri aşamalarda da H₂ ve geriye kalan çok az miktardaki CH₄ (antrasit aşamasında) kömürleşme sırasında sistemden uzaklaşmaktadır. Bu şartların dışında, ortamın volkanik faaliyetleri, fay hareketleri ve radyoaktif elementlerin varlığı yerin ısını normalden çok daha fazla arttırmaktadır. Isı ve basınç arttıkça, önceleri ‘turba’ olarak adlandırılan ama kömür sayılmayan bu organik madde, sırasıyla linyit, alt bitümlü kömür, taşkömürü, antrasit ve en sonunda grafit dönüşmektedir (Alan ve diğ, 2014).

Dünyada en yaygın bulunan kömür çeşidi taş kömürüdür ve daha çok katı yakıt olarak kullanılmaktadır. Linyit kömürü ise düşük kalorifik değere sahip olması ve yüksek miktarda kül içermesinden ötürü daha çok termik santrallerde kullanılmaktadır. Kömür kullanımına yönelik gelişmekte olan ülkeler ve gelişmiş ülkeler açısından farklı görüşler mevcuttur. Gelişmekte olan ülkeler mevcut kaynaklarını değerlendirmek adına kömürü tercih ederken, gelişmiş ülkeler çevresel duyarlılıktan ötürü kömür kullanımını tercih etmemektedir (Url-2).

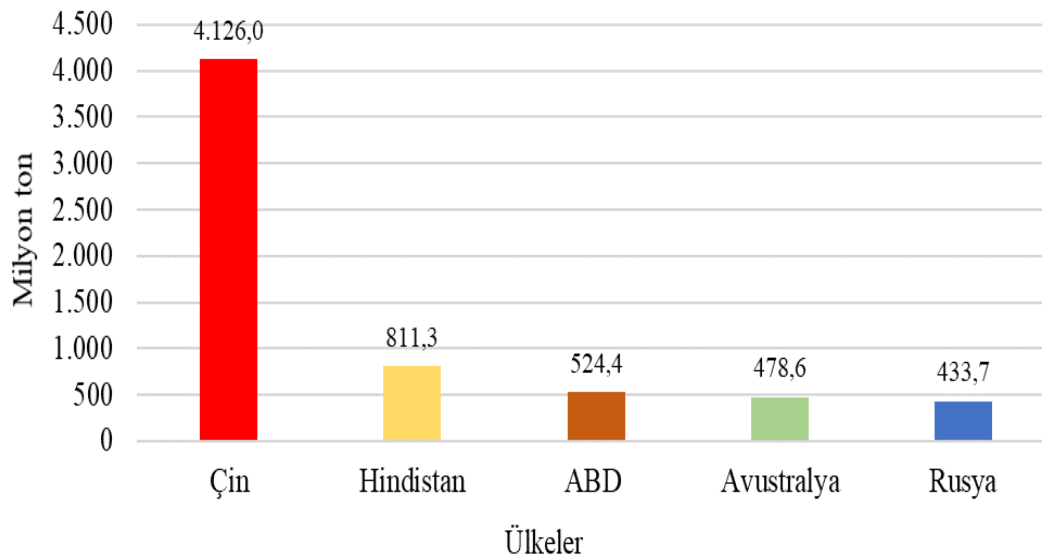
2.5.1.1 Dünya’da kömür

Enerji arz güvenliği kapsamında kömür bulunma miktarı ve yaygın olması sebebiyle en çok tercih edilen enerji kaynağıdır. Bu yüzden kömür üretim ve tüketim

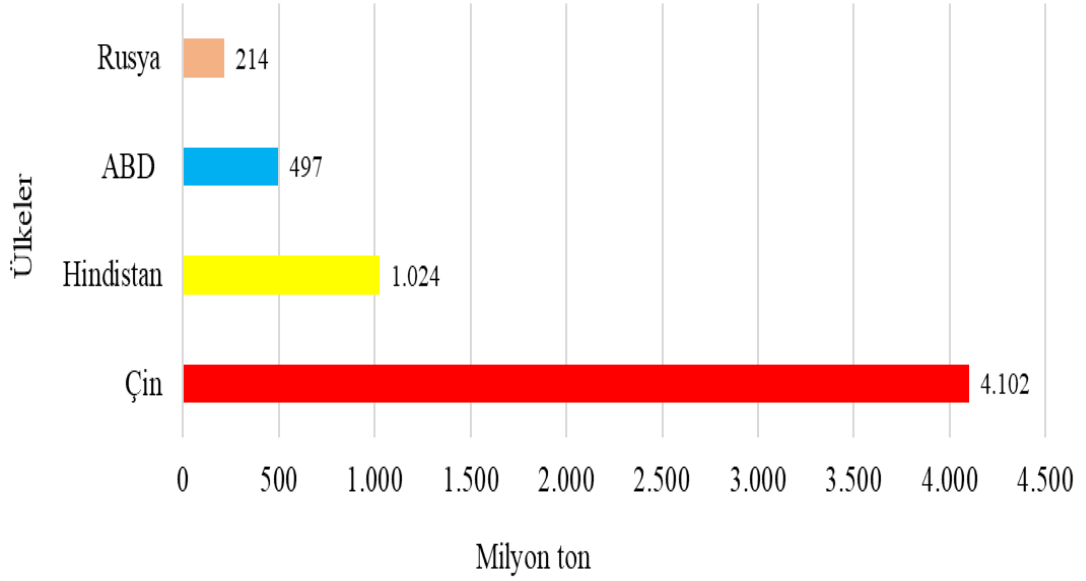
miktarlarının artması beklenen bir durumdur. Dünya'daki kömür rezervlerine sahip ülkelere bakıldığında ilk sırada ABD yer almakta olup, bu sırayı Rusya, Avustralya, Çin ve Hindistan takip etmektedir. Ancak bu sıralama kömür üretim ve tüketim miktarları açısından değişmektedir. Çin, kömür üretimi ve tüketimi konusunda ilk sırada bulunmaktadır. Rusya ve Avustralya'da üretilen kömürün tüketimi az olurken, Hindistan'da ise bu durum tam tersidir. Dünya kömür rezervleri, üretim ve tüketimleri sırasıyla Şekil 2.14, Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'da verilmektedir (Url-2).



Şekil 2.14: Ülkelere göre dünya kömür rezervleri.



Şekil 2.15: 2021 yılına göre dünya kömür üretimi.



Şekil 2.16: 2021 yılı dünya kömür tüketimi.

2019 yılında dünyada kömür kaynaklı elektrik üretimi 2472,3 TWh olmuştur. Dünya Enerji Dengesine göre, dünya genelinde elektrik üretimi ve tüketimi için ilk enerji kaynağı kömür olup, bunu doğal gaz, yenilenebilir enerji, nükleer ve petrol izlemektedir (Arellano Ruiz ve diğ., 2021).

2.5.1.2 Türkiye’de kömür

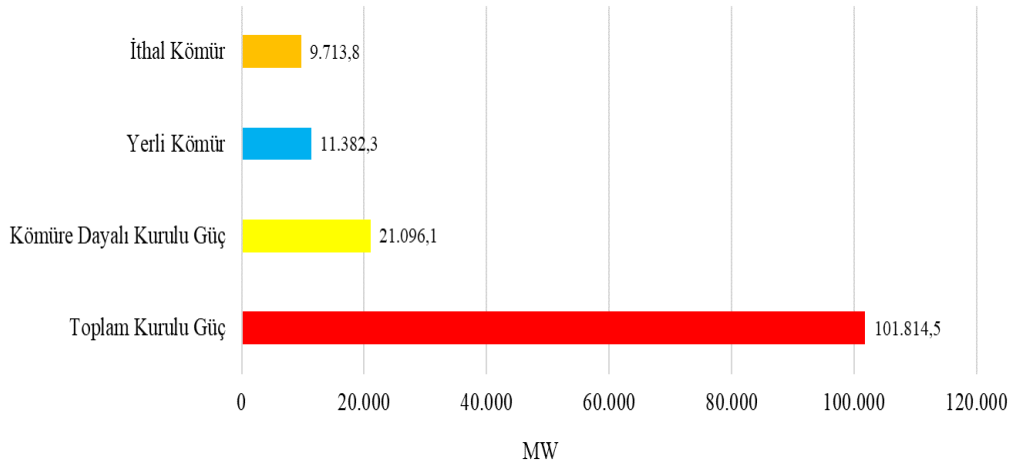
Kömür, Türkiye’de enerji kaynakları içerisinde önemini yitirmeyen ve güvenilir olan bir enerji kaynağıdır. Üretilen kömürler içerisinde ilk sırayı linyit kömürü almaktadır. Türkiye’nin 2023 hedefleri içerisinde yer alan enerji arz güvenirliliğini artırma kapsamında, yerli kaynakları kullanıp dışa bağımlılığı azaltmaya yönelik yapılan çalışmalarda kömür büyük bir öneme sahiptir (Url-2).

MTA verilerine göre, Türkiye’nin sahip olduğu kömür rezervi, toplam dünya kömür rezervinin yaklaşık %2’lik kısmını oluşturmaktadır. Ülkemizin sahip olduğu linyit kömürü rezervi ise son verilere göre 19,32 milyar tona ulaşmıştır. Bu rezervler içerisinde özellikle linyit kömürü önemli bir yer işgal etmektedir. Ülkemizde son yıllarda üretimi gerçekleştirilen yaklaşık 70,000.000 ton linyit kömürünün %85’i termik santrallerde kullanılmaktadır. Bu kullanım alanı Türk linyit kömürünün %79’unun 2500 kcal/kg ısı değeri altında olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 2.17’de Türkiye’deki linyit sahaları verilmektedir (Url-3).



Şekil 2.17: Türkiye linyit sahaları.

2021 yılı verilerine göre, Türkiye’de kömüre dayalı santrallerden elektrik üretiminin toplamda 104.202,0 GWs olduğu, yerli kömürün bu üretimde %14,8’lik bir dilime tekabül ettiği bilgisi yer almaktadır. 2022 yılı Temmuz ayı verilerine göre, kömür kullanarak elektrik üretimi yapan santrallerin sayısının toplam 67 adet olduğu, bunlardan 46 adetinin linyit kömürünü kullandığı bildirilmiştir. Yine 2022 yılı ile birlikte Türkiye’nin toplam kurulu gücü içerisinde kömüre dayalı santrallerin %20,7’lik bir paya sahip olduğu, yerli kömüre dayalı santral kurulu gücün ise %11,2’lik bir pay oluşturduğu belirtilmiştir. Şekil 2.18’de 2022 yılı Türkiye’deki kömüre dayalı termik santral kurulu güçleri verilmiştir (Url-2).



Şekil 2.18: 2022 yılı Türkiye kömüre dayalı termik santral kurulu güçleri.

Yerli kaynakların kullanımına yönelik yapılan çalışmalarda kömür önemini koruyan bir enerji kaynağıdır. Yerli kömürlerin kullanımı ile dışa bağımlılıkta azalmaya gidilebileceği ve Türkiye ekonomisinin varlığını kararlı bir şekilde devam ettirebileceği düşünülmektedir (Url-2).

2.5.1.3 Kömür, kömür yan ürünleri ve NTE

Kömür ve kömür yan ürünleri, NTE kazanımı için umut verici ikincil kaynaklar olarak görülmektedir. NTE üretimi için hammadde olarak kömür ve kömür yan ürünlerinin kullanım avantajları şu şekilde sıralanmaktadır:

- Büyük ve güvenilir kaynaklar olarak görülmesi,
- Madencilik faaliyetleri devam edilen malzemeler olması,
- Yeni maden olmadıkları için potansiyel olarak çevre ve sağlık açısından zarar teşkil etmemeleri ve
- Potansiyel atık maddelerin kullanılmasıdır (Lin ve diğ, 2017).

Kömür ve kömür yan ürünleri gibi alternatif kaynaklardan NTE'nin geri kazanımı, ileri teknoloji malzemelerinin güvenilir bir şekilde temin edilmesini sağlarken, kömür madenciliğinin ekonomik olarak uygulanabilirliğine de katkı sağlamaktadır. Dünya kömür kaynaklarına bakıldığında zaman ortalama NTE içeriğinin 60-70 g/t arasında değiştiği görülmektedir. Yüksek miktarda NTE içeriğine sahip kömür yatakları incelendiğinde Rusya'daki Far East kömür ocaklarında 300 ila 1000 g/t içerikli, Doğu Kentucky'de Fire Clay kömür damarında yaklaşık 500 g/t içerikli, Kanada'nın Nova Scotia kentinde bulunan Sydney Havzasında da 72-483 g/t içerikli kömür yatakları yer almaktadır (Zhang ve diğ, 2017). Dünya kömür ortalamasının neredeyse iki katı olan Çin ve Türk kömürlerindeki NTE içeriği ise sırasıyla 101 g/t ve 116 g/t'dir (Zhang ve diğ, 2015).

Kömür ve kömür yan ürünlerindeki NTE'lerin oluşumu üç bölümde incelenmektedir: 1) Monazit ve ksenotim gibi nadir toprak mineralleri, 2) Killere iyonik olarak adsorbe olan NTE ve 3) Organik matrislerle eşlik eden NTE'dir. Kömür ve kömür yan ürünlerindeki NTE'ler genellikle mikrometre ve/veya nanometre gibi çok küçük parça boyutlarındadır (Zhang ve diğ, 2017).

Kömürdeki NTE'ler ile ilgili yapılan çalışmalarda, NTE'lerin organik malzemelerle veya kil minerallerine adsorbe olarak bulunduğu ortaya konulmuştur. NTE'lerin

aplarının boyut olarak 0,5-5 mikron arasında otojenik taneli olduğu belirlenmiştir (Din ve diğ, 2021).

Kömürün diğer birçok eser metale ek olarak nadir toprak elementlerini (NTE) içerdiği ve bu elementlerin önemli kısmının kömürdeki inorganik minerallerle birlikte bulunduğu bilinmektedir. Dünya genelinde ortalama toplam NTE (lantanid ve itriyum) konsantrasyonları kömürde 68,5 g/t, kömür külünde 404 g/t'dir. Yapılan son çalışmalara göre kömürden NTE kazanımı için kömür külünde minimum 800-900 g/t içeriğinde bir nadir toprak oksit konsantrasyonu içermesi gerekmektedir (Lin ve diğ, 2017). Karayiğit ve diğ. (2000) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'deki kömür termik santrallerine beslenen kömürlerin içindeki ana ve iz elementler incelenmiş olup nadir toprak elementlerinin kömürün inorganik kısmında yani külde kaldığı belirlenmiştir.

Kömürle alışan termik santrallerin fırınlarında kömürün yakılmasında, içinde bulunan yanmaz madde kömür külü oluşumuna neden olmaktadır. Kömür külünün daha ince ve daha hafif parçacıkları baca gazlarıyla birlikte hareket etmektedir ve atmosfere ulaşmadan önce elektrostatik filtrelerde tutulmaktadır. Elektrostatik filtrelerden toplanan kömür külü uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. Bir miktar erimiş kl, kazan duvarlarında ve buhar borularının üzerinde birirmektedir ve klinker adı verilen kütleler oluşturmak üzere katılaşmaktadır. Klinkerler birikerek kazanın/ocağın dibine düşmektedir ve klinker ğtcsnden geçmeden önce su haznesinde soğutulmaktadır. Fırının dibinde toplanan kömür külüne de taban külü denilmektedir. Taban külü tanecikleri fiziksel olarak iri, gözenekli, camsı, granüler ve grimsi renktedir. Taban külü toplam külün %25'ini, kalan %75'ini ise uçucu kül oluşturmaktadır (Singh ve Siddique, 2013). Genel olarak uçucu kül ve taban külünün fiziksel özellikleri izelge 2.6'da verilmektedir (Türkmenoğlu, 2010).

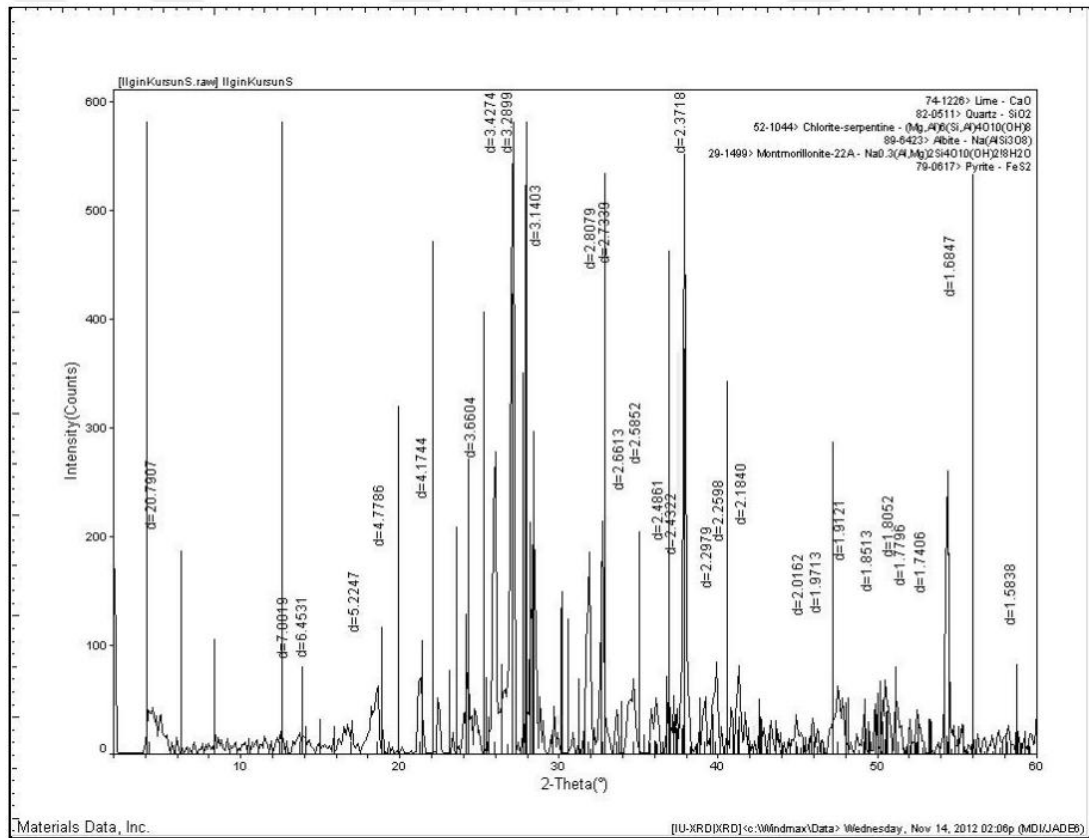
Çizelge 2.6: Uçucu kül ve taban külü fiziksel zellikleri.

Fiziksel zellik	Uçucu Kül	Taban Külü
Tane apı (μm)	20-80	500-7000
Özgül ağırlık (g/cm^3)	1,59-3,1	2,17-2,78
Özgül yüzey alanı (cm^2)	200-1060	400

Uçucu kül ve taban külünün yapısında yer alan mineraller birincil ve ikincil mineraller olarak adlandırılmaktadır. Birincil mineralleri besleme kömüründe yanma sonucunda değişime uğramayan mineraller oluştururken, ikincil mineralleri (yeni oluşan) de

yanma sonucu oluşan mineraller meydana getirmektedir. Bu ikincil mineraller (anhidrit, hematit, manyetit, portlandit, mullit) silikat eriyiklerinden kristalizasyonla, kısmi dehidratasyon ve katı faz reaksiyonu yoluyla oluşabilmektedir. Genel olarak uçucu kül ve taban küllerini oluşturan yapının en önemli bölümünü amorf madde (camsı yapı) oluşturmaktadır (Kırdım, 2006).

Enkhtaivan (2013) tarafından yapılmış bir çalışmada, Soma Termik Santrali'ne ait uçucu kül numunesinin minerolojik yapısını belirlemek için XRD (X Ray Diffraction) analizi yapılmıştır. XRD analizi sonucuna göre, uçucu külün kireç, kuvars-SiO₂, albit-Na (AlSi₃O₈), kalsit, klorit, serpantin, pirit, montmorillonit minerallerinden oluştuğu ortaya çıkmıştır. Şekil 2.19'da Soma Termik Santrali'ne ait uçucu kül numunesinin XRD analiz sonucu verilmektedir.



Şekil 2.19: Soma Termik Santrali uçucu kül numunesi XRD analizi sonucu.

Görhan (2009) yapmış olduğu bir çalışmada, uçucu kül ve taban külünün yapısında bulunan mullitin oluşumu yüksek sıcaklıkta eriyik forma geçen Si ve Al'un reaksiyonu ile ilişkilendirilmiştir. Taban külünde yer alan kalsitin, ikincil mineral olarak Ca, Mg, Fe gibi oksitlerin organik maddelerden serbest hale geçen CO₂ ile reaksiyonu sonucu ortaya çıktığı ya da kömürde değişime uğramayan birincil minerallerden

kaynaklandığı belirtilmektedir. Ayrıca numuneler içerisinde belirlenen hematit ve manyetit kömür içerisindeki Fe içeren minerallerden (pirit, siderit ve ankerit) meydana geldiği düşünülmektedir.

2.5.1.4 Kömür ve kömür yan ürünlerinden NTE kazanımı

Nadir toprak cevher yataklarından NTE zenginleştirilmesi için kullanılan geleneksel fiziksel ve fiziko-kimyasal ayırma yöntemlerinin son çalışmalarda sınırlı olsa da kömür ve kömür yan ürünlerinden NTE'nin geri kazanımında da uygulandığı belirtilmiştir (Hower ve diğ, 2013; Blissett ve diğ, 2014; Lin ve diğ, 2017). Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde kömür ve yan ürünlerindeki nadir toprak elementlerinin kazanımı için uygulanan boyutlandırma, gravite ve manyetik ayırma gibi fiziksel yöntemlerden en başarılı sonuçların gravite yöntemi ile elde edilebildiği belirtilmektedir (Lin ve diğ, 2017).

Nadir toprak elementleri içeren mineralleri kömür ve kömür atıklarından gravite ayırma, manyetik ayırma ve flotasyon gibi fiziksel zenginleştirme yöntemleri kullanarak zenginleştirmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. NTE zenginleştirme işlemlerinden önce, dekarbonizasyon (karbon giderimi) ile temiz kömür eldesi amaçlanmaktadır. ABD, Kentucky'den alınan temiz bir kömür numunesi üzerinde gerçekleştirilen fiziksel ayırma (boyut, yoğunluk ve manyetik) işleminin istenilen zenginleşmeyi sağlayamadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle nadir toprak minerallerini, fiziksel ayırma yöntemleri kullanarak kömür ve kömür atıklarından yüksek oranda zenginleştirmek oldukça zordur. Son yıllarda, NTE'lerin kömür külünden kimyasal ekstraksiyonu üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Asit liçi, kömür külünden NTE'leri elde etmek için yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak daha iyi ekstraksiyon performansı elde etmek için asit liçinden önce kimyasal ve/veya termal işlem yapılması gerekmektedir (Zhang ve diğ, 2020).

Diğer bir kömür yakma ürünü olan uçucu külden NTE'leri kazanmanın en yaygın yöntem, mineral asitler kullanılarak doğrudan çözündürme işlemidir. Asit liçi basit bir yöntemdir ve HCl, HNO₃ ve H₂SO₄ gibi çeşitli asit türleri kullanılmaktadır. Uçucu kül malzemesinden NTE'leri kazanmak için kullanılan yüksek konsantrasyonlardaki asit miktarı ve yüksek sıcaklıklar tek başına etkili olamamaktadır. Bu nedenle, NTE içeriğini ve liç verimini artırmak için fiziksel ön işlemler, ön ısıtma veya alkali kavurma gibi alternatif yaklaşımlar araştırılmıştır. Boyuta göre sınıflandırma,

yoğunluk ve manyetik ayırmalar dahil olmak üzere yapılan fiziksel ön işlemleri ile NTE içeriği 782 g/t'dan 1025 g/t'a kadar yükseltebilmektedir. En uygun koşullarda, 3 M HCl, 60°C ve 2 saat süre, NTE'lerin %78'i çözeltiye geçebilmektedir. Bununla birlikte, fiziksel ön işlemde sonra nispeten elde edilen düşük verimlilik, yüksek sıcaklıkta kavurma nedeniyle oluşan büyük enerji tüketimi ve zararlı gazların emisyonu hala önemli sınırlamalardır. Bu nedenle, mevcut dezavantajları önlemek için daha uygun koşullarda alkali liçin kullanıldığı araştırmalar da yapılmıştır (Trinh ve diğ., 2022).

Termik santral ürünü olan uçucu külün sahip olduğu camsı alüminosilikat yapının alkali çözelti ile daha verimli bir şekilde bozundurularak hidroklorik asit (HCl) ile daha çözünabilir hale geldiği belirlenmiştir. Kimyasal ön işlemler ile liç veriminin %85'in üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi de NaOH'ın camsı alüminosilikat yapıyı çözerek daha fazla NTE'yi açığa çıkarmasıdır. Yapılan çalışmalar sonucunda alkali ön işleminden sonra asit liçi ile elde edilen en yüksek nadir toprak elementi kazanımı %95,5'tir (Wen ve diğ., 2020).



3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez kapsamında yapılan çalışmanın amacı; ikincil kaynaklar içerisinde yer alan termik santral ürünü olan taban külü numunesinden, NTE'lerin fiziksel ve kimyasal zenginleştirme yöntemleri ile kazanım olanaklarının araştırılmasıdır. Bu tezde kullanılan numune, TENMAK/NATEN, TKİ ve İTÜ Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü tarafından ortaklaşa yürütülen "Kömür Küllerinden ve Kömür Yıkama Atıklarından Nadir Toprak Elementlerinin Kazanımı" başlıklı proje kapsamında alınmıştır [Proje No: A2.H1.P22].

Yürütülen tez kapsamında fiziksel zenginleştirme deneyleri sürecinde özgül ağırlık farkına göre ayırım yapan jig, sarsıntılı masa ve santrifüj tipi cihazlar (MGS ve Knelson) kullanılmıştır. Kimyasal zenginleştirme deneyleri için de alkali liç ve asit liç prosesleri uygulanmıştır.

3.1 Malzeme ve Yöntem

3.1.1 Malzeme

Tez kapsamında Manisa/Soma bölgesinde yer alan Konya Şeker San. ve Tic. A.Ş.'ye ait Soma Termik Santral (Şekil 3.1) taban külü numunesi kullanılarak NTE eldesi çalışmaları yapılmıştır. Bölgede toplamda iki adet termik santral bulunmaktadır. Bu termik santraller, Konya Şeker San. ve Tic. A.Ş.'ye ait Soma Termik Santrali ve Kolin Şirketler Grubu içerisinde yer alan Hidro-Gen A.Ş. bünyesindeki Soma Kolin Termik Santrali'dir. Soma Termik Santrali'nde yılda yaklaşık 8 milyon ton kömür yakılmakta olup buradan açığa çıkan kül miktarı toplam 3,6 milyondur. Santralde toplam 6 ünite yer almaktadır. Bunların ilk 4 ünitesinde 2400 kcal/kg ısı değere sahip kömür yakılırken, 5 ve 6. ünitelerde 1550 kcal/kg ısı değere sahip kömür yakılmaktadır. Santralin kömür ihtiyacı ise TKİ Genel Müdürlüğü'ne bağlı ELİ Müessesesi'nin Soma'daki kömür ocaklarından sağlanmaktadır. Santraldeki her bir ünite 165 MW olup, toplamda 990 MW'lık elektrik üretimi yapılmaktadır (Url-4).



Şekil 3.1: Soma termik santrali.

3.1.1.1 Soma havzası jeolojisi

Soma Havzası, kalın Miyosen ve Pliyosen çökelleri içermektedir, ancak volkanik kayalar içermemektedir. Tersiyer çökelleri, Mesozoyik temel kayaları üzerine uyumsuz olarak gelmiştir. KM2 (linyit ve karbonlu şeyl) ve KM3 (linyit) olarak adlandırılan iki kalın Miyosen linyit damarı içermektedir. Mezozoik temel, Tersiyer sedimanlarından 350 m yüksekliğe kadar yükselen kireçtaşı tepelerin havzası çevresinde engebeli bir topografya oluşturmuştur. Temele ulaşan sondajlar, havzadaki sedimanların altında kireçtaşı varlığını doğrulamıştır. Miyosen çökelleri üç formasyona ayrılmıştır. Taban Turgut Formasyonu ağırlıklı olarak olgunlaşmamış kumtaşı ve konglomeradan oluşur, ancak sedimanlarda linyit ufkuna doğru kademeli olarak yukarı doğru incelmeye vardır. Artan miktarlarda kumlu kil, killi silt ve karbonlu kil, bunlar KM2 damarına derecelenene kadar formasyonun tepesine doğru görünmektedir. Dikişin taban teması kademelidir ve genellikle %55'ten daha az kül içeriğine sahip ilk tanınabilir linyitin görüldüğü yere yerleştirilmektedir. Linyit sert, siyah ve parlaktır, çok sayıda kamaya sahiptir (kömür ve linyitin yakın aralıklı birleşimi) ve konkoidal bir kırıkla kırılmaktadır (Whateley, 1995).

Soma ve Deniş formasyonu

Yapılan çalışmalarla linyit içeren Neojen çökelleri alt ve üst seri olarak ikiye ayrılmıştır. Alt seri Miyosen (yaşlı) iken üst seri de Pliyosen olarak adlandırılmıştır. Bu iki serinin her biri ayrı ayrı kapalı bir sedimantasyon devresinin ürünleridir. Soma bölgesindeki Neojen yaşlı birimler “Soma Formasyonu” ve “Deniş Formasyonu” olmak üzere iki formasyondan oluşmaktadır. Soma Formasyonu kaya düzeylerinin

tabandan tavana tanımlanması şu şekilde yapılmıştır: (i) çakıldaşı-kumtaşı-kıltaşı (m1), (ii) alt linyit seviyesi (k1), (iii) marn (m2), (iv) orta linyit seviyesi (k2), ve (v) kireçtaşı (m3). Deniş Formasyonunun içerdiği kaya düzeyleri ise: (i) tuf-aglomera (p4), (ii) ince çakıllı kireçtaşı (p3), (iii) tuf-marn ardalanması (p2), (iv) üst linyit seviyesi (k3) ve (v) kumtaşı-kıltaşı (p1) ardalanmasıdır. Soma çevresinde geniş yayılım sunan Deniş Formasyonu alttan üste doğru: (1) örgülü akarsu sisteminde biriktirilmiş kaba ve linyit katmanlarıyla ardalanmış ince taneli kırıntılı kayalar, (2) volkano-klastik apron sedimanları ve (3) karbonatlardan oluşmaktadır. Soma ve Deniş formasyonları birbirlerinden birikim uyumsuzluğu ile ayrılırlarken Deniş Formasyonu, Soma Formasyonu'na göre çok daha geniş bir alanda yayılım göstermektedir (Alan ve diğ, 2014).

3.1.2 Yöntem

Soma Termik Santrali'nde tesis yönetimi ve proje ekibi ile birlikte numune alma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra temin edilen yaklaşık 500 kg taban külü numunesine İTÜ Cevher Hazırlama Mühendisliği pilot tesisinde, proje ekibi ile birlikte homojenizasyon işlemi uygulanmış olup, taban külü numunesi numune bölücü ile şahit numunelere ayrılmıştır. Proje ekibi ile olan saha çalışmasına ait görsel Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2: Proje sahası ve ekibi.

Deneyisel çalışmalardan önce malzeme karakterizasyonunu belirlemek için tuvenan malzemeden kimyasal analiz ve elek analiz numuneleri alınmıştır.

Karakterizasyon alışmaları kapsamında alınan temsili numune üzerinde; numunenin fiziksel özelliklerinin tespiti için tane boyut analizi (elek analizi), kimyasal özelliklerinin tespiti için de XRF analizi yapılmıştır.

Numune hazırlama işlemi kapsamında yapılan çalışmaya ait görsel şekil 3.3'te verilirken, nem analizi uygulanan temsili numune ile elek analiz ve kimyasal analiz numuneleri ise şekil 3.4'te verilmiştir.



şekil 3.3: Numune homojenizasyon çalışması.



şekil 3.4: Temsili elek analizi ve kimyasal analiz numunesi (a); nem analizi uygulanan numune (b).

Zenginleştirme deneyleri kapsamında taban külü numunesi elekler vasıtasıyla +1 mm, -1+0,3 mm ve -0,3 mm olmak üzere üç boyut fraksiyonuna sınıflandırılmıştır.

Jig ile yapılan özgül ağırlık farkına göre ayırmada, +1 mm boyutunda bulunan belirli miktardaki taban külü numunesi kullanılmıştır. Deney kapsamında kullanılan jig Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5: Deneyde kullanılan jig.

-1+0,3 mm'de bulunan malzeme Wilfley tipi sarsıntılı masa cihazına beslenmiştir. Sarsıntılı masa deneyinde PKO % 20, yıkama suyu 3 L/dak, masa eğimi 0° ve genliği 15 mm olarak ayarlanmıştır. Deneyde kullanılan sarsıntılı masa cihazı Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6: Deneyde kullanılan Wilfley tipi sarsıntılı masa.

-0,3 mm'deki malzeme pülp bölücü ile bölünerek MGS ve Knelson santrifüj tipi ayırıcılarına beslenmiştir. Bu deneylerde her iki boyut için PKO % 10 olacak şekilde ayarlanmıştır. Daha ince boyutlarda santrifüj tipi ayırıcıların etkinliğini tespit etmek için MGS ve Knelson deneyleri ayrıca tamamı -0,106 mm ve -0,038 mm boyutlarına indirilmiş numuneler ile de yapılmıştır.

-0,3 mm ve -0,106 mm boyutlarında yapılan MGS deneylerinde tambur dönüş hızı 280 d/dak, 260 d/dak ve 250 d/dak olarak ayarlanmıştır. Yıkama suyu miktarı ise 1L/dak, 3L/dak ve 5L/dak'dır. Tambur titreşim genliğı ve tambur eğimi de sırasıyla 15 mm ve 0°'dir. Deneylerde kullanılan MGS santrifüj tipi ayırıcısı Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Deneylerde kullanılan MGS santrifüj tipi ayırıcısı.

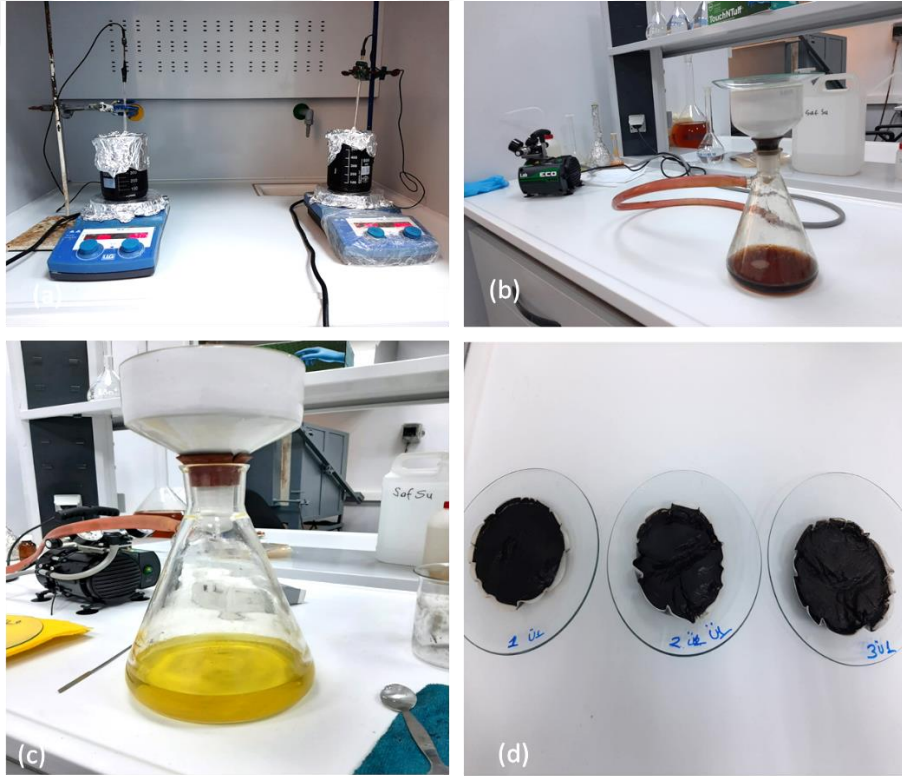
Knelson santrifüj tipi ayırıcısı ile yapılan özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme deneyleri ise -0,3 mm, -0,106 mm ve -0,038 mm boyutlarında gerçekleştirilmiştir. -0,3 mm boyutu için daha önce -0,3 mm'ye elenmiş numune kullanılmıştır. -0,106 mm ve -0,038 mm boyutları için yine belirli miktarda tuvenan taban külü numunesi tekrardan aynı şartlarda bilyalı değırmen kullanılarak kademeli olarak kapalı devre öğütülmüştür. Elek altına geçen -0,3 mm, -0,106 mm ve -0,038 mm'deki numuneler Knelson cihazına PKO % 10 olacak şekilde ayarlanmış olup, kesikli olarak beslenmiştir.

-0,3 mm, -0,106 mm ve -0,038 mm boyutlarında yapılan Knelson deneylerinde akışkanlaştırma suyu basıncı 0,5-1 psi ve 1-3 psi arasında tutulmuştur. Deneylerde kullanılan Knelson santrifüj tipi ayırıcısı Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8: Deneylerde kullanılan Knelson santrifüj ayırıcısı.

Kimyasal zenginleştirme deneyleri kapsamında alkali liç deney koşulları sıcaklık 90°C , süre 4 saat, sıvı:katı oranı 8:1, karıştırma hızı 800 dev./dak. ve 5 mol/L NaOH varlığında yapılmıştır. Asit liçinde asit konsantrasyonları 3 mol/L, 4 mol/L ve 5 mol/L olarak seçilmiş olup, HCl (%37) asiti ile yapılmıştır. Asit liçi deneyleri, sıcaklık 90°C , süre 3 saat, sıvı:katı oranı 10:1 ve karıştırma hızı da 400 dev./dak. olacak şekilde tamamlanmıştır. Liç deneylerinde kullanılan genel liç mekanizması ve deney parametreleri sırasıyla Şekil 3.9 ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.9: Liç ünitesi (a); alkali liç çözeltisi (b); asit liç çözeltisi (c); liç keki (d).

Çizelge 3.1: Alkali liç ve asit liçi deney koşulları.

Liç Koşulları				
Alkali Liç (NaOH)	Konsantrasyon miktarı, mol/L	5 mol/L	5 mol/L	5 mol/L
	Sıcaklık, °C	90°C	90°C	90°C
	Süre, sa	4 sa	4 sa	4 sa
	Sıvı:Katı oranı	8:1	8:1	8:1
Asit Liçi (HCl)	Konsantrasyon miktarı, mol/L	3 mol/L	4 mol/L	5 mol/L
	Sıcaklık, °C	90°C	90°C	90°C
	Süre, sa	3 sa	3 sa	3sa
	Sıvı:Katı oranı	10:1	10:1	10:1

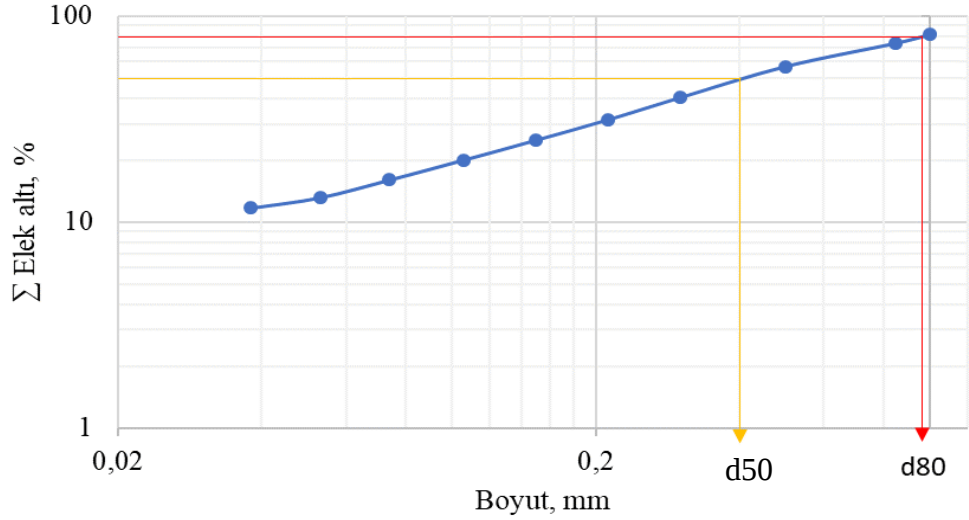
3.2 Numunenin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

3.2.1 Fiziksel özellikler

Malzemenin tane boyut dağılımının belirlenmesi için taban külü numunesine yaş elek analizi yapılmıştır. Temsili alınan taban külü numunesine ait tane boyut dağılımı tablosu ve eğrisi sırasıyla Çizelge 3.2 ve Şekil 3.10'de verilmektedir.

Çizelge 3.2: Taban külü tane boyut dağılımı.

Boyut, mm	Miktar, %	Kül, %	Σ Elek altı, %
1	18,8	92,1	100,0
-1+0,850	7,3	92,3	81,2
-0,850+0,500	16,9	92,7	73,8
-0,500+0,300	16,8	91,8	57,0
-0,300+0,212	8,8	92,9	40,2
-0,212+0,150	6,4	95,2	31,4
-0,150+0,106	5,0	96,1	25,0
-0,106+0,074	4,0	92,5	20,0
-0,074+0,053	2,9	94,3	16,0
-0,053+0,038	1,4	93,2	13,1
-0,038	11,7	91,9	11,7
Toplam	100,0	93,2	0,0

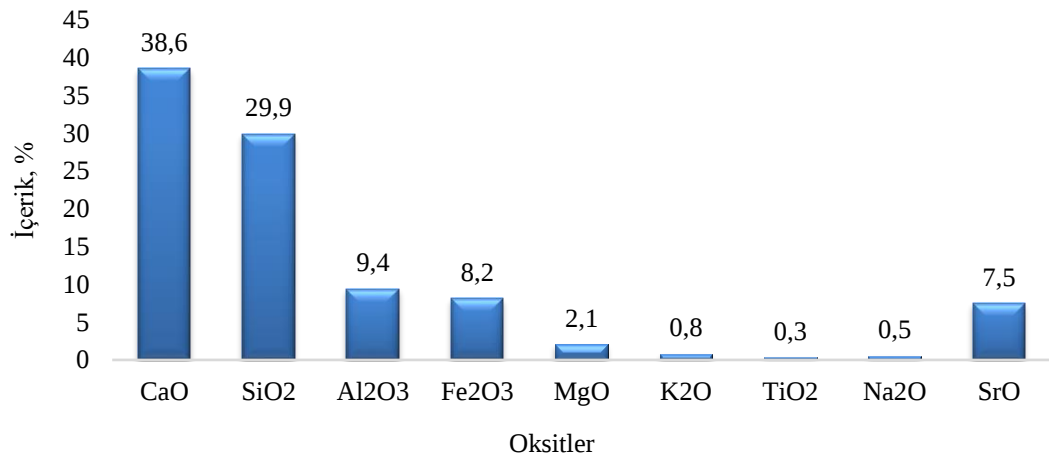


Şekil 3.10: Taban külü numunesi kümülatif elek altı eğrisi.

Kümülatif elek altı eğrisine göre taban külü numunesinin d_{80} boyutu 0,98 mm, d_{50} boyutu ise 0,42 mm olarak bulunmuştur. Ayrıca taban külünün toplam nem değeri %22 olarak hesaplanmıştır. Yoğunluğu ise $2,52 \text{ g/cm}^3$ 'tür.

3.2.2 Kimyasal özellikler

Zenginleştirme deneyleri öncesinde taban külü numunesinin kimyasal özelliklerinin tespiti için XRF analizi yapılması uygun görülmüştür. Bu nedenle tuvenan taban külü numunesi akredite bir kimyasal analiz firması olan Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş.'ye gönderilmiştir. Kimyasal analiz sonucu Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11: Taban külü numunesine ait temel oksit içeriği.

Tuvenan numunesine ait CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO ve SrO içerikleri sırasıyla %38,6, %29,9, %9,4, %8,2, %2,1 ve %7,5'tir. Taban külü tuvenan numunesine yapılan

XRF analizi sonucuna göre, yapının ağırlıklı olarak CaO ve SiO₂'den oluştuğu görülmektedir.

Taban külü numunesinin NTE içeriğinin tespiti için kimyasal analiz işlemlerinden önce ASTM D6357 standartı uygulanmış olup, elek analizi sonucunda elde edilen tüm boyut gruplarında ve fiziksel zenginleştirme ürünlerinde bu standart kullanılmıştır.

ASTM D6357 standartına göre, yaklaşık 0,5 g kül verecek kömür veya kok örneği 0,1 mg hassasiyetle 50 mL'lik açık bir kuvars veya yüksek silika krozede tartılır. Kroze soğuk kül fırınına yerleştirilir. Sıcaklık kontrolü, fırın 1 saatte 300°C'ye ve ardından ikinci saatte 500°C'ye ulaşacak şekilde ayarlanır. Numune ara ara karıştırılarak fırın sıcaklığı en az 2 saat 500°C'de tutulur. Külleme, görünür karbonlu malzeme kanıtı kalmadığında tamamlanmış olur. Numuneler, su emilimini en aza indiren koşullar altında oda sıcaklığında soğutulur. Kül numunesi bir agat havanda -150 µm olacak şekilde öğütülür ve ardından 500°C'de 1 saat tutulmak üzere yeniden kül fırınına konulur. Kül numunesi soğutulmak üzere desikatöre konulur. Analiz örneğinin kül yüzdesi belirlenir (Url-5).

Bu standarta göre külleme işlemi uygulanan taban külü numunesine ait temsili görsel Şekil 3.12'de verilmiştir. Buna göre elek analizi sonucunda elde edilen boyut gruplarındaki toplam NTE içerikleri ise Çizelge 3.3'te verilmiştir.

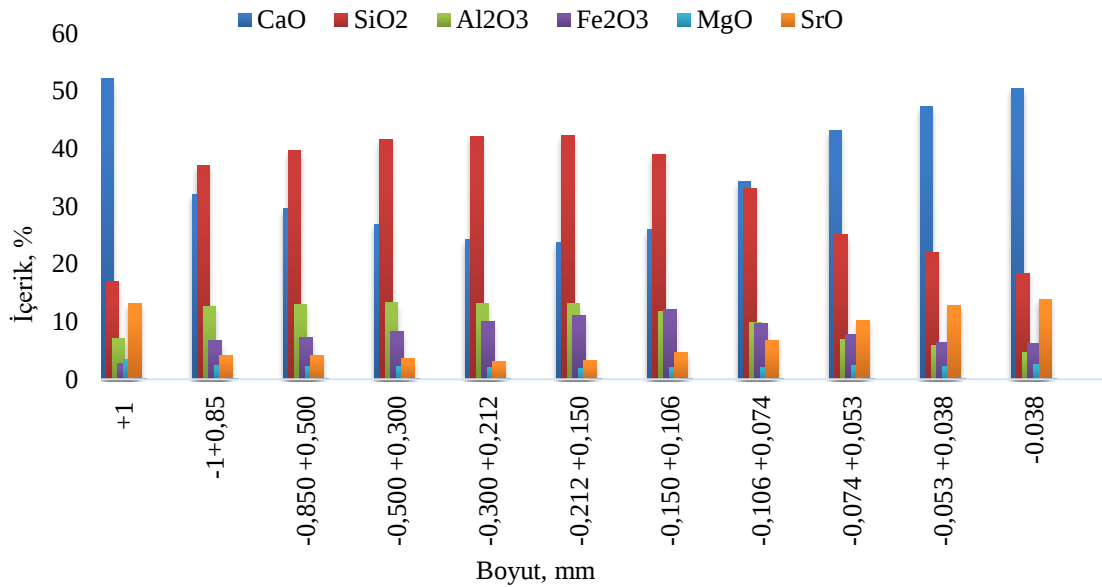


Şekil 3.12: ASTM D6357 standartına göre külleme işlemi yapılan taban külü numunesi.

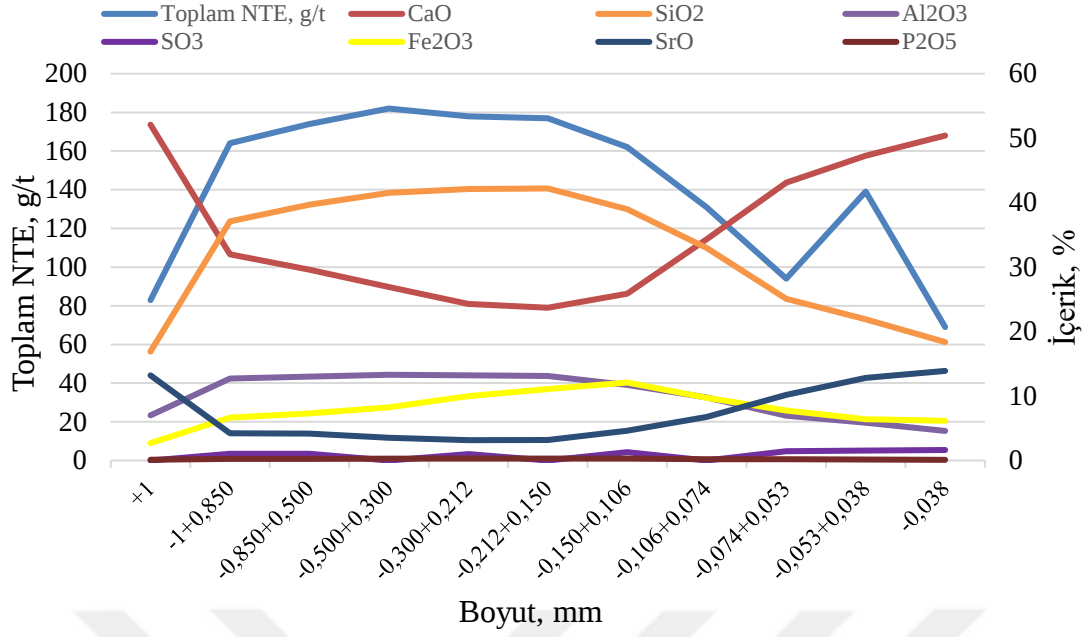
Çizelge 3.3: Taban külü boyut ve boyuta göre toplam NTE içerik ve dağılımları (küle göre).

Boyut, mm	Miktar, %	Kül İçeriği, %	Σ HNTE		Σ ANTE		Σ NTE	
			İçerik, g/t	Dağılım, %	İçerik, g/t	Dağılım, %	İçerik, g/t	Dağılım, %
+1	18,8	92,1	20	10,0	63	12,2	83	11,1
-1+0,850	7,3	92,3	43	8,4	121	9,1	164	8,6
-0,850+0,500	16,9	92,7	47	20,8	127	22,1	174	20,9
-0,500+0,300	16,8	91,8	50	22,0	133	23,0	182	21,8
-0,300+0,212	8,8	92,9	48	11,2	130	11,8	178	11,2
-0,212+0,150	6,4	95,2	48	8,2	128	8,5	177	8,0
-0,150+0,106	5,0	96,1	45	5,9	116	5,9	162	5,7
-0,106+0,075	4,0	92,5	38	4,0	93	3,8	131	3,7
-0,075+0,053	2,9	94,3	28	2,1	66	2,0	94	1,9
-0,053+0,038	1,4	93,2	25	0,9	115	1,7	139	1,4
-0,038	11,7	91,9	21	6,5	48	5,8	69	5,7
Toplam	100,0	93,2	38	100,0	97	100,0	141	100,0

Boyut gruplarındaki kimyasal analiz sonuçlarına göre taban külü numunesi kül bazında toplam 141 g/t NTE içermektedir. Toplam hafif nadir toprak elementi (HNTE) ve ağır nadir toprak elementi (ANTE) içerikleri ise sırasıyla 38 g/t ve 97 g/t'dir. En yüksek NTE içeriği -0,5+0,3 mm boyut grubunda elde edilmiş olup, bu gruptaki toplam NTE içeriği 182 g/t'dir. Kimyasal analiz sonucunda tuvenan numunesinin toplam NTE içeriği ise 123 g/t olarak bulunmuştur. Taban külü numunesinin boyut gruplarına göre temel oksit içeriği Şekil 3.13'te verilirken, boyut gruplarında birleştirilmiş temel oksit-toplam NTE içeriği ise Şekil 3.14'te verilmektedir.



Şekil 3.13: Taban külü numunesi boyut gruplarına göre temel oksit içeriği.



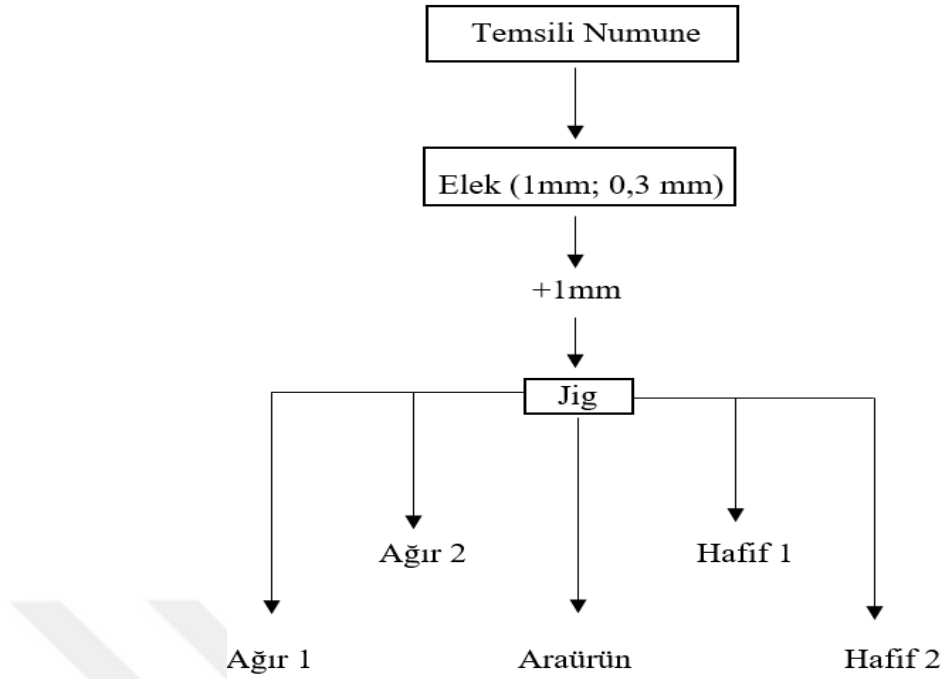
Şekil 3.14: Taban külü numunesinin boyut gruplarında birleştirilmiş temel oksit-toplam NTE içeriği.

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'teki veriler incelendiğinde, temel oksit analiz sonucuna göre hemen hemen tüm boyut gruplarında CaO ve SrO içeriklerinin benzer eğilimde olduğu ve toplam NTE içeriği ile ters yönde hareket ettiği görülmektedir. Genel olarak CaO ve SrO içerikleri ince boyutlarda artma eğilimi göstermektedir.

3.3 Zenginleştirme Deneyleri Sonuçları

3.3.1 Jig ile yapılan zenginleştirme deney sonucu

+1 mm boyutundaki malzemeye yapılan jig zenginleştirme deneyine ait akım şeması deney parametreleriyle birlikte Şekil 3.15'te, küle ve deneye göre sonuçları da sırasıyla Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te verilmiştir. Şekil 3.16'da da elde edilen ürünlerdeki Σ NTE içerikleri verilmektedir.



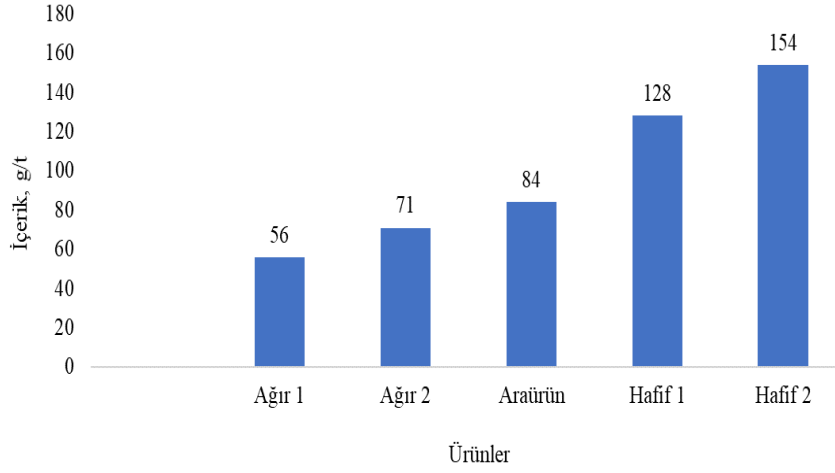
Şekil 3.15: +1 mm boyutunda Jig deneyi akım şeması.

Çizelge 3.4: + 1 mm boyutunda Jig deneyi sonucu (küle göre).

Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	ΣHNTE, g/t	ΣANTE, g/t	ΣNTE, g/t	ΣNTE Dağılım, %
+1	Ağır 1	22,6	95,7	17	39	56	14,8
	Ağır 2	21,0	93,8	20	51	71	17,4
	Araürün	38,1	92,3	23	61	84	37,4
	Hafif 1	8,1	75,7	34	94	128	12,1
	Hafif 2	10,2	81,9	40	114	154	18,3
Toplam		100,0	91,0	24	62	86	100,0

Çizelge 3.5: + 1 mm boyutunda Jig deneyi sonucu (deneye göre).

Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	ΣHNTE, g/t	ΣANTE, g/t	ΣNTE, g/t	ΣNTE Dağılım, %
+1	Ağır 1	22,6	95,8	16	37	54	15,9
	Ağır 2	21,0	93,9	19	48	67	18,3
	Ara Ürün	38,1	92,3	21	56	78	38,7
	Hafif 1	8,1	75,7	26	71	97	10,3
	Hafif 2	10,2	81,9	33	93	126	16,9
Toplam		100,0	91,0	22	56	76	100,0

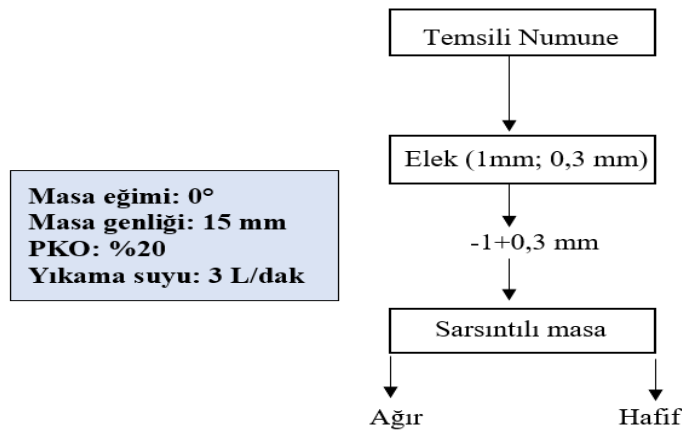


Şekil 3.16: +1 mm boyutunda Jig deney ürünleri ve Σ NTE içeriği.

Jig zenginleştirme deneyi sonucunda ağır 1, ağır 2, araürün, hafif 1 ve hafif 2 olmak üzere toplam beş ürün elde edilmiştir. Çizelge 3.4'te küle göre verilen sonuçlar incelendiğinde, Σ NTE içeriği 154 g/t olan hafif bir ürün %18,3 kazanma verimi ile üretilmiştir. Ağır üründe kazanılması beklenen NTE'lerin hafif üründe zenginleştiği görülmüştür. Taban külünün ısıtma işlem görmüş bir malzeme olmasından kaynaklı yapısındaki elementlerin de farklı bir faza dönüştüğü düşünülmektedir. Bundan dolayı ağır ürünle hareket etmesi beklenen NTE'lerin hafif ürünle hareket ettiği tahmin edilmektedir.

3.3.2 Sarsıntılı masa ile yapılan zenginleştirme deney sonucu

-1+0,3 mm boyut aralığındaki malzemeye yapılan sarsıntılı masa deneyine ait akım şeması deney parametreleriyle birlikte Şekil 3.17'de, küle ve deneye göre sonuçları da sırasıyla Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17: -1+0,3 mm boyutunda sarsıntılı masa deneyi akım şeması.

Çizelge 3.6: -1+0,3 mm boyutunda sarsıntılı masa deney sonucu (küle göre).

Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	Σ HNTE, g/t	Σ ANTE, g/t	Σ NTE, g/t	Σ NTE Dağılım, %
-1+0,3	Ağır	47,6	89,2	34	96	130	46,5
	Hafif	52,4	87,2	35	101	136	53,5
Toplam		100,0	88,1	35	99	133	100,0

Çizelge 3.7: -1+0,3 mm boyutunda sarsıntılı masa deneyi sonucu (deneye göre).

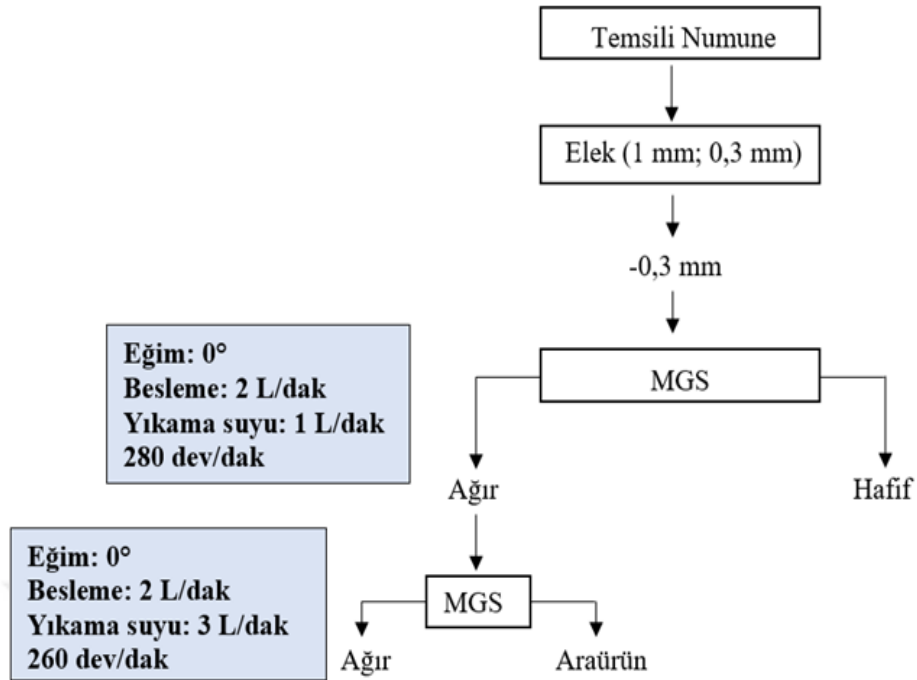
Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	Σ HNTE, g/t	Σ ANTE, g/t	Σ NTE, g/t	Σ NTE Dağılım, %
-1+0,3	Ağır	47,6	89,2	30	86	116	47,0
	Hafif	52,4	87,2	31	88	119	53,0
Toplam		100,0	88,1	30	87	117	100,0

Çizelge 3.6’da küle göre verilen -1+0,3 mm boyut grubunda yapılan sarsıntılı masa deney sonucuna göre ağır ve hafif olmak üzere iki ürün elde edilmiştir. Ağır üründeki Σ NTE içeriği 130 g/t olup %47,0 kazanma verimi ile alınmıştır. Hafif üründeki Σ NTE içeriği ise 136 g/t olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre sarsıntılı masa ile bir NTE zenginleşmesinin olmadığı anlaşılmıştır.

3.3.3 MGS ile yapılan zenginleştirme deneyi sonuçları

3.3.3.1 -0,3 mm boyutunda MGS deney sonucu

-0,3 mm boyutundaki malzemeye yapılan MGS deneyine ait akım şeması deney parametreleriyle birlikte Şekil 3.18’de, küle ve deneye göre sonuçları da sırasıyla Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9’da gösterilmiştir. Şekil 3.19’da ise elde edilen ürünlerdeki Σ NTE içerikleri verilmektedir.



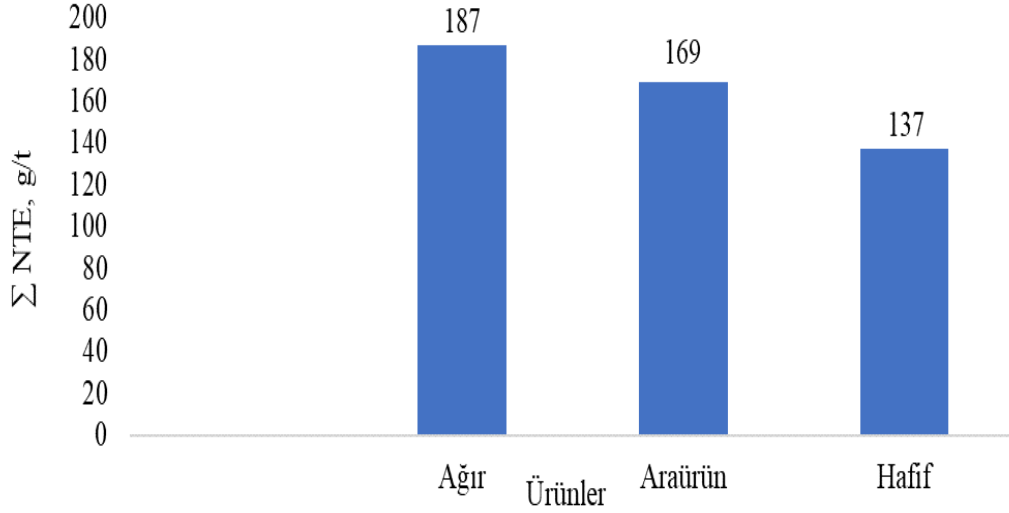
Şekil 3.18: -0,3 mm boyutunda MGS deneyi akım şeması.

Çizelge 3.8: -0,3 mm boyutunda MGS deney sonucu (küle göre).

Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	ΣHNTE, g/t	ΣANTE, g/t	ΣNTE, g/t	ΣNTE Dağılım, %
-0,3	Ağır	30,6	94,0	55	132	187	34,7
	Araürün	39,9	88,0	42	127	169	40,9
	Hafif	29,5	79,5	27	110	137	24,5
Toplam		100,0	87,3	42	124	165	100,0

Çizelge 3.9: -0,3 mm boyutunda MGS deney sonucu (deneye göre).

Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	ΣHNTE, g/t	ΣANTE, g/t	ΣNTE, g/t	ΣNTE Dağılım, %
-0,3	Ağır	30,6	94,0	52	124	176	34,7
	Araürün	39,9	88,0	37	112	149	40,9
	Hafif	29,5	79,5	21	87	108	24,5
Toplam		100,0	87,3	36	108	144	100,0

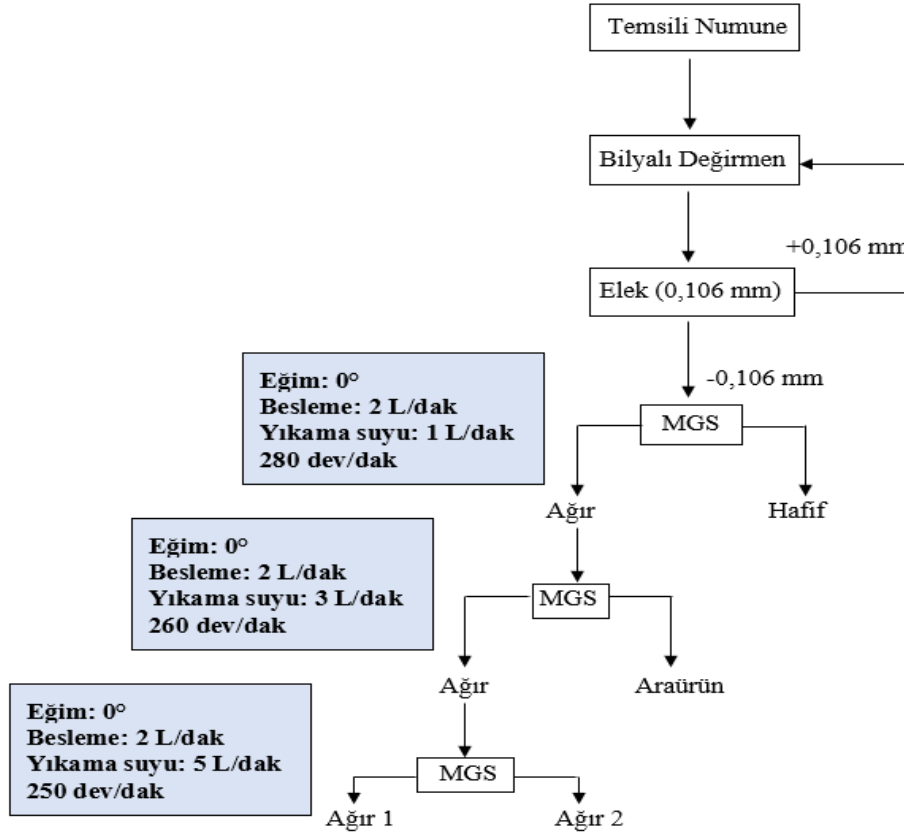


Şekil 3.19: -0,3 mm boyutunda MGS deney ürünleri ve Σ NTE içeriği.

Çizelge 3.8’ de küle göre verilen -0,3 mm boyutunda yapılan MGS deney sonucuna göre, ağırlıkça %30,6 oranında ve Σ NTE içeriği 187 g/t olan bir ağır ürün %34,7 kazanma verimi ile elde edilmiştir. Ağırlıkça %39,9 oranında bir araürün NTE içeriği 169 g/t olarak bulunmuştur. Ağırlıkça %29,5 oranında bir hafif ürün ise Σ NTE içeriği 137 g/t olarak alınmıştır.

3.3.3.2 -0,106 mm boyutunda MGS deney sonucu

-0,106 mm boyutundaki malzemeye yapılan MGS deneyine ait akım şeması deney parametreleriyle birlikte Şekil 3.20’de, küle ve deneye göre sonuçları da sırasıyla Çizelge 3.10 ve Çizelge 3.11’de gösterilmiştir. Şekil 3.21’de de elde edilen ürünlerdeki Σ NTE içerikleri verilmektedir.



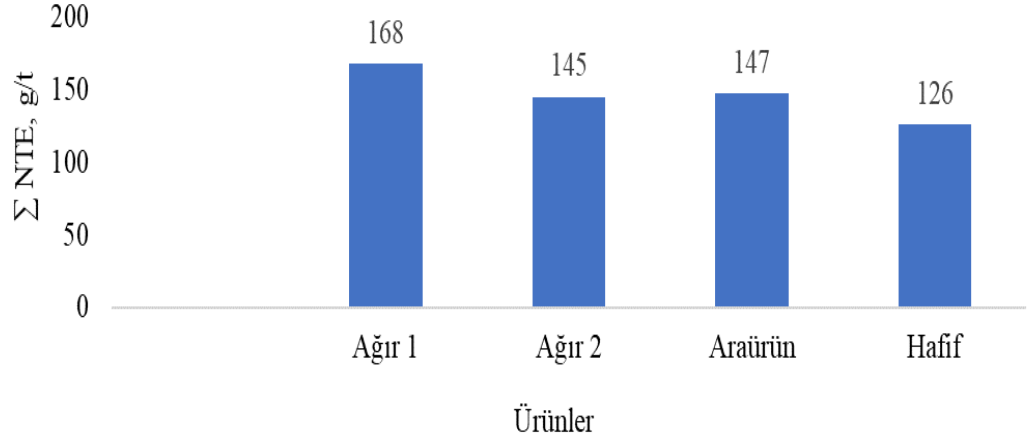
Şekil 3.20: -0,106 mm boyutunda MGS deneyi akım şeması.

Çizelge 3.10: -0,106 mm boyutunda MGS deney sonucu (küle göre).

Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	Σ HNTE, g/t	Σ ANTE, g/t	Σ NTE, g/t	Σ NTE Dağılım, %
-0,106	Ağır 1	30,5	97,5	49	119	168	34,8
	Ağır 2	34,9	96,0	38	107	145	34,3
	Araürün	9,0	89,3	37	110	147	9,0
	Hafif	25,6	83,5	32	94	126	21,9
Toplam		100,0	92,7	40	108	147	100,0

Çizelge 3.11: -0,106 mm boyutunda MGS deney sonucu (deneye göre).

Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	Σ HNTE, g/t	Σ ANTE, g/t	Σ NTE, g/t	Σ NTE Dağılım, %
-0,106	Ağır 1	30,5	97,5	48	116	164	36,4
	Ağır 2	34,9	96,0	36	103	139	35,4
	Araürün	9,0	89,3	33	98	131	8,6
	Hafif	25,6	83,5	27	78	105	19,6
Toplam		100,0	92,7	37	100	137	100,0



Şekil 3.21: -0,106 mm boyutunda MGS deney ürünleri ve Σ NTE içeriği.

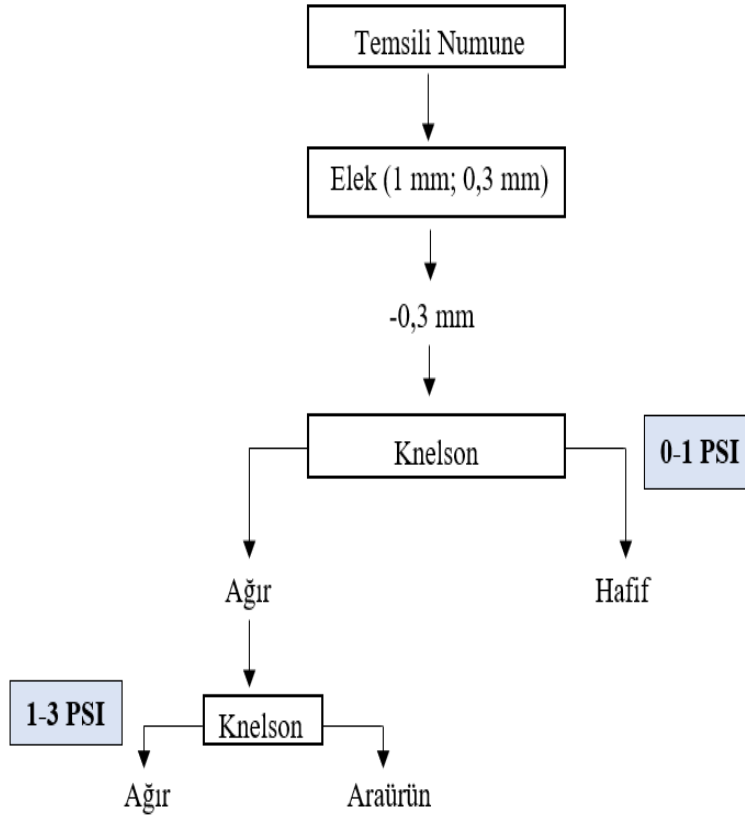
-0,106 mm boyutundaki malzemeye uygulanan MGS deneyinin küle göre sonucu incelendiğinde, ağırlıkça %30,5 oranında ve Σ NTE içeriği 168 g/t olan ağır bir ürün %34,8 kazanma verimi ile elde edilmiştir. Ağırlıkça %9,0 oranında bir araürün NTE içeriği 147 g/t olarak bulunmuştur. Ağırlıkça %25,6 oranında da hafif bir ürün Σ NTE içeriği 126 g/t olarak alınmıştır.

Genel olarak -0,3 mm ve -0,106 mm boyutlarındaki malzemelere uygulanan MGS deneyi sonuçlarına göre, ağır ürünlerdeki Σ NTE içerikleri nispeten benzer oranlarda bir artış eğilimi göstermiştir. MGS santrifüj tipi ayırıcı ile yapılan özgül ağırlık farkına göre ayırma deneylerinin NTE eldesi için tek başına yeterli olmadığı tespit edilmiştir. Bu sebepten ötürü MGS'den çok daha yüksek G kuvvetlerine çıkabilen diğer santrifüj tipi ayırıcı ile zenginleştirme deneylerinin yapılmasına karar verilmiştir.

3.3.4 İnce boyutlarda Knelson ile zenginleştirme deneyi sonuçları

3.3.4.1 -0,3 mm boyutunda zenginleştirme deney sonucu

-0,3 mm boyutundaki malzemeye yapılan Knelson deneyine ait akım şeması deney parametreleriyle birlikte Şekil 3.22'de, küle ve deneye göre sonuçları da sırasıyla Çizelge 3.12 ve Çizelge 3.13'te gösterilmiştir. Şekil 3.22'de de elde edilen ürünlerdeki Σ NTE içerikleri verilmektedir.



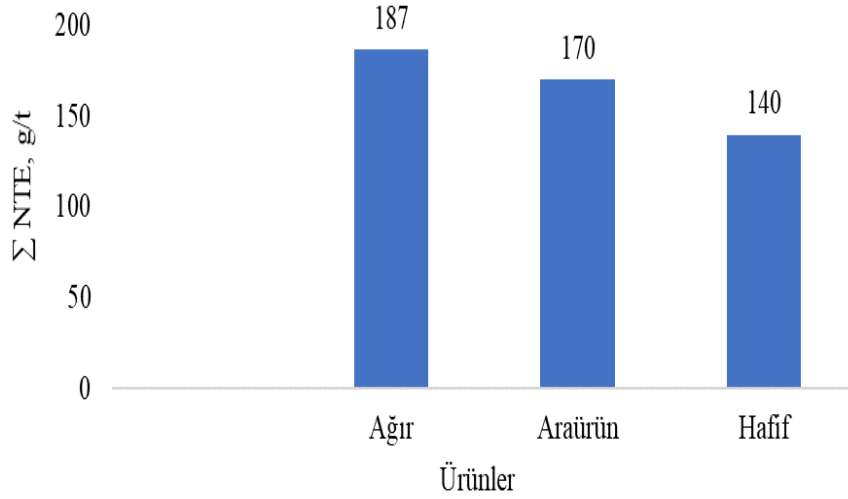
Şekil 3.22: -0,3 mm boyutunda Knelson deneyi akım şeması.

Çizelge 3.12: -0,3 mm boyutunda Knelson deney sonucu (küle göre).

Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	ΣHNTE, g/t	ΣANTE, g/t	ΣNTE, g/t	ΣNTE Dağılım, %
-0,3	Ağır	36,6	94,2	49	138	187	41,0
	Araürün	32,4	89,9	42	128	170	33,0
	Hafif	31,0	89,9	27	113	140	26,0
Toplam		100,0	91,5	40	127	167	100,0

Çizelge 3.13: -0,3 mm boyutunda Knelson deney sonucu (deneye göre).

Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	ΣHNTE, g/t	ΣANTE, g/t	ΣNTE, g/t	ΣNTE Dağılım, %
-0,3	Ağır	36,6	94,2	46	130	176	42,1
	Araürün	32,4	89,9	38	115	153	32,4
	Hafif	31,0	89,9	24	102	126	25,5
Toplam		100,0	91,5	37	116	153	100,0

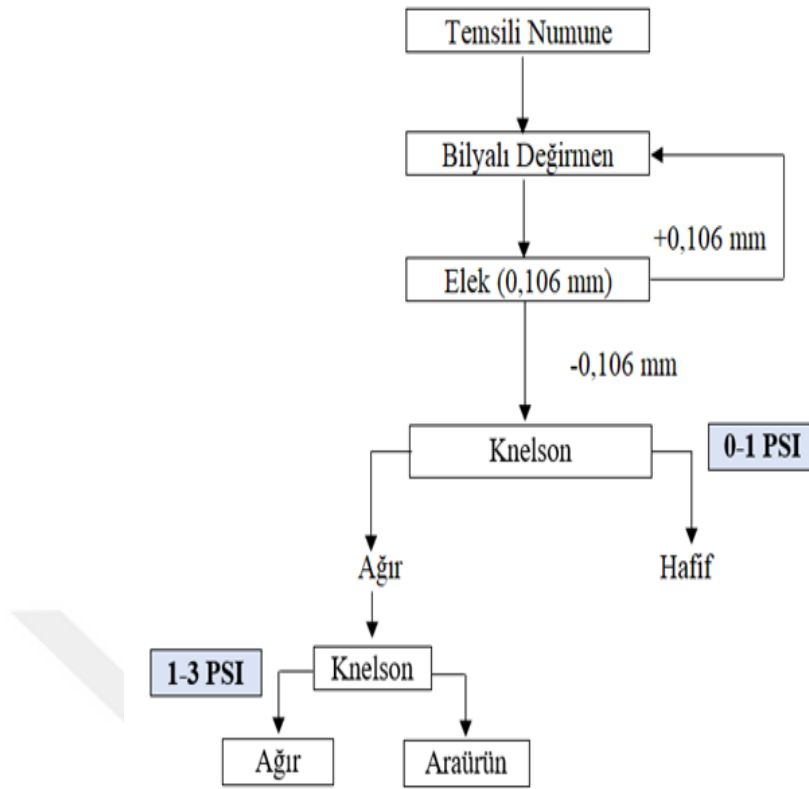


Şekil 3.23: -0,3 mm boyutunda Knelson deney ürünleri ve Σ NTE içeriği.

-0,3 mm'deki Knelson santrifüj tipi ayırıcı ile yapılan deneyin küle göre sonucu incelendiğinde, ağırlıkça % 36,6 oranında bir ağır ürün Σ NTE içeriği 187 g/t olarak %41,0 kazanma verimi ile elde edilmiştir. Ağırlıkça %32,4 oranında bir araürün Σ NTE içeriği 170 g/t olarak bulunmuştur. Ağırlıkça %31,0 oranında ise hafif bir ürün Σ NTE içeriği 140 g/t olarak alınmıştır.

3.3.4.2 -0,106 mm boyutunda zenginleştirme deney sonucu

-0,106 mm boyutundaki malzemeye yapılan Kelson deneyine ait akım şeması deney parametreleriyle birlikte Şekil 3.24'te, küle ve deneye göre sonuçları da sırasıyla Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.15'te gösterilmiştir. Şekil 3.25'te de elde edilen ürünlerdeki Σ NTE içerikleri verilmektedir.



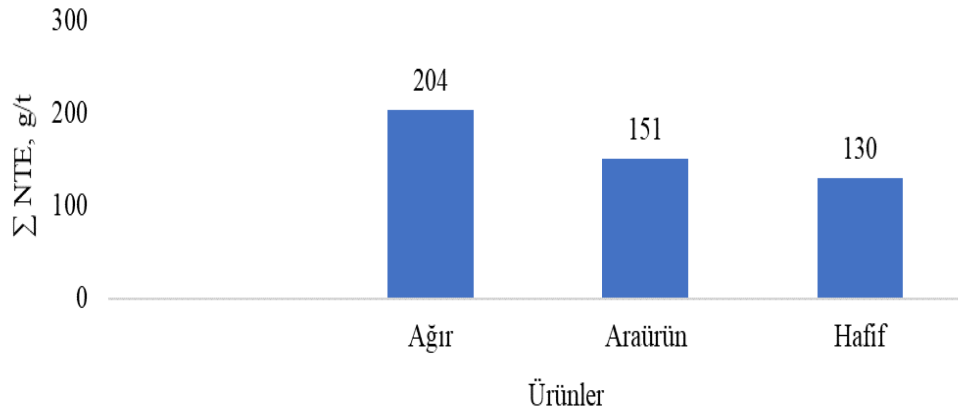
Şekil 3.24: -0,106 mm boyutunda Knelson deneyi akım şeması.

Çizelge 3.14 : -0,106 mm boyutunda Knelson deney sonucu (küle göre).

Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	Σ HNTE, g/t	Σ ANTE, g/t	Σ NTE, g/t	Σ NTE Dağılım, %
-0,106	Ağır	7,0	96,3	52	152	204	10,1
	Araürün	27,0	93,9	39	112	151	28,9
	Hafif	66,0	94,9	35	95	130	60,9
Toplam		100,0	94,7	37	104	141	100,0

Çizelge 3.15 : -0,106 mm boyutunda Knelson deney sonucu (deneye göre).

Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	Σ HNTE, g/t	Σ ANTE, g/t	Σ NTE, g/t	Σ NTE Dağılım, %
-0,106	Ağır	7,0	96,3	50	146	196	10,3
	Araürün	27,0	93,9	37	105	142	28,7
	Hafif	66,0	94,9	33	90	123	61,0
Toplam		100,0	94,7	35	98	133	100,0



Şekil 3.25: -0,106 mm boyutunda Knelson deney ürünleri ve Σ NTE içeriği.

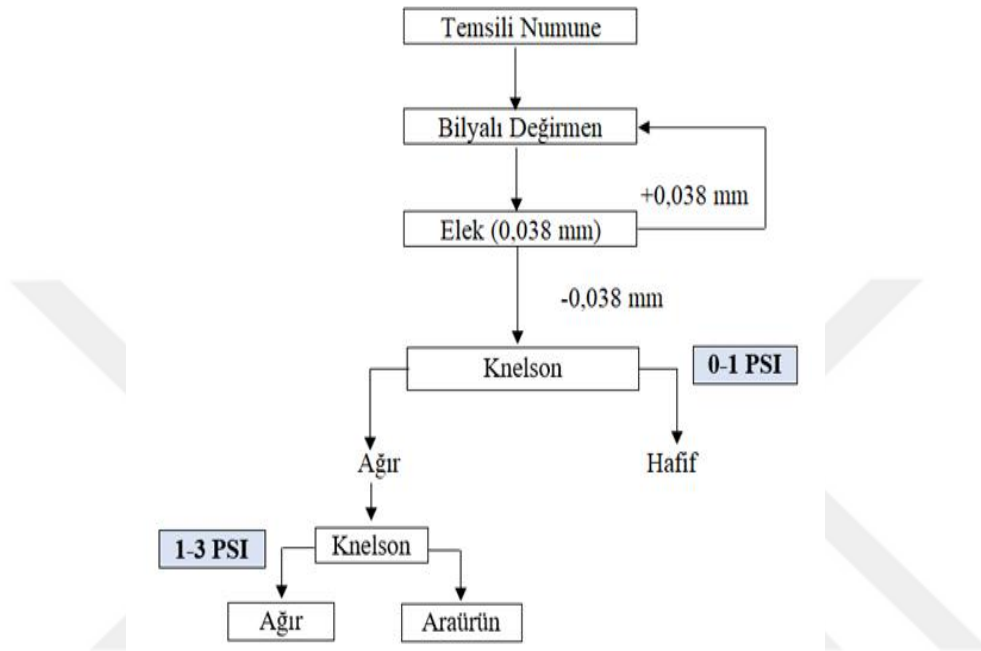
-0,106 mm'deki Knelson santrifüj tipi ayırıcı ile yapılan deneyin küle göre sonucu incelendiğinde, ağırlıkça %7,0 oranında ağır bir ürün Σ NTE içeriği 204 g/t olarak %10,1 kazanma verimi ile elde edilmiştir. Ağırlıkça %27,0 oranında bir araürün Σ NTE içeriği 151 g/t olarak bulunmuştur. Ağırlıkça %66,0 oranında da hafif bir ürün Σ NTE içeriği 130 g/t olarak alınmıştır.

Genel olarak -0,3 mm ve -0,106 mm boyutlarında Knelson santrifüj tipi ayırıcı ile yapılan zenginleştirme deneylerinde, -0,106 mm boyutundaki ağır üründe kısmi bir NTE zenginleşmesi olduğu belirlenmiştir. Taban külü numunesinden NTE eldesi için kullanılan özgül ağırlık farkına göre ayırma yapan MGS ve Knelson santrifüj tipi ayırıcıların etkinliği karşılaştırıldığında, her iki cihaz için de -0,3 mm boyutunda benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür. Ancak -0,106 mm boyutunda Knelson santrifüj tipi ayırıcısının NTE eldesi için daha etkin bir ayırma yaptığı tespit edilmiştir.

Özgül ağırlık farkına göre yapılan ayırma işlemlerinin sonuçları incelendiğinde, serbestleşmenin ve G kuvvetinin arttığı durumlarda deneylerin olumlu bir sonuç verdiği belirlenmiştir. -0,106 mm boyutunda Knelson santrifüj tipi ayırıcısı kullanılarak yapılan deney sonuçları doğrultusunda daha ince boyutlarda deneyin devam edilmesine karar verilmiştir. Bu amaçla -0,038 mm boyutunda Knelson santrifüj tipi ayırıcısı kullanılarak NTE eldesi çalışması yapılmıştır. -0,038 mm'de yapılan deneye önceki boyutlarda kullanılan parametreler ile devam edilmiş olup, ince boyutun etkinliği incelenmiştir.

3.3.4.3 -0,038 mm boyutunda zenginleştirme deney sonucu

-0,038 mm boyutundaki malzemeye yapılan Kelson deneyine ait akım şeması deney parametreleriyle birlikte Şekil 3.26’da, küle ve deneye göre sonuçları da sırasıyla Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17’de gösterilmiştir. Şekil 3.27’de de elde edilen ürünlerdeki Σ NTE içerikleri verilmektedir.



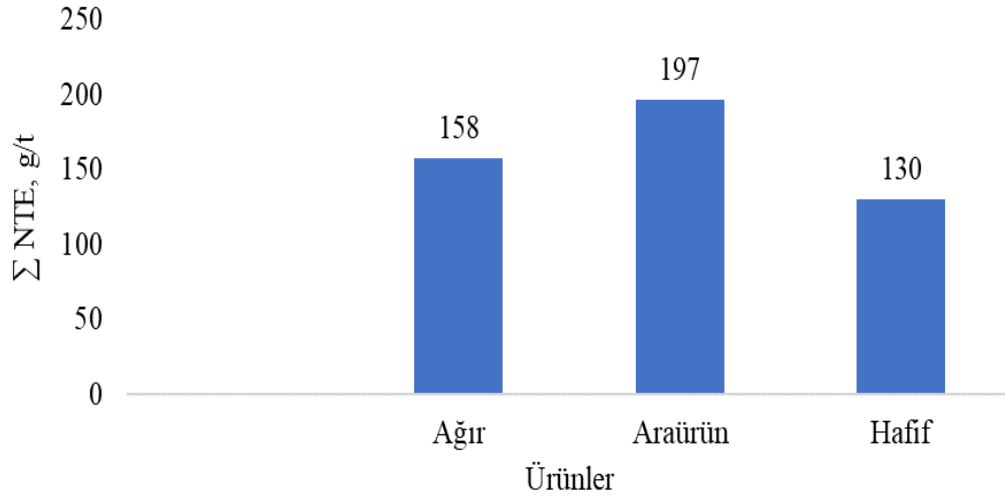
Şekil 3.26: -0,038 mm boyutunda Knelson deneyi akım şeması.

Çizelge 3.16 : -0,038 mm boyutunda Knelson deney sonucu (küle göre).

Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	Σ HNTE, g/t	Σ ANTE, g/t	Σ NTE, g/t	Σ NTE Dağılım, %
-0,038	Ağır	6,0	97,0	42	116	158	6,3
	Araürün	27,0	93,9	51	146	197	35,6
	Hafif	67,0	92,1	36	94	130	58,1
Toplam		100,0	92,9	40	110	150	100,0

Çizelge 3.17 : -0,038 mm boyutunda Knelson deney sonucu (deneye göre).

Boyut, mm	Ürünler	Miktar, %	Kül, %	Σ HNTE, g/t	Σ ANTE, g/t	Σ NTE, g/t	Σ NTE Dağılım, %
-0,038	Ağır	6,0	97,0	41	113	153	6,6
	Araürün	27,0	93,9	48	137	185	35,9
	Hafif	67,0	92,1	33	87	120	57,5
Toplam		100,0	92,9	37	102	139	100,0



Şekil 3.27: -0,038 mm boyutunda Knelson deney ürünleri ve ΣNTE içeriği.

-0,038 mm'deki Knelson santrifüj tipi ayırıcı ile yapılan deneyin küle göre sonucu incelendiğinde, ağırlıkça %6,0 oranında ağır bir ürün ΣNTE içeriği 158 g/t olarak %6,3 kazanma verimi ile elde edilmiştir. Ağırlıkça %27,0 oranında bir araürün ΣNTE içeriği 197 g/t olarak bulunmuştur. Ağırlıkça %67,0 oranında da hafif bir ürün ΣNTE içeriği 130 g/t olarak alınmıştır.

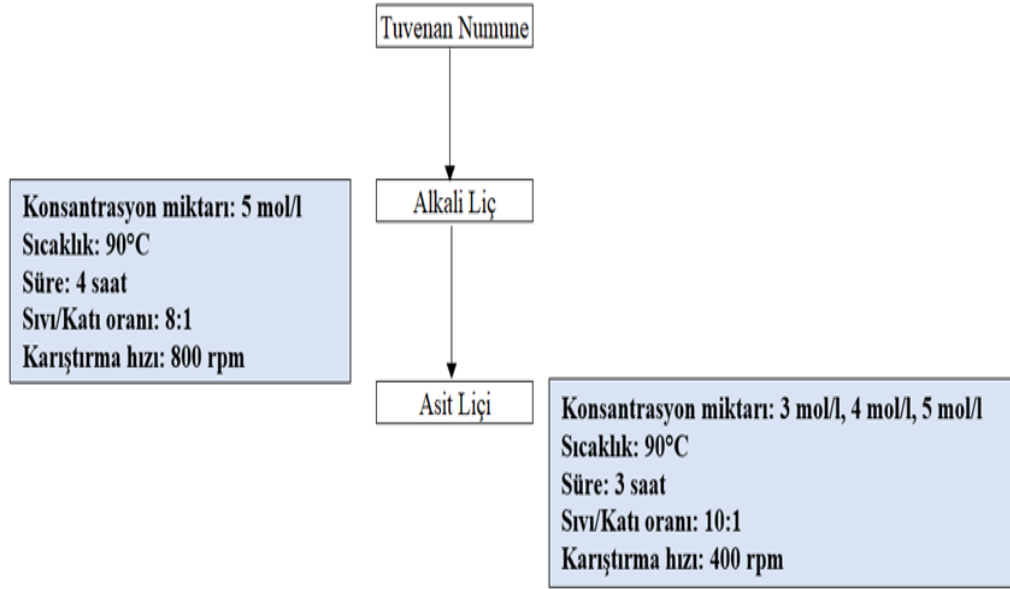
-0,038 mm boyutunda yapılan Knelson zenginleştirme deneyi sonucu ile -0,106 mm boyutundaki deney sonucu karşılaştırıldığında, serbestleşmenin artmasına rağmen 0,038 mm altındaki ağır üründe elde edilen ΣNTE içeriği daha düşüktür. Bu durum 0,038 mm altında serbestleşmenin artmasına rağmen NTE'lerin zenginleşemediğini göstermektedir. Taban külü numunesinin ısıtma işlemi görmüş bir malzeme olmasından kaynaklı yapısının değiştiği ve içeriğindeki NTE'lerin de bundan dolayı farklı hareket ettiği tahmin edilmektedir.

3.3.5 Kimyasal zenginleştirme deneyi sonuçları

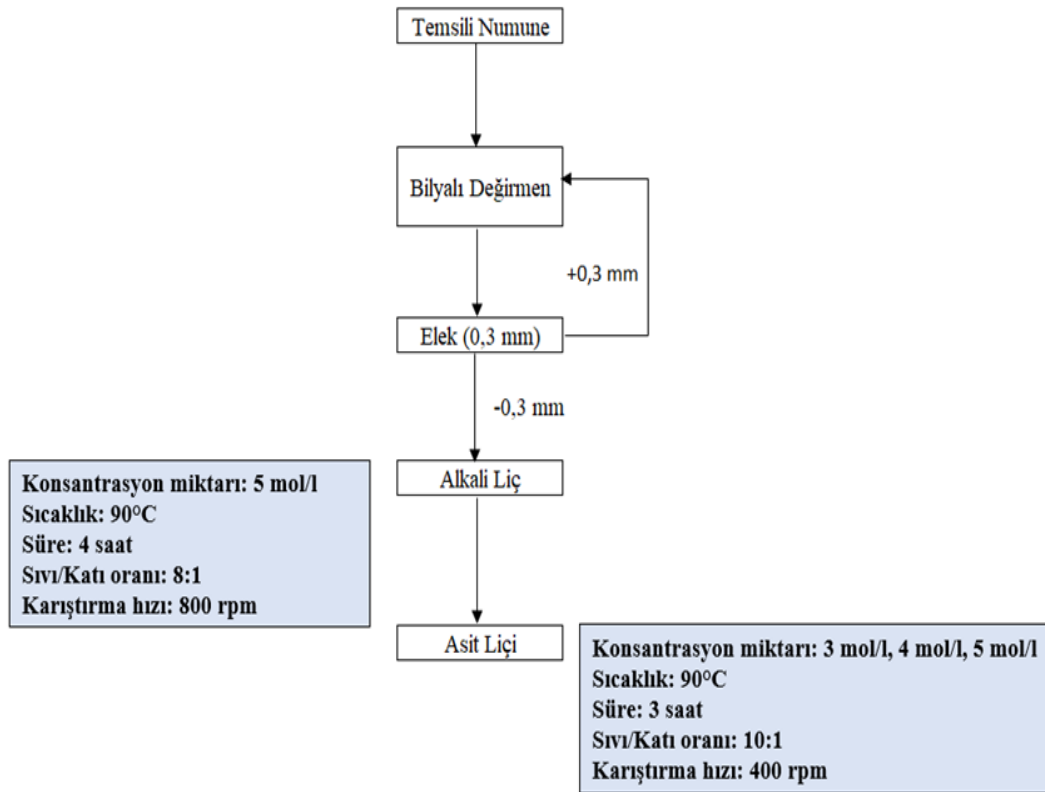
Kimyasal zenginleştirme deneyleri kapsamında tuvenan malzeme ve -0,3 mm ile -0,106 mm boyutlarındaki numunelere ön işlem olarak alkali liç (NaOH) ve sonrasında da asit liç (HCl) deneyleri yapılmıştır. Alkali liç deneyi koşulları sabit tutulmuş olup, asit konsantrasyonu miktarı 3 mol/L, 4, mol/L ve 5 mol/L olacak şekilde değiştirilmiştir. Alkali liç işlemi asit liçinden önce uygulanan bir ön işlemdir. Alkali liç deneylerindeki temel amaç, NTE'lerin bağlı olduğu alümina silikat camsı fazın parçalanmasını sağlayıp NTE'lerin asit liçindeki çözünürlüğünü arttırmaktır. Genel olarak asit liç deneylerinde boyut ve asit konsantrasyon miktarı değiştirilerek NTE kazanımı hedeflenmiştir.

3.3.5.1 Alkali liç (NaOH liçi) deney sonuçları

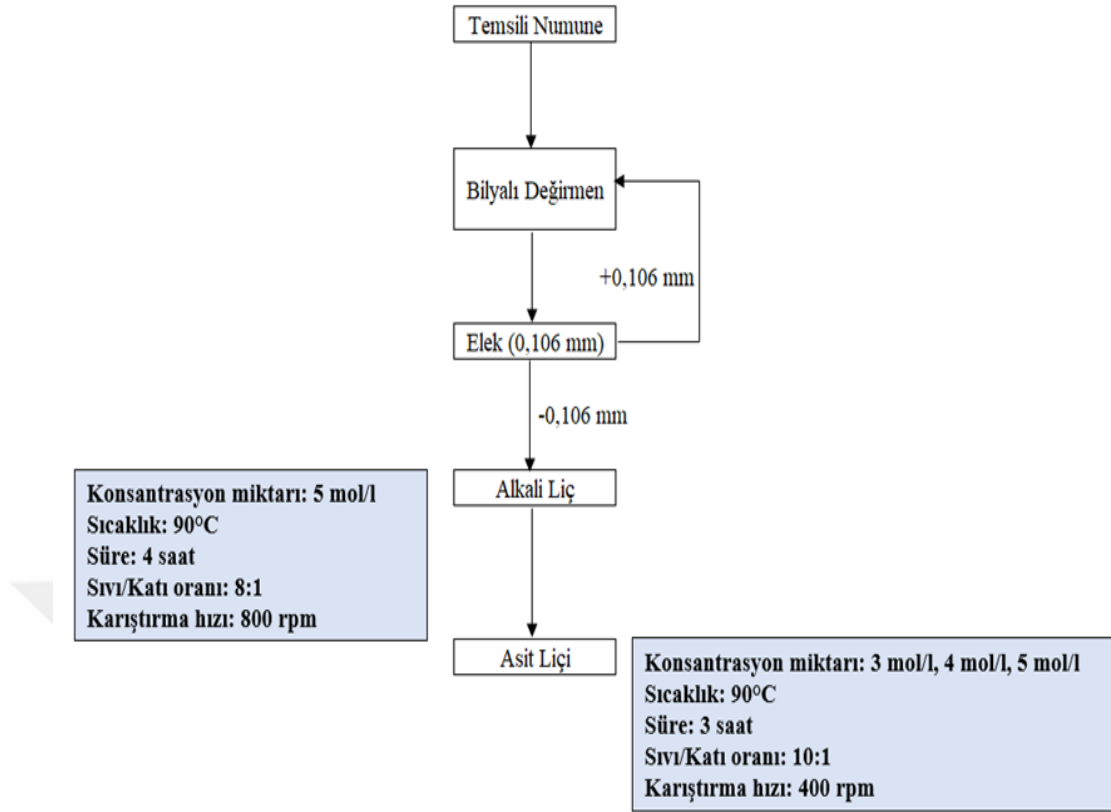
Tuvenan numune ve -0,3 mm ile -0,106 mm boyutlarındaki numunelere uygulanan liç işlemlerine ait genel akım şeması deney parametreleriyle birlikte sırasıyla Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30’da verilmiştir.



Şekil 3.28: Tuvenan numuneye uygulanan liç deneyleri akım şeması.



Şekil 3.29: -0,3 mm boyutundaki numuneye uygulanan liç deneyleri akım şeması.



Şekil 3.30: -0,106 mm boyutundaki numuneye uygulanan liç deneyleri akım şeması.

Alkali liç işlemi sonucunda tuvenan, -0,3 mm ve -0,106 mm boyutlarındaki kek numunelerinin liç işlemi öncesi ve sonrası miktar değişimi Çizelge 3.18’de gösterilmiştir.

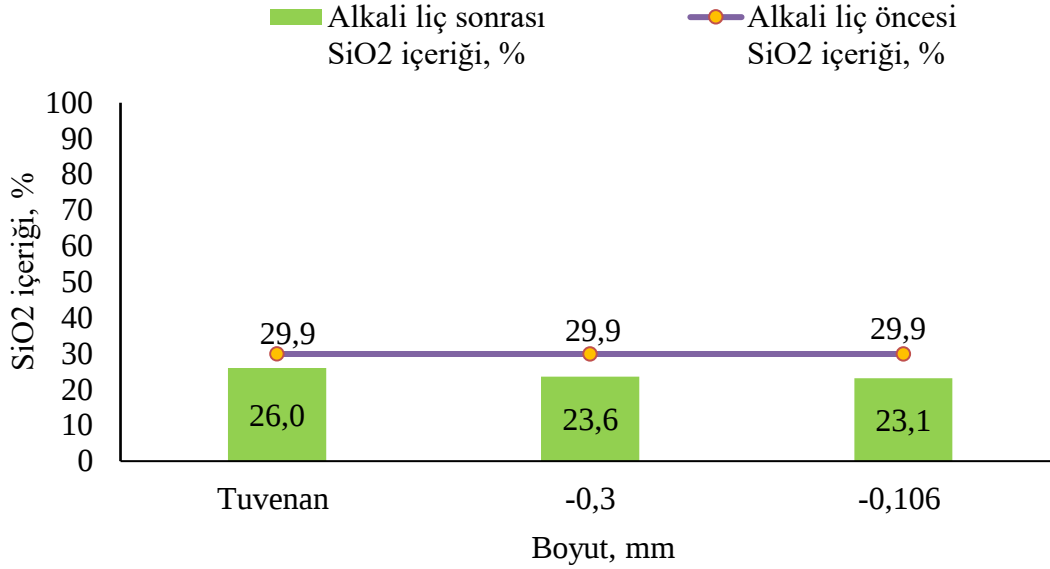
Çizelge 3.18: Üç farklı boyutta alkali liç sonrası kek miktarlarındaki değişim oranları.

Alkali Liç			
Numune	Liç başlangıç miktarı, g	Kek miktarı, g	Değişim oranları, %
Tuvenan	50	54,2	8,4
-0,3 mm	50	62,2	24,4
-0,106 mm	50	70,1	40,2

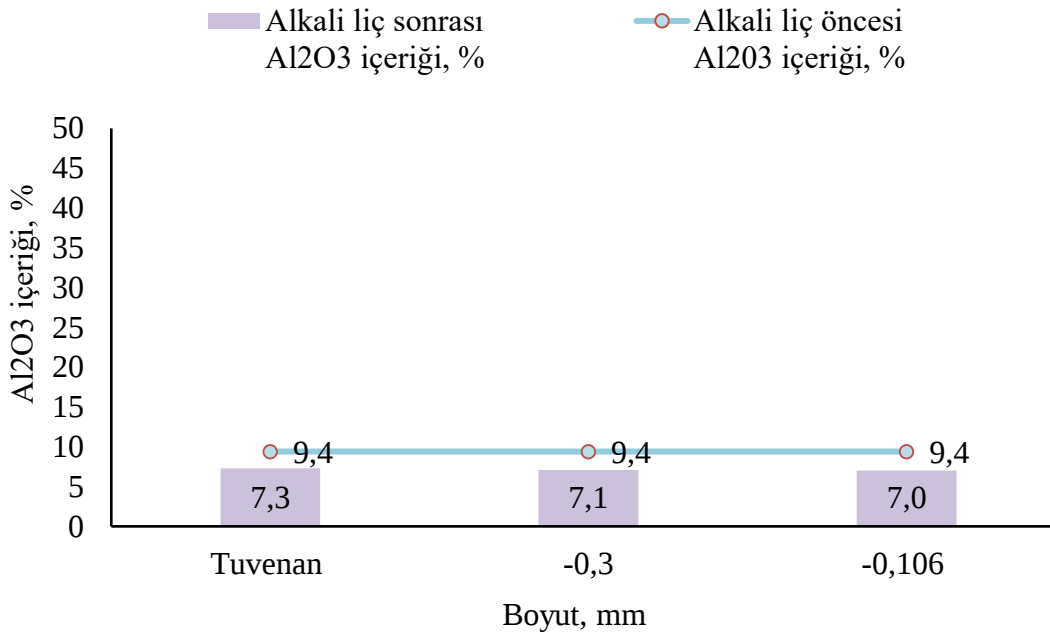
Çizelge 3.18’de verilen tuvenan, -0,3 mm ve -0,106 mm boyutlarındaki alkali liç işlemi öncesi ve sonrasına ait miktar değişimleri incelendiğinde, liç sonrası elde edilen kek malzemesinin miktarının arttığı görülmüştür. Bu durum Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33, Şekil 3.34 ve Şekil 3.35’te verilen oksit içeriklerindeki değişimler ile birlikte değerlendirildiğinde, özellikle de Na_2O miktarındaki artıştan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ancak elde edilen bu sonucun net bir şekilde değerlendirilebilmesi için öncelikle malzeme karakterizasyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için

de XRD analizinin yapılması şarttır. Ayrıca alkali liç sonrası yapılacak yıkama işlemine ve genel olarak alkali liç parametrelerinin tekrardan değerlendirilmesi gerekmektedir.

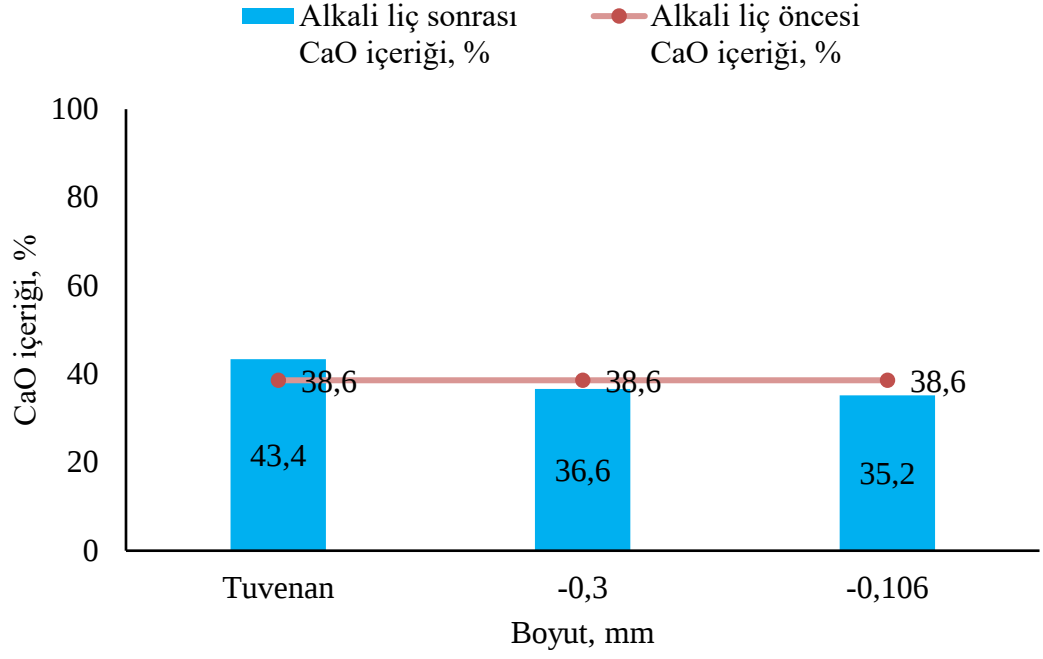
Alkali liç işlemi sonucunda tuvenan, -0,3 mm ve -0,106 mm boyutlarındaki malzemelere ait temel oksit içeriklerindeki değişimler sırasıyla Şekil 3.31, Şekil 3.32, Şekil 3.33, Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'te verilmiştir.



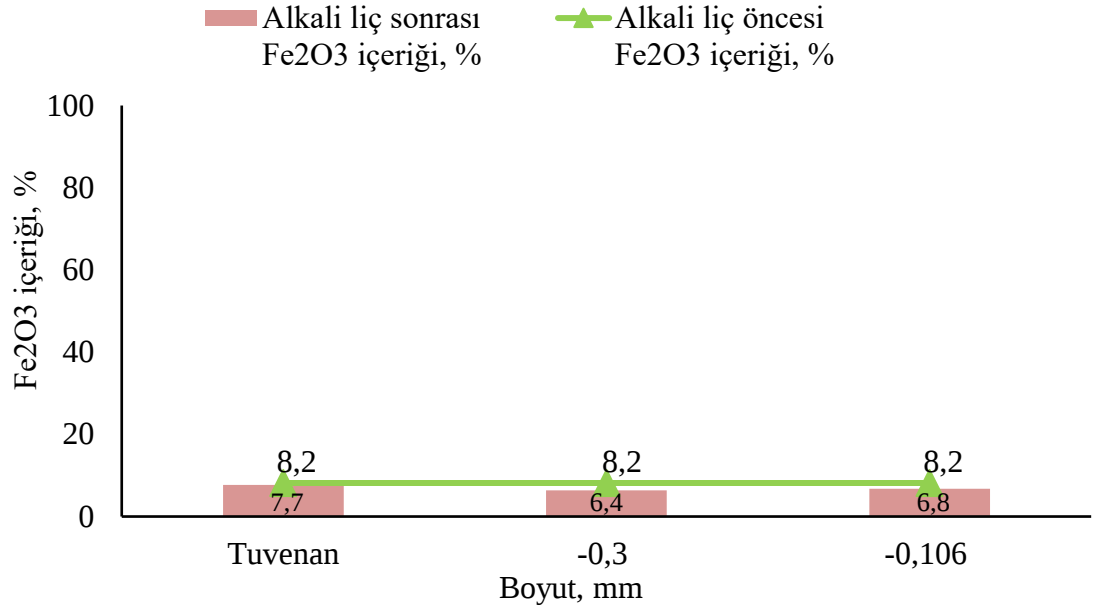
Şekil 3.31: Üç farklı boyutta alkali liç işlemi sonucu SiO₂ içeriğindeki değişim oranları.



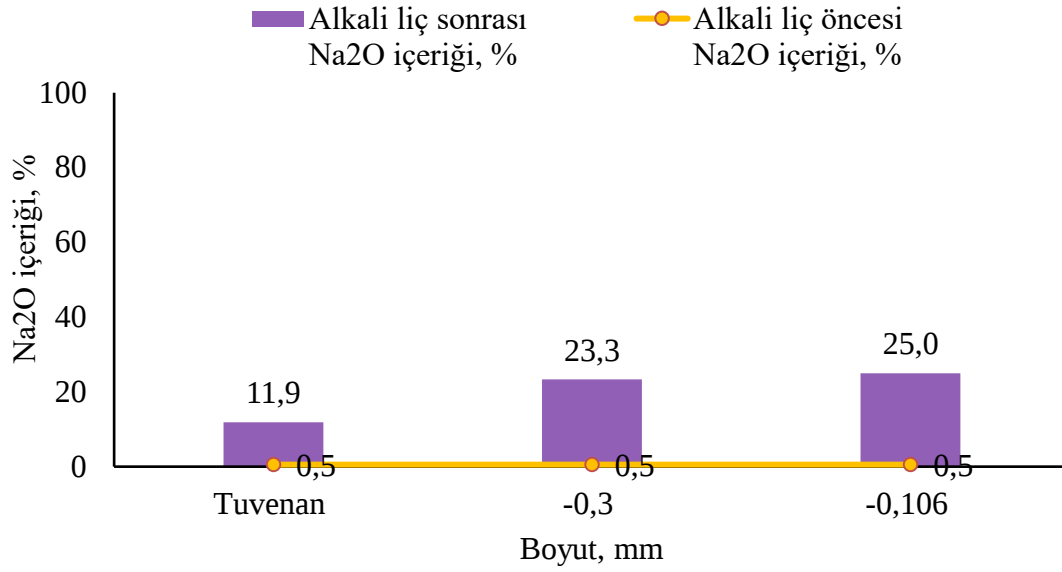
Şekil 3.32: Üç farklı boyutta alkali liç işlemi sonucu Al₂O₃ içeriğindeki değişim oranları.



Şekil 3.33: Üç farklı boyutta alkali liç işlemi sonucu CaO içeriğindeki değişim oranları.



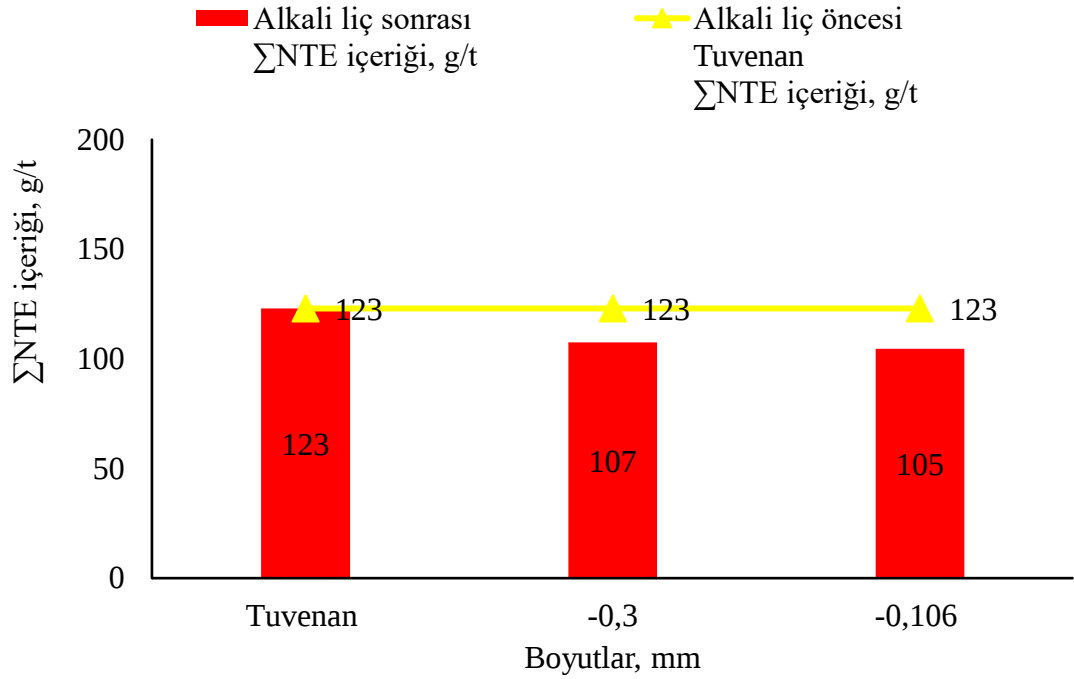
Şekil 3.34: Üç farklı boyutta alkali liç işlemi sonucu Fe₂O₃ içeriğindeki değişim oranları.



Şekil 3.35: Üç farklı boyutta alkali liç işlemi sonucu Na₂O içeriğindeki değişim oranları.

Genel olarak grafikler incelendiğinde tuvenan, -0,3 mm ve -0,106 mm boyutlarındaki numunelere uygulanan alkali liç işlemi sonucunda elde edilen kek ürünlerindeki oksit içeriklerinde bir miktar azalma olduğu görülmektedir. Ancak Na₂O içeriği için tam tersi bir durum söz konusudur. Alkali liç işlemi sırasında bazik ortamı sağlamak için kuvvetli bir baz olan NaOH kullanılmıştır. Kullanılan NaOH'ın çözünmeyerek kek ürününde kaldığı düşünülmektedir ve bu durumun Na₂O yüzdesini arttırdığı tahmin edilmektedir. Analiz sonuçlarına göre alkali liç işlemi sonrasında oksit içerikleri azalmış gibi görünse de sonuçlar Çizelge 3.18'deki verilerle değerlendirildiğinde, kek malzemesindeki miktar artışına bağlı olarak oksit içeriğinin arttığı tespit edilmiştir. Bu durumun anlaşılabilmesi için malzemenin XRD analiz sonucu gerekmektedir. Bu şekilde taban külünde bulunan bileşenlerin liç sonrası hangi formlara dönüştüğü tespit edilebilir.

Tuvenan, -0,3 mm ve -0,106 mm boyutlarındaki malzemelere uygulanan alkali liç işlemi sonucunda numunelerde elde edilen Σ NTE içeriği ve liç öncesi malzemedeki Σ NTE içeriğine ait değişim de Şekil 3.36'da gösterilmiştir.



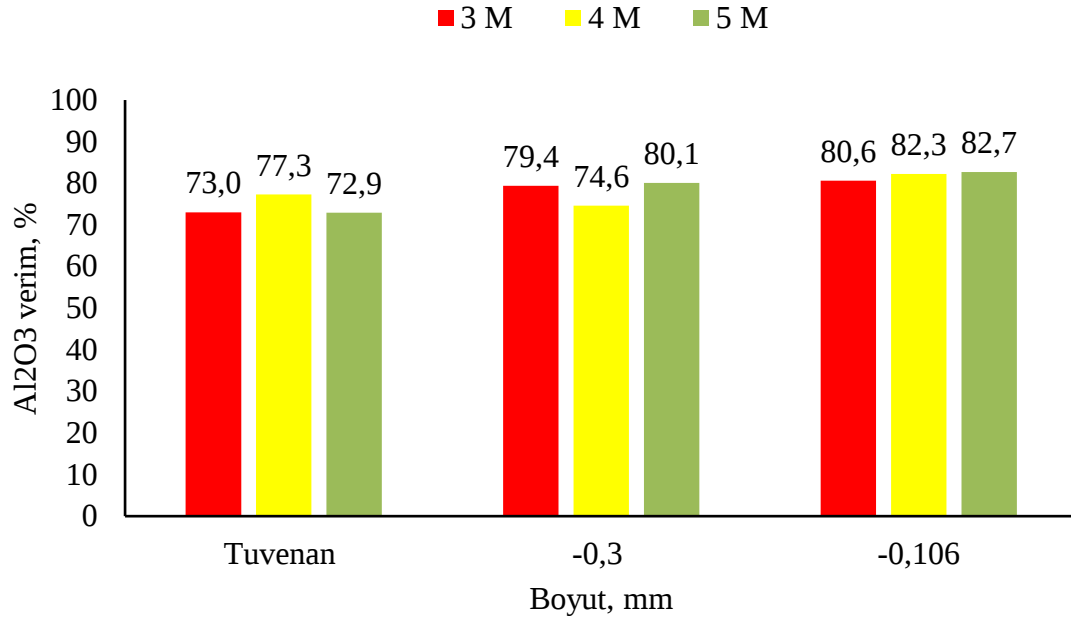
Şekil 3.36: Üç farklı boyutta alkali liç işlemi sonucu Σ NTE içeriğindeki değişim oranları.

Şekil 3.36’da verilen alkali liç işlemi öncesi ve sonrasına ait Σ NTE içerikleri incelendiğinde, liç sonrası Σ NTE içeriğinde kısmi bir azalma tespit edilmiştir. Ancak Σ NTE analiz sonuçlarına bakıldığında sonuçlar g/t cinsinden verilmektedir. Bu sonuçlar yüzde olarak hesap edilip liç öncesi ve sonrası oksit içeriklerinde yaşanan değişimle birlikte değerlendirildiğinde benzer bir durumun olduğu görülmektedir. Bu nedenle alkali liç deney prosedürünün tekrardan değerlendirilmesi gerekmektedir.

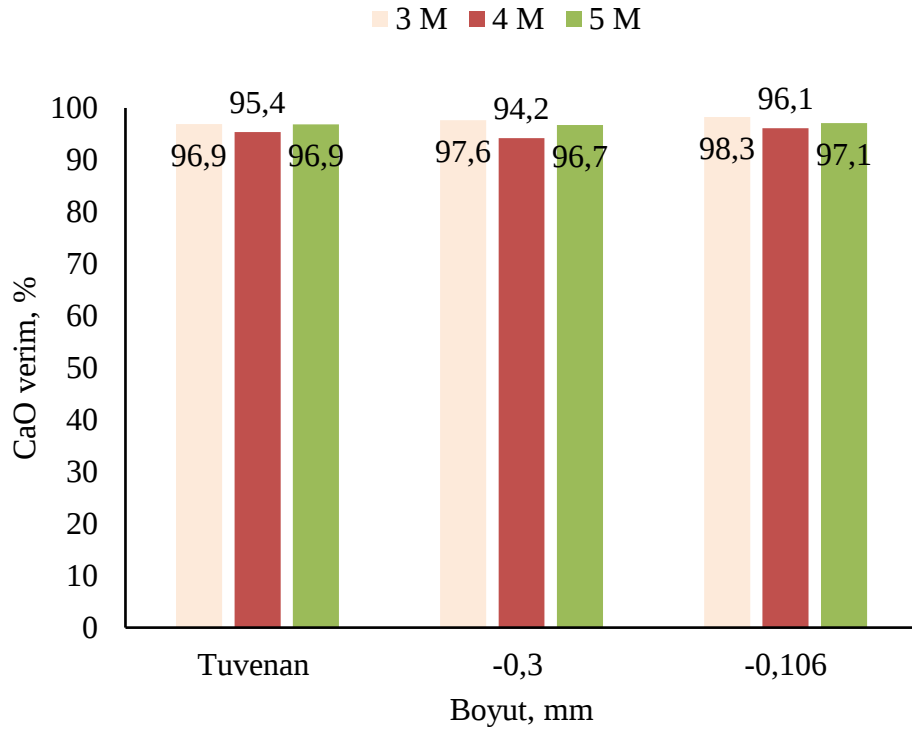
3.3.5.2 Asit liçi (HCl) deney sonuçları

Alkali ön işlem sonrasında tuvenan, -0,3 mm ve -0,106 mm boyutlarındaki filtre keklerine asit liçi yapılarak kek malzemesinde kalan NTE’lerin asit liçi çözeltisine alınması hedeflenmiştir.

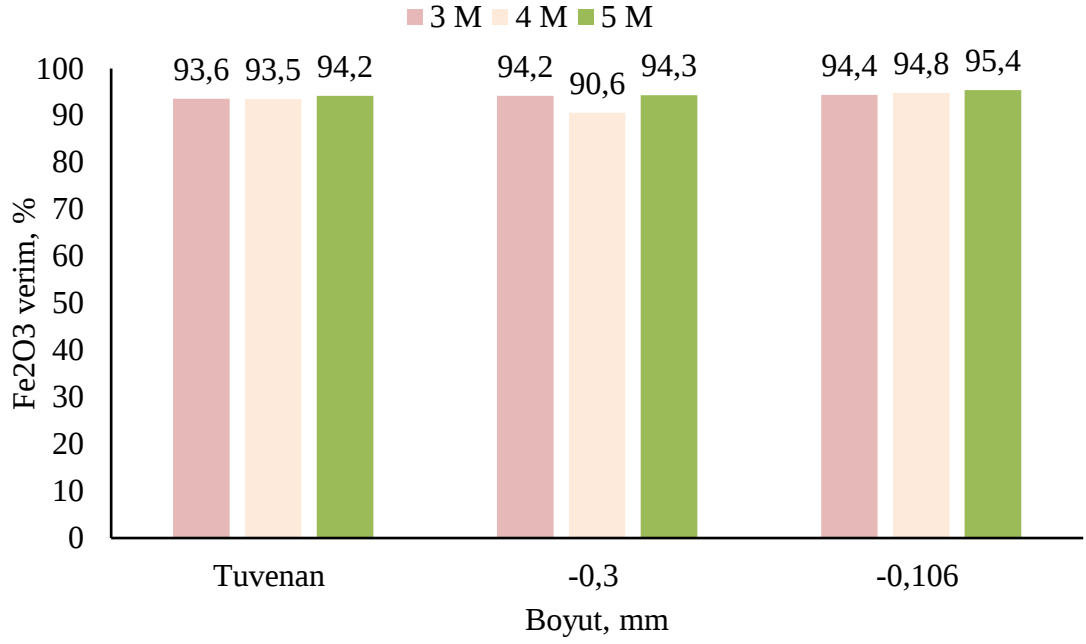
Asit liçi işlemi sonucunda tuvenan, -0,3 mm ve -0,106 mm boyutlarındaki numunelere ait liç çözeltisindeki temel oksit verimleri sırasıyla Şekil 3.37, Şekil 3.38, Şekil 3.39, ve Şekil 3.40’ta verilmiştir.



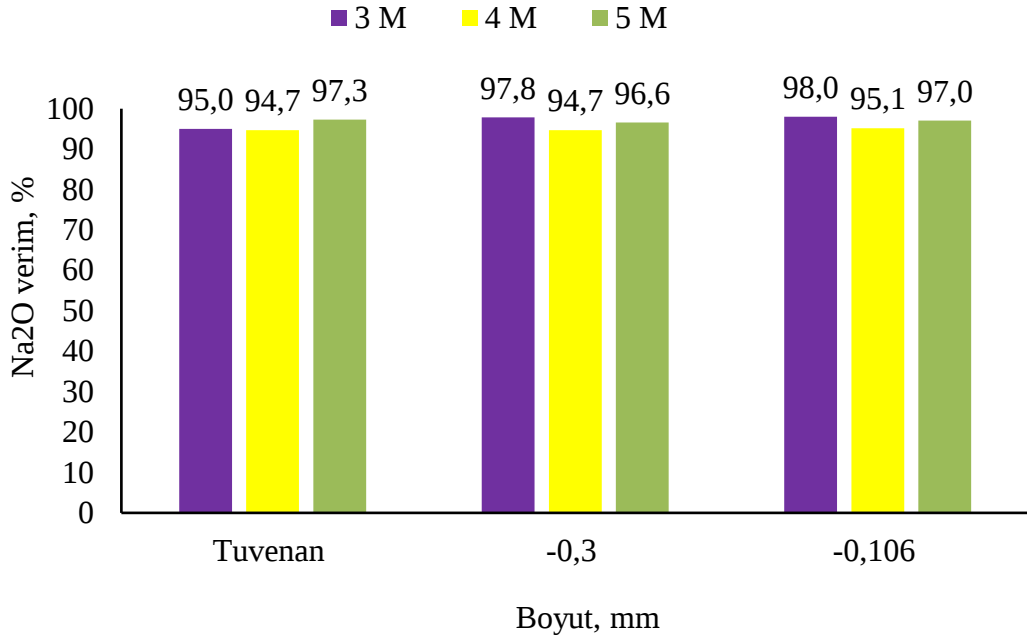
Şekil 3.37: Üç farklı boyutta uygulanan asit liçi çözeltisindeki Al_2O_3 verimi değişim oranları.



Şekil 3.38: Üç farklı boyutta uygulanan asit liçi çözeltisindeki CaO verimi değişim oranları.



Şekil 3.39: Üç farklı boyutta uygulanan asit liçi çözeltisindeki Fe₂O₃ verimi değişim oranları.

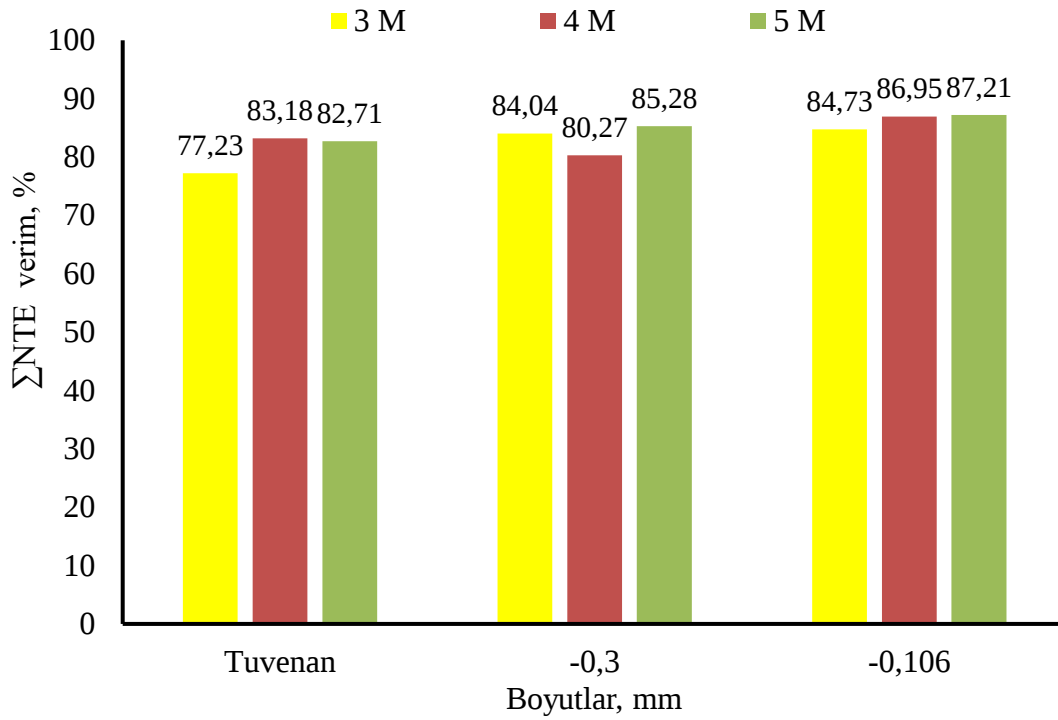


Şekil 3.40: Üç farklı boyutta uygulanan asit liçi çözeltisindeki Na₂O verimi değişim oranları.

Yukarıda verilen üç farklı boyutta uygulanan asit liçi çözeltisindeki temel oksitlerin verimleri incelendiğinde 3 mol/L, 4mol/L ve 5 mol/L asit konsantrasyonlarındaki verim değerlerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Oksitlerin önemli bir miktarının istenilenin aksine çözeltiye geçtiği görülmektedir. Bu durumun kuvvetli bir asit olan

HCl'nin filtre kekindeki hemen hemen tüm bileşenleri çözmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Farklı asit konsantrasyonlarında tuvenan, -0,3 mm ve -0,106 mm boyutlarındaki malzemelere uygulanan asit liçi sonucuna ait liç çözeltisindeki Σ NTE verimi Şekil 3.41'de gösterilmiştir.



Şekil 3.41: Üç farklı boyutta uygulanan asit liçi çözeltisindeki Σ NTE verimi değişim oranları.

Şekil 3.41'deki grafik incelendiğinde, 3 mol/L, 4 mol/L ve 5 mol/L HCl kullanılarak yapılan asit liçi sonucunda tuvenan malzeme için Σ NTE çözündürme verimi sırasıyla %77,2, %83,2 ve %82,7 olarak bulunmuştur. -0,3 mm boyutundaki malzeme ile yapılan asit çözündürme işlemi sonucunda Σ NTE çözündürme verimleri sırasıyla %84,0, %80,3 ve %85,3 olarak tespit edilmiştir. -0,106 mm boyutundaki malzemenin Σ NTE çözündürme verimleri ise sırasıyla %84,7, %87,0 ve %87,2'dir. Sonuç olarak, tane boyutunun küçülmesi ve artan asit konsantrasyonuna bağlı olarak Σ NTE çözündürme verimlerinde artış görülmektedir. En yüksek Σ NTE çözündürme verimine -0,106 mm boyutunda, 5 mol/L HCl kullanılarak ulaşılmıştır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında Manisa/Soma bölgesinde faaliyet gösteren Konya Şeker San. ve Tic. A.Ş tarafından işletilmekte olan Soma Termik Santrali'ne ait taban külü numunesinden NTE kazanım olanakları incelenmiştir. Bu amaçla fiziksel zenginleştirme ve kimyasal zenginleştirme yöntemleri kullanılmıştır. Fiziksel zenginleştirme deneyleri kapsamında özgül ağırlık farkına göre ayırım yapan jig, sarsıntılı masa ve santrifüj tipi ayırıcılar (MGS, Knelson) kullanılmıştır. Kimyasal zenginleştirme deneyleri için alkali liç ve asit liçi deneyleri uygulanmıştır.

Zenginleştirme deneyleri öncesinde belirli miktarda taban külü numunesi 1 mm ve 0,3 mm'lik elekler kullanılarak sınıflandırılmıştır. +1 mm boyutundaki malzeme ile jig deneyi, -1+0,3 mm boyut grubundaki malzeme ile sarsıntılı masa, -0,3 mm'deki malzeme ile santrifüj tipi ayırıcılar (MGS, Knelson) kullanılarak zenginleştirme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, zenginleştirme işlemlerinde boyutun etkisini araştırmak amacıyla 0,106 mm ve 0,038 mm altına öğütülen numuneler santrifüj ayırıcılara beslenmiştir. Fiziksel zenginleştirme deneyleri sonrasında, literatür verileri de dikkate alınarak, taban külü numunesine kimyasal zenginleştirme yöntemlerinden alkali liç ve asit liçi uygulanmıştır. Alkali liç deneylerinde sıcaklık 90°C, süre 4 saat, sıvı:kıatı oranı 8:1, karıştırma hızı 800 dev./dak. ve 5 mol/L NaOH olarak seçilmiştir. Asit liçi deneylerinde %37 saflıktaki HCl ile 3 mol/L, 4 mol/L ve 5 mol/L asit konsantrasyonlarında çözündürme deneyleri yapılmış olup, sıcaklık 90°C, liç süresi 3 saat, sıvı:kıatı oranı 10:1 ve karıştırma hızı 400 dev./dak. olarak seçilmiştir.

Bu tez kapsamında yürütölen çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- +1 mm boyutunda jig kullanılarak yapılan zenginleştirme deneyi sonucunda, ağır 1, ağır 2, araürün, hafif 1 ve hafif 2 olmak üzere toplamda beş ürün elde edilmiştir. En yüksek Σ NTE içeriğı hafif bir üründe 154 g/t olarak alınmıştır. Bu durum NTE'lerin özgül ağırlığı düşük olan malzeme ile hareket ettiğini işareret etmektedir.
- -1+0,3 mm boyutunda yapılan sarsıntılı masa deneyi sonucunda toplamda ağır ve hafif olmak üzere iki ürün elde edilmiştir. Ağırlıkça %47,6'ı oranında ağır bir ürün Σ NTE içeriğı 130 g/t olarak %46,5 kazanma verimi ile alınmıştır.

Ağırlıkça %52,4 oranında da hafif bir ürün Σ NTE içeriği 136 g/t olarak alınmıştır. Bu sonuçlara göre NTE'lerin tüm masa ürünlerinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Sarsıntılı masa deneyi ile bir NTE zenginleşmesinin olmadığı ve iri boyutta yapılan klasik gravite yöntemleri ile sınırlı bir başarı elde edileceği anlaşılmıştır.

- -0,3 mm boyutunda yapılan MGS deneyi sonucunda ağır, araürün ve hafif olmak üzere toplamda üç ürün elde edilmiştir. Ağırlıkça %30,6'ı oranında ağır bir ürün Σ NTE içeriği 187 g/t olarak %34,7 kazanma verimi ile elde edilmiştir. Bu boyutta yapılan MGS deneyi ile bir NTE zenginleşmesinin olmadığı belirlenmiştir.
- -0,106 mm boyutunda yapılan MGS deneyi sonucunda ağır1, ağır2, araürün ve hafif olmak üzere toplamda dört ürün elde edilmiştir. Ağırlıkça %30,5 oranında ağır1 ürünü Σ NTE içeriği 168 g/t olarak %34,8 kazanma verimi ile elde edilmiştir. Genel olarak bu boyutta da yapılan MGS deneyi ile bir NTE zenginleşmesi söz konusu değildir. MGS santrifüj tipi ayırıcısının NTE eldesi için sahip olduğu G kuvvetinin tek başına yeterli olmadığı belirlenmiş, çok daha yüksek G kuvvetlerine çıkabilen Knelson cihazı ile deneyler tamamlanmıştır.
- -0,3 mm boyutunda yapılan Knelson deneyi sonucunda ağır, araürün ve hafif olmak üzere toplamda üç ürün alınmıştır. Ağırlıkça % 36,6'ı oranında ağır bir ürün Σ NTE içeriği 187 g/t olmak üzere %41,0 kazanma verimi ile elde edilmiştir. Bu boyutta yapılan Knelson deneyinin NTE zenginleşmesi için yeterli olmadığı belirlenmiştir.
- -0,106 mm boyutunda yapılan Knelson deneyi sonucunda ağır, araürün ve hafif olmak üzere toplamda üç ürün elde edilmiştir. Ağırlıkça %7,0 oranında ağır bir Σ NTE içeriği 204 g/t olmak üzere %10,1 kazanma verimi ile alınmıştır. Bu boyutta Knelson ayırıcısı ile nispeten bir NTE zenginleşmesi olduğu tespit edilmiştir. MGS ve Knelson santrifüj tipi ayırıcıları kullanılarak yapılan zenginleştirme deneyleri sonucuna göre, serbestleşmenin ve G kuvvetinin arttığı durumlarda daha etkin bir ayırmanın olduğu görülmüştür. Bu veriler dikkate alınarak Knelson cihazı ile -0,038 mm boyutunda da bir zenginleştirme deneyinin yapılmasına karar verilmiştir.
- -0,038 mm boyutunda yapılan Knelson deneyi sonucuna göre %6,0 oranında ağır bir ürün Σ NTE içeriği 158 g/t olmak üzere %6,3 kazanma verimi ile elde

edilmiştir. -0,038 mm boyutunda serbestleşmenin artmasına rağmen NTE'lerin zenginleşemediği görülmektedir. Taban külü numunesinin ısıtma işlemi görmüş bir malzeme olmasından kaynaklı yapısının değiştiği düşünülmekte olup içeriğindeki NTE'lerin de bundan dolayı farklı hareket ettiği tahmin edilmektedir.

- Silisli yapıda kapanım halinde olarak bulunan NTE'lerin asit liçindeki çözünürlüğü arttırmak için ilk aşamada alkali liç deneyi yapılmış, daha sonra filtre keki alınarak asit liçine tabi tutulmuştur. 3 mol/L, 4 mol/L ve 5 mol/L HCl kullanılarak yapılan asit liçi sonucunda tuvenan malzeme için Σ NTE çözündürme verimi sırasıyla %77,2, %83,2 ve %82,7 olarak bulunmuştur. -0,3 mm boyutundaki malzeme ile yapılan asit çözündürme işlemi sonucunda Σ NTE çözündürme verimleri sırasıyla %84,0, %80,3 ve %85,3 olarak tespit edilmiştir. -0,106 mm boyutundaki malzemenin Σ NTE çözündürme verimleri ise sırasıyla %84,7, %87,0 ve %87,2'dir. Sonuç olarak, en yüksek Σ NTE çözündürme verimine -0,106 mm boyutunda 5 mol/L HCl kullanılarak ulaşılmıştır. En uygun asit liçi koşulları sıcaklık 90 °C, süre 3 saat, sıvı:kıta oranı 10:1 ve karıştırma hızı 400 dev./dak. olarak belirlenmiştir.
- Soma Termik Santrali'ne ait taban külü numunesi ile Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü'nde sürdürülmekte olan proje kapsamında yapılacak kimyasal zenginleştirme deneylerinde belirlenecek optimum koşullarda alkali liç deneyinin yapılması ve sonrasında farklı asit türleri (H₂SO₄ ve HNO₃ asitleri) ile asit liçi deneylerine devam edilmesi planlanmıştır. Bu şekilde asit türlerinin de liç verimine olan katkısı incelenmiş olacaktır. Asit konsantrasyon miktarı olarak 1 mol/L ve 2 mol/L'de de asit liçi deneylerinin yapılması kararlaştırılmıştır. Böylece optimum asit liçi deney koşulları için genel asit konsantrasyon miktarı belirlenmiş olacaktır.
- Ayrıca alkali ön işlem olarak alkali liç dışında alkali kavurma gibi termal bir ön işlemin de yapılması ve asit liçine olan katkısının belirlenmesi hedeflenmiştir.



KAYNAKLAR

- Abaka-Wood, G. B., Quast, K., Zanin, M., Addai-Mensah, J., & Skinner, W. (2019).** A study of the feasibility of upgrading rare earth elements minerals from iron-oxide-silicate rich tailings using Knelson concentrator and Wilfley shaking table. *Powder Technology*, 344, 897-913.
- Acarkan, N., & Önal, G. (2014).** Özgül ağırlık farkı (gravite) ile zenginleştirme, Cevher Hazırlama El Kitabı. İstanbul: Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı, 127-160.
- Alan, H., Ateşoğulları, M., Çağlan, D., İlgün, F., Konuk, R., & Uytun H. (2014).** *Manisa- Soma Eynez Karanlıkdere Mevkii Kapalı Ocak Kömür Madeni İşletmesi İş Cinayeti/İş Kazası Raporu*. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.
- Anderson, C. D., Taylor, P. R., & Anderson, C. G. (2016).** Rare earth flotation fundamentals: A review. In *IMPC 2016 Proceedings of the XXVIII International Mineral Processing Congress*.
- Arellano Ruiz, V. C., Parhi, P. K., Lee, J. Y., & Jyothi, R. K. (2021).** Investigation on Extraction and Recovery of Rare Earth Elements from Coal Combustion Products. *Clean Coal Technologies: Beneficiation, Utilization, Transport Phenomena and Prospective*, 311-337.
- Ateşok, G. (2017).** Kömür hazırlama ve teknolojisi. İstanbul: Yurt Madenciliği Geliştirme Vakfı, 1-15.
- Blissett, R. S., Smalley, N., & Rowson, N. A. (2014).** An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content. *Fuel*, 119, 236-239.
- Celep, O. (2005).** *Mastra ve Kaletaş (Gümüşhane) cevherlerinden altın kazanımı, (Yüksek Lisans Tezi)*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Celep, O., Alp, İ., Deveci, H., Vıcıl, M., & Yılmaz, T. (2006).** Knelson santrifüj gravite ayırıcısıyla Mastra (Gümüşhane) cevherinden altın kazanımı. *İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, 19(2), 175-182.
- Chan, B. S. K., Mozley, R. H., & Childs, G. J. C. (1991).** Extended trials with the high tonnage multi-gravity separator. *Minerals Engineering*, 4(3-4), 489-496.
- Cornelius, M. L. U., Ameh, A. E., Eze, C. P., Fatoba, O., Sartbaeva, A., & Petrik, L. F. (2021).** The behaviour of rare earth elements from South African coal fly ash during enrichment processes: Wet, magnetic separation and zeolitisation. *Minerals*, 11(9), 950.

- Dinç, N. İ., Ulucan, T., & Burat, F. (2021).** Atık Kapsamında Bulunan Kömür Yıkama ve Yakma Ürünlerinden Nadir Toprak Elementlerinin Kazanımı. *Nadir Toprak Elementleri Ve Atıklardan Geri Kazanımı Çalıştayı* (s. 15-21). İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi yayınları.
- Dushyantha, N., Batapola, N., Ilankoon, I. M. S. K., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeysinghe, B., & Dissanayake, K. (2020).** The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. *Ore Geology Reviews*, 122, 103521.
- Enkhtaivan, N. (2013).** *Termik Santral Küllerinin İz Element İçeriklerinin Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi)*. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Eterigho-Ikelegbe, O., Harrar, H., & Bada, S. (2021).** Rare earth elements from coal and coal discard—A review. *Minerals Engineering*, 173, 107187.
- Gasparotto, J., & Martinello, K. D. B. (2021).** Coal as an energy source and its impacts on human health. *Energy Geoscience*, 2(2), 113-120.
- Görhan, Z. (2009).** *İleri Teknoloji Elementlerinin (Ga-Ge-Se-Te) Bazı Kömür Yataklarındaki Konsantrasyonlarının Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi)*. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Grasso, V. B. (2013).** Rare earth elements in national defense: Background, oversight issues, and options for Congress. Library Of Congress Washington DC Congressional Research Service.
- Gupta, C. K., & Krishnamurthy, N. (1992).** Extractive metallurgy of rare earths. *International materials reviews*, 37(1), 197-248.
- Gupta, T., Ghosh, T., Akdogan, G., & Bandopadhyay, S. (2019).** Maximizing REE enrichment by froth flotation of Alaskan coal using box-behnen design. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 36, 571-578.
- Gültekin, A. H. (1998).** Nadir metal yatakları jeolojisi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 21(1), 27-41.
- Honaker, R., Groppo, J., Bhagavatula, A., Rezaee, M., & Zhang, W. (2016).** Recovery of rare earth minerals and elements from coal and coal byproducts. In *International Conference of Coal Preparation, Louisville, Kentucky*, 25-27.
- Hower, J. C., Groppo, J. G., Joshi, P., Dai, S., Moecher, D. P., & Johnston, M. N. (2013).** Location of cerium in coal-combustion fly ashes: implications for recovery of lanthanides. *Coal Combustion and Gasification Products*, 5(4), 73-78.
- Huang, Q., Noble, A., Herbst, J., & Honaker, R. (2018).** Liberation and release of rare earth minerals from Middle Kittanning, Fire Clay, and West Kentucky No. 13 coal sources. *Powder Technology*, 332, 242-252.
- Jordens, A., Cheng, Y. P., & Waters, K. E. (2013).** A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 41, 97-114.
- Jyothi, R. K., & Parhi, P. K. (Eds.). (2021).** *Clean coal technologies: Beneficiation, utilization, transport phenomena and prospective*. Springer Nature.

- Karayigit, A. I., Gayer, R. A., Querol, X., & Onacak, T. (2000).** Contents of major and trace elements in feed coals from Turkish coal-fired power plants. *International Journal of Coal Geology*, 44(2), 169-184.
- Khanchi, A. R., Sedighi, H., Ansar, S., & Fasihi, J. (2014).** Preconcentration of rare earth elements from Iranian monazite ore by spiral separator using multi-response optimization method. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(1), 117-121.
- Kırdım, Ö. (2006).** *Seyitömer (Kütahya-Türkiye) Termik Santralında Yanan Kömürlerin ve Oluşan Katı Atıkların Mineralojisi ve Petrografisi (Yüksek Lisans Tezi)*. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kiser, M.J. (2015).** New methodologies for the characterization and separation of rare earth elements present in coal. *Doktora Tezi*, Virginia Tech.
- Laudal, D. A., Benson, S. A., Addleman, R. S., & Palo, D. (2018).** Leaching behavior of rare earth elements in Fort Union lignite coals of North America. *International Journal of Coal Geology*, 191, 112-124.
- Lin, R., Howard, B. H., Roth, E. A., Bank, T. L., Granite, E. J., & Soong, Y. (2017).** Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations. *Fuel*, 200, 506-520.
- Middleton, A., Park, D. M., Jiao, Y., & Hsu-Kim, H. (2020).** Major element composition controls rare earth element solubility during leaching of coal fly ash and coal by-products. *International Journal of Coal Geology*, 227, 103532.
- Moghise, M., Pourrahim, M., Rezai, B., Gharabaghi, M., (2016).** Concentration and recycling of rare earth elements (REEs) from iron mine waste using a combination of physical separation methods. *Int. J. Min. Environ.* 7, 195–203.
- MTA, (2017).** Dünyada ve Türkiye’de nadir toprak elementleri (nte). Maden Serisi: 5, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara.
- Özbayoğlu, G., & Atalay, M. Ü. (2000).** Beneficiation of bastnaesite by a multi-gravity separator. *Journal of alloys and compounds*, 303, 520-523.
- Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M. R., Hussin, M. W., & Khankhaje, E. (2016).** Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. *Construction and Building Materials*, 116, 15-24.
- Sastri, V. R., Perumareddi, J. R., Rao, V. R., Rayudu, G. V. S., & Bunzli, J. C. (2003).** *Modern aspects of rare earths and their complexes*, Elsevier.
- Singh, M., & Siddique, R. (2013).** Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. *Resources, conservation and recycling*, 72, 20-32.
- Sinnott, R., & Towler, G. (2020).** Chapter 10-equipment selection, specification and design. *Chemical Engineering Design*, 525-644.

- Şen, P., Kuşçu, E., Ak, S. (2012).** Nadir toprak elementler, özellikleri, cevherleşmeleri ve Türkiye nadir toprak element potansiyeli. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 13, 1-8. Erişim adresi: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/dogal-kaynaklar-ve-ekonomi-bulteni>.
- Tanaydın, M. K. (2021).** Hidrometalurjik yöntemlerle nadir toprak elementlerinin kazanılması. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 7(2), 288-304.
- Trinh, H. B., Kim, S., & Lee, J. (2022).** Recovery of rare earth elements from coal fly ash using enrichment by sodium hydroxide leaching and dissolution by hydrochloric acid. *Geosystem Engineering*, 25(1-2), 53-62.
- Türkmenoğlu, M. (2010).** Uçucu Küllerin Liç Karakteristiklerinin ve Çevreye Etkilerinin Araştırılması, *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24 (2), 30-39.
- U.S. Geological Survey, 2022.** Mineral Commodity Summaries 2022. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Url-1**<<https://www.mta.gov.tr/v3.0/muze/yeralti-kaynaklari>>, erişim tarihi 9.05.2023
- Url-2** <<https://www.enerji.gov.tr/File>>, erişim tarihi 19.05.2023.
- Url-3** <<https://www.mta.gov.tr/v3.0/arastirmalar/komur-arama-arastirmalari>>, erişim tarihi 29.01.2023.
- Url-4** < <http://somatermik.com.tr/Tr/kurumsal> >, erişim tarihi 26.04.2023.
- Url-5** < <https://www.astm.org/d6357-21b.html>>, erişim tarihi 17.05.2023.
- Wang, Z., Dai, S., Zou, J., French, D., & Graham, I. T. (2019).** Rare earth elements and yttrium in coal ash from the Luzhou power plant in Sichuan, Southwest China: Concentration, characterization and optimized extraction. *International Journal of Coal Geology*, 203, 1-14.
- Wen, Z., Zhou, C., Pan, J., Cao, S., Hu, T., Ji, W., & Nie, T. (2022).** Recovery of rare-earth elements from coal fly ash via enhanced leaching. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42(7), 2041-2055.
- Yasuo, K., & Masaharu, K. (2006).** Rare earth minerals and resources in the world. *Journal of Alloys and Compounds*, 408, 1339-1343.
- Yıldız, N. (2014).** Zenginleştirme, *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme*, 1, 381. Ankara.
- Yıldız, N. (2016).** Nadir toprak elementleri. Ankara: Researchgate.
- Zhang, W., Honaker, R., & Groppo, J. (2017).** Concentration of rare earth minerals from coal by froth flotation. *Minerals & Metallurgical Processing*, 34, 132-137.
- Zhang, W., Noble, A., Yang, X., & Honaker, R. (2020).** A comprehensive review of rare earth elements recovery from coal-related materials. *Minerals*, 10(5), 451.

- Zhang, W., Rezaee, M., Bhagavatula, A., Li, Y., Groppo, J., & Honaker, R. (2015).** A review of the occurrence and promising recovery methods of rare earth elements from coal and coal by-products. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 35(6), 295-330.
- Zhanheng, Chen. (2011).** Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. *Journal of rare earths*, 29(1), 1-6.
- Zhou, B., Li, Z., & Chen, C. (2017).** Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals*, 7(11), 203.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad

: Tülin Ulucan

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2023, İstanbul Teknik Üniversitesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı, Cevher Hazırlama Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu (TENMAK), Nadir Toprak Elementleri Araştırma Enstitüsü (NATEN) / Araştırmacı (Kasım 2021-Halen)
- Gümüştaş Madencilik ve Ticaret A.Ş. / Stajyer (Temmuz 2019-Ağustos 2019)
- Samsun Eti Bakır İşletmeleri / Stajyer (Temmuz 2018-Ağustos 2018)

YAYINLAR:

Uluslararası Bildiriler

- Ulucan, T., Dinç, N.İ., Pural Y.E., Yüce A.E., Boylu F., Burat F., 2022 “Investigation and Characterization of Soma Thermal Power Plant Bottom Ash in Terms of REEs Potential” 17th International Mineral Processing Symposium, 15-17 December, İstanbul, Türkiye, pp 883-890.
- Ulucan, T., Dinç, N.İ., Serdengeçti, T., Özer, M., Burat, F., 2019 “Precious Metal Recovery From Jewelry Slags By Physical Concentration Methods” XVIII. Balkan Mineral Processing Congress, May 23-26, Durres, Albania, pp 101-111.

Ulusal Makaleler

- Ulucan, T., Özer, M., Baştürkcü, H., Burat, F., 2021. Kuyumculuk Kökenli Artıklardan Altın ve Gümüşün Geri Kazanımı, Bilimsel Madencilik Dergisi, 60 (1), 51-61. ISSN: 2564-7024.

Ulusal Bildiriler

- Ulucan, T, Burat, F., 2019 “Kuyumcu Cüruflarındaki Değerli Metallerin Fiziksel Zenginleştirme Yöntemleri ile Geri Kazanımı” YER 2019, İTÜ Maden Fakültesi
- Yerbilimlerinde Öğrenci Bitirme Tasarım Projeleri Sempozyumu, Temmuz, İstanbul, ISBN:978-975-561-508-0, Sayfa: 339-342.

Katıldığı Sempozyum ve Kongreler

- 17th International Mineral Processing Symposium (IMPS 2022),15-17 Aralık 2022, İstanbul, Türkiye.

- İTÜ Maden Fakóltesi Öğrenci Bitirme Tasarım ve Projeleri Sempozyumu Sergisi (YER 2019).
- International Mineral Processing Conference Eurasia (IMPC-EURASIA), 31 Ekim-02 Kasım 2019, Antalya, Türkiye.
- XVIIth Balkan Mineral Processing Congress (BMPC 2017), 1-03 Kasım 2017, Antalya, Türkiye.

