

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK MODÜLLÜ METALURJİK BOKSİT CEVHERLERİNİN ZENGİNLEŞTİRME
OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

RAMAZAN GÖK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2019

Tezin Başlığı : Düşük Modüllü Metalurjik Boksit Cevherlerinin Zenginleştirme
Olanaklarının Araştırılması

Tezi Hazırlayan : Ramazan GÖK

Sınav Tarihi : 12 Haziran 2019

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Maden Mühendisliği Ana Bilim
Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Mustafa BİRİNCİ**
İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Hikmet SİS
İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Erol KAYA
Dokuz Eylül Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Düşük Modüllü Metalurjik Boksit Cevherlerinin Zenginleştirme Olanaklarının Araştırılması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım tüm kaynakların, hem metin içinde hem de kaynaklar bölümünde yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.



Ramazan GÖK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÜŞÜK MODÜLLÜ METALURJİK BOKSİT CEVHERLERİNİN ZENGİNLEŞTİRME OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

Ramazan GÖK

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

101+x sayfa

2019

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa BİRİNCİ

Günümüzde ticari alümina (ve alüminyum) üretiminin neredeyse tamamı hammadde kaynağı olarak boksit cevherinin kullanıldığı Bayer prosesi ile karşılanmaktadır. Bununla birlikte boksitlerdeki safsızlıkların türü ve içeriği (özellikle silisli türler) Bayer prosesi için kritik öneme sahiptir. Çünkü yüksek orandaki silisli safsızlıklar proses üzerinde birtakım teknik sorunlara yol açmakta ve ciddi boyutlarda ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bundan dolayı cevherdeki alümina miktarının silis miktarına oranı (ki Al_2O_3/SiO_2 şeklinde formüle edilmekte ve modül olarak bilinmektedir), Bayer prosesinin etkin ve ekonomik uygulanabilirliği üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasında, Doğanlı-Mortaş (Seydişehir/Konya) açık işletme sahasından temin edilen boksit cevheri kullanılmıştır. Tüvenan cevherin %57,33 Al_2O_3 ve %9,01 SiO_2 tenörüne sahip olduğu; modül değerlerinin ise 6,36 olduğu belirlenmiştir. Nispeten yüksek silis içeriğinden dolayı Bayer prosesine doğrudan doğruya beslenemeyecek durumdaki cevherin silis oranını düşürmek amacıyla köpük flotasyonu denemeleri gerçekleştirilmiştir. Farklı tane boylarına öğütülmüş cevher numuneleri üzerinde gerçekleştirilen flotasyon deneyleri sonucunda, %60,02 Al_2O_3 içerikli bir boksit konsantresi %42,87 verimle kazanılabilmektedir. Aynı konsantrenin modül değeri 8,54 olarak bulunmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Bayer prosesi, boksit, modül, silis uzaklaştırma, ters flotasyon.

ABSTRACT

M.S. Thesis

BENEFICATION OF METALLURGICAL BAUXITE ORES WITH LOW MODULE

Ramazan GÖK

İnönü University
Graduate School of Naturel and Applied Science
Department of Mining Engineering

101+x pages

2019

Supervisor: Asst. Prof. Mustafa BİRİNCİ

Almost all of the commercial alumina (and aluminum) production is obtained by Bayer process which uses bauxite as raw material. However, the form and content of impurities such as silicate minerals in bauxite ores are critical for Bayer process. Because the high silica content based on siliceous impurities causes some technical problems and serious economic losses on Bayer process. Therefore, the ratio of available alumina to reactive silica (A/S), which is formulated as $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ and is defined as the module, plays a significative role on the economic viability of Bayer process.

In this thesis, bauxite ore obtained from Doğankuzu-Mortaş (Seydişehir / Konya) open-pit bauxite mine was used as experimental material. chemical analysis showed that the raw ore contains 57.33% Al_2O_3 , 9.01% SiO_2 and other constituents; module values were found to be 6.36. Froth flotation experiments were performed to reduce the silica content of bauxite ore that could not be fed directly to the Bayer process due to it is relatively high silica content. As a result of the flotation experiments carried out on the ore samples milled to various particle size, a bauxite concentrate with a grade of Al_2O_3 60.02% could be obtained with recovery of Al_2O_3 42.87%. The module value of the same concentrate was determined as 8.54.

KEYWORDS: Bayer process, bauxite, module, silica removal, reverse flotation.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın seçiminde, deneysel düzenin hazırlanması, gerçekleşmesi, takibi, başlangıç maddelerin temin edilmesi, planlanması ve yürütülmesinde öneri ve desteğini esirgemedi beni her zaman yönlendiren, bilgi ve tecrübeleriyle bana ışık tutan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mustafa BİRİNCİ'ye;

Yüksek lisans tez sınav jürimde yer alma nezaketini göstererek katkılarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Hikmet SİS'e, Prof. Dr. Erol KAYA'ya ve yedek jüri üyeleri Dr. Öğr. Üyesi Mustafa BOYRAZLI ve Doç. Dr. Didem SARICI'ya teşekkür ederim.

Beni Laboratuvar çalışmalarımın başından sonuna kadar motive edip, yardımlarıyla destekleyen Ayşegül AKTAŞ, Ceylan YARLUĞKAL, Cem AYGÜL, Merve BAĞLIOĞLU, Nilgün KIZILKAYA ve Tufan KIYAK'a;

Her konuda tereddüt etmeden gerek ders ve ders dışı yardımlarından dolayı sayın Arş. Grv. Engin ÖZDEMİR'e;

2016/97 No'lu proje kapsamında desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne;

Tez çalışmasında kullanılan boksit cevherini temin eden, kimyasal analizlerin yapılmasını sağlayan, Bayer prosesi ile ilgili kurumsal bilgi ve tecrübelerini bizlerle paylaşan ETİ Alüminyum A.Ş. Yetkililerine, Kalite-Kontrol Çalışanlarına, Ar-Ge Müdürlüğü Personeline, özellikle, Burak ÖZEN ve Meral BAYGÜL'e;

Hayatımın her aşamasında yanımda olan ve desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen Sevgili Aileme;

Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç	7
1.2. Kapsam.....	7
2. KURAMSAL TEMELLER.....	8
2.1. Alüminyumlu Mineraller ve Boksit	8
2.2. Boksitlerin Sınıflandırılması	10
2.2.1. Oluşum şekillerine göre boksitler	10
2.2.2. Mineralojik bileşiklerine göre boksitler	11
2.2.3. Silis ve demir içeriklerine göre boksitler	15
2.2.4. Kullanım alanlarına göre boksitler	15
2.3. Boksit Cevherlerindeki Safsızlıklar ve Etkileri.....	16
2.4. Türkiye’de Boksit Yatakları ve Özellikleri	19
2.4.1. Seydişehir (Konya) bölgesi boksit yatakları	24
2.5. Türkiye’de Alümina ve Birincil Alüminyum Üretimi	26
2.6. Bayer Prosesiyle Boksit Cevherlerinden Alümina Üretimi	29
2.7. Yüksek Silisli Cevherlerin Bayer Prosesine Etkileri (Silis Sorunu)	34
2.8. Boksit Cevherinden Fiziksel Zenginleştirme Yöntemiyle Silis Uzaklaştırma	39
2.9. Boksit Cevherinden Flotasyonla Silis Uzaklaştırma	47
2.9.1. Flotasyon ve mekanizması	47
2.9.2. Boksit cevherlerinin flotasyonu	50
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	56

3.1.	Cevher Numunesi	56
3.2.	Kullanılan Kimyasallar	57
3.3.	Kullanılan Cihazlar ve Aletler.....	58
3.4.	Yöntem	59
3.4.1.	Boksit cevherinin hazırlanması	59
3.4.2.	Aşındırma-yıkama.....	63
3.4.3.	Flotasyon deneyleri	64
3.4.4.	Flotasyon deneyleri	64
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	67
4.1.	Kırılmış ve Öğütülmüş Cevherin Analizi.....	67
4.2.	Aşındırma-Yıkama İşlemlerden Geçirilmiş Cevherin Analizi.....	70
4.3.	Farklı Tane Boylarında Yapılan Flotasyon Deney Sonuçları	73
4.3.1.	212 µm tane boyutu altına öğütülmüş cevherin flotasyonu	73
4.3.2.	106 µm tane boyutu altına öğütülmüş cevherin flotasyonu	84
4.3.3.	75 µm tane boyutu altına öğütülmüş cevherin flotasyonu	85
4.3.4.	53 µm tane boyutu altına öğütülmüş cevherin flotasyonu	87
4.4.	Flotasyon sonuçlarının özeti.....	89
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
5.1.	Sonuç	90
5.2.	Öneriler.....	90
6.	KAYNAKLAR.....	92
	ÖZGEÇMİŞ.....	100
	TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR.....	101

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Başlıca boksit mineralleri ve bazı tipik boksit cevher örnekleri.....	13
Şekil 2.2	Dünyada büyük boksit rezervlerine sahip ilk on ülke.....	20
Şekil 2.3	Türkiye'nin önemli boksit yatakları.....	20
Şekil 2.4	Türkiye'de bulunan boksit yatakları ve Seydişehir-Akseki boksit sahası.....	24
Şekil 2.5	ETİ Alüminyum AŞ'ye ait bir görüntü.....	29
Şekil 2.6	Bayer prosesi genel akım şeması.....	30
Şekil 2.7	Isı eşanjörünün tüp duvarlarında meydana gelen kabuklaşma.....	36
Şekil 2.8	Weipa boksit zenginleştirme tesisine ait basitleştirilmiş akım şeması...	43
Şekil 2.9	Flotasyonun oluşum mekanizması ve kabarcık-tanecik bağlarının oluşturulması.....	47
Şekil 2.10	Diyaspor yüzeyine adsorbe edilmiş NHOD'nın şematik görünümü.....	51
Şekil 2.11	DDA (a) ve DTAC (b) toplayıcılarının yapısı ve negatif yüklü minerallerin yüzeyindeki şematik adsorpsiyonu mekanizması.....	53
Şekil 2.12	Dodesilamin'in kaolinit yüzeyine adsorbsiyonu.....	54
Şekil 2.13	Dodesilamin kümesinin boksit içerisindeki kaolinit yüzeyine adsorbsiyonu.....	54
Şekil 3.1	Boksit örneğinin XRD grafiği.....	56
Şekil 3.2	Zenginleştirme işlemlerinde kullanılan boksit cevherinin hazırlanmasına ilişkin boyut küçültme akım şeması.....	60
Şekil 3.3	Boyut küçültme ve örnek azaltma ekipmanları.....	61
Şekil 3.4	Flotasyon beslemelerine ait kümülatif elek altı eğrileri.....	62
Şekil 3.5	Aşındırılmalı-yıkama deney düzeneği ve aşındırma koşulları.....	63
Şekil 3.6	Flotasyon işlemi genel akım şeması.....	65
Şekil 3.7	Flotasyon deney düzeneği ve flotasyon ürünleri.....	66
Şekil 4.1	CTAB miktarının verim ve modül üzerindeki etkisi.....	74
Şekil 4.2	Toplayıcı miktarının verim ve modül oranına etkisi.....	76
Şekil 4.3	pH değişiminin verim ve modül üzerindeki etkisi.....	78
Şekil 4.4	pH ortamının verim ve modül oranına etkisi.....	80
Şekil 4.5	Bastırıcı miktarının verim ve modül oranına etkisi.....	82
Şekil 4.6	DDA varlığında, nişasta miktarının verim ve modül oranına etkisi.....	83

Şekil 4.7	DDA ve CTAB ile -106 µm tane boyutundaki cevherin DDA ve CTAB varlığında flotasyon ile elde edilen ürünlerin Al ₂ O ₃ tenör, verim ve modül değişimi	85
Şekil 4.8	DDA ve CTAB ile -75 µm tane boyutundaki cevherin DDA ve CTAB varlığında flotasyon ile elde edilen ürünlerin Al ₂ O ₃ tenör, verim ve modül değişimi	87
Şekil 4.9	DDA ve CTAB ile -53 µm tane boyutundaki cevherin DDA ve CTAB varlığında flotasyon ile elde edilen ürünlerin Al ₂ O ₃ tenör, verim ve modül değişimi	88



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Alümina/alüminyum üretiminde değerlendirilen ve değerlendirme potansiyeli bulunan bazı alüminyum içeren minareller	9
Çizelge 2.2. Boksitlerin sınıflandırılması	10
Çizelge 2.3. Boksit mineralleri ve bazı mineralojik özellikleri	12
Çizelge 2.4. Modül oranı ve Fe_2O_3 tenörüne göre boksitler	15
Çizelge 2.5. Kullanım alanlarına göre boksit spesifikasyonları.....	15
Çizelge 2.6. Boksit cevherinin ortalama mineral bileşimi	16
Çizelge 2.7. Türkiye’de bulunan önemli boksit yatakları ve özellikleri	21
Çizelge 2.8. Türkiye’de alüminyum üretiminde bulunan önemli kuruluşlar	27
Çizelge 2.9. Boksitlerin NaOH çözeltisinde tepkimeye girme sıcaklık ve basınçları	30
Çizelge 2.10. Bazı önemli boksit zenginleştirme yöntemleri	41
Çizelge 2.11. Boksitin flotasyonunda yaygın olarak kullanılan bazı toplayıcılar	54
Çizelge 2.12. Ters boksit flotasyonunda yaygın olarak kullanılan bazı bastırıcılar	55
Çizelge 3.1. Boksit cevherinin XRF ile belirlenmiş kimyasal analiz sonucu	57
Çizelge 3.2. Flotasyon deneylerinde kullanılan kimyasal reaktifler	57
Çizelge 3.3. Çalışmalarda kullanılan alet ve cihazlar	58
Çizelge 3.4. Flotasyon besleme numunelerine ait d_{10} , d_{50} ve d_{90} değerleri.....	62
Çizelge 3.5. Flotasyon koşulları ve sabit tutulan parametreler	64
Çizelge 4.1. 2,360 mm’nin altına kırılmış cevherin analizi	68
Çizelge 4.2. 500 μm altına öğütülmüş cevherin analizi.....	69
Çizelge 4.3. 150 μm altına öğütülmüş cevherin elek analiz analizi.....	70
Çizelge 4.4. 60 dakika aşındırıldıktan sonra yaş eleme/yıkama işleminden geçirilmiş cevherin analizi	71
Çizelge 4.5. 120 dakika aşındırıldıktan sonra yaş eleme/yıkama işleminden geçirilmiş cevherin analizi	71
Çizelge 4.6. 240 dakika aşındırıldıktan sonra yaş eleme/yıkama işleminden geçirilmiş cevherin analizi	72
Çizelge 4.7. 212 μm altına öğütülmüş cevherin CTAB miktarının etkisi (pH: 5,5, 35 g/t MIBC, bastırıcı kullanılmadı).....	75
Çizelge 4.8. 212 μm altına öğütülmüş cevherin DDA miktarının etkisi (pH: 5,5, bastırıcı kullanılmadı).....	76

Çizelge 4.9. CTAB varlığında pH etkisi (250 g/t CTAB, 35 g/t MIBC, bastırıcı kullanılmadı).....	78
Çizelge 4.10. Toplayıcı (DDA) varlığında pH etkisi (bastırıcı kullanılmadı)	79
Çizelge 4.11. 212 µm altına öğütülmüş cevherin CTAB varlığında bastırıcı miktarının etkisi (pH:5,5, 35 g/t MIBC).....	81
Çizelge 4.12. 212 µm altına öğütülmüş cevherin DDA varlığında bastırıcı miktarının etkisi.....	83
Çizelge 4.13. -106 µm tane boyutundaki cevherin CTAB varlığında flotasyonu	84
Çizelge 4.14. -106 µm tane boyutundaki cevherin DDA varlığında flotasyonu	85
Çizelge 4.15. -75 µm tane boyutundaki cevherin CTAB varlığında flotasyonu	86
Çizelge 4.16. -75 µm tane boyutundaki cevherin DDA varlığında flotasyonu	86
Çizelge 4.17. -53 µm tane boyutundaki cevherin CTAB varlığında flotasyonu	88
Çizelge 4.18. -53 µm tane boyutundaki cevherin DDA varlığında flotasyonu	88

SİMGELER VE KISALTMALAR

μm	Mikrometre
Atm	Atmosferik basınç birimi
d10	Ölçümü yapılan numunenin %10'nun sahip olduğu tane boyutu
d50	Ölçümü yapılan numunenin %50'sinin sahip olduğu tane boyutu
d90	Ölçümü yapılan numunenin %90'nının sahip olduğu tane boyutu
dev.	Devir
dk.	Dakika
g/L	Gram/Litre
g/t	Gram/Ton
GD	Güneydoğu
GGB	Güney-güneybatı
GGD	Güney-güneydoğu
KB	Kuzeybatı
KKB	Kuzey-kuzeybatı
KKD	Kuzey-kuzeydoğu
Max.	Kabul edilebilir en fazla değer
Min.	Kabul edilebilir en az değer
MTA	Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü
QAL	Queensland Alümina Limited
TALSAD	Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği
TKB	Türkiye Kalkınma Bankası
USGS	ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu
XRD	X ışınları difraktometresi
XRF	X ışınları flüoresans spektom
DDA	Dodesilamin
CTAB	Setiltrimetil amonyum bromür
MODÜL	Bayer prosesine beslecek boksit cevheri içerisinde bulunan Al_2O_3 oranının SiO_2 oranına bölümüdür. Ekonomik olarak kabul görmesi için bu değer minimum 7 olması istenmektedir.

1. GİRİŞ

Demir dışı metallere göre birtakım üstün özellikleri bulunan alüminyum (Al) metale karşı olan talep ve buna paralel olarak da yıllık alüminyum üretimi hızla artmaktadır. Hafifliği ve hafifliğine karşın yüksek mukavemet özelliği, çok iyi elektrik ve ısı iletkenliğine sahip olması, yumuşaklığı nedeniyle kolay işlenebilirliği, soğuk ve sıcak şekillendirilebilirliği, yüksek korozyon direnci vd. endüstriyel uygulamalarda alüminyum değerli ve önemli kılan en önemli özelliklerin başında gelmektedir (Alp vd., 2008). Bugün alüminyum, endüstrinin birçok kolunda binlerce farklı ürünün imalinde kullanılmaktadır. Uzun ve havacılık sanayi, elektrik-elektronik endüstrisi, gıda ambalaj sektörü, yapı ve inşaat malzemeleri, metal alaşımlar, taşımacılık, otomotiv gibi önemli endüstri kolları için alüminyum vazgeçilmez metal durumundadır (Alan, 2008; Emtia, 2015). Öte yandan en az alüminyum kadar önemli olan alümina (Al_2O_3) ise; aşındırıcılar, biyo-medikal malzemeler, boya, dolgu maddesi, katalizör, refrakter malzeme, saflaştırma sistemi, yalıtım malzemesi gibi alanlarda çok geniş kullanım alanına sahiptir. Bütün bu gelişmeler alüminyum ve alümina üretim miktarlarında çok ciddi artışlar getirmiştir. Örneğin, 2005 yılında 64.667.000 ton olan dünya toplam alümina üretimi, 2015’de yaklaşık iki kat artışla 115.247.000 ton olarak gerçekleşmiştir (World Aluminium, 2017). Alümina üretimindeki bu artış trendinin önümüzdeki yıllarda da artarak devam edeceği öngörülmektedir.

Bugün ticari alümina üretiminin %90’dan fazlası “Bayer prosesi” ile yapılmaktadır ve bu prosesin başlıca hammadde kaynağını “boksit cevheri” oluşturmaktadır. Boksit ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$), sulu alüminyum oksit minerallerinin karışımından oluşan bir mineral grubunun adıdır. Boksit, homojen bir kimyasal bileşime ve kristal yapıya sahip bir mineral olmayıp, bu minerallerin heterojen bir karışım şeklinde doğada bulunmaktadır. Dünya genelinde boksit cevherlerinin ortalama Al_2O_3 tenörü %30 ile %60 arasında değişmektedir. Ayrıca boksit cevherleri, boksit mineralleriyle birlikte bulunan ve dünya genelindeki bütün boksit yataklarında sıklıkla karşılaşılan birtakım empüriteleri de içermektedir. Kuvars, kaolinit, illit, profillit gibi silikat mineraller; hematit, götit, pirit gibi demirli mineraller; rutil, anataz gibi titanyum mineralleri; kalsit, dolomit gibi karbonatlı mineraller boksit yapısında daima bulunmaktadır. Bayer prosesinin ekonomik ve sorunsuz işleyişi bakımından, bu safsızlıklar içerisinde en dikkat çekici ve olumsuz etkileri olan silisli (Si)

safsızlıklardır. Literatürde ve alüminyum endüstrisinde cevherdeki alümina miktarının silis miktarına oranı ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$), “silis modülü” ile karakterize edilmektedir. Alümina ve alüminyum üretim maliyetlerine doğrudan doğruya etkisi olan silis modülü, metalurjik kalitede boksit cevherleri için kritik öneme sahiptir. Silis modül değeri, ekonomik ve teknik koşullara bağlı olarak ülkeden ülkeye, tesisten tesise değişebilmekle beraber alt sınır değerinin 7 olduğu bilinmektedir.

Düşük silis modülüne sahip boksit cevherleri silisli cevher veya düşük kalite cevher kategorisine girmektedir. Bu tip cevherlerin Bayer sürecine sokulabilmesi için silis etkisini azaltmaya yönelik birtakım yöntem ve teknikler geliştirilmiştir. Boksit cevherindeki silisli safsızlıkları uzaklaştırmaya yönelik cevher zenginleştirme yöntemleri üzerinde (yıkama, gravimetrik ayırma, flotasyon gibi) uzunca bir süredir çalışılmaktadır. Bu konularda literatürde çok sayıda çalışmada bulunmaktadır. Ancak, bazı teknik ve ekonomik zorluklarından dolayı bu yöntemlerden çok az bir kısmı tesis ölçeğinde uygulanabilmektedir. Bununla birlikte son yıllardaki çalışmalara bakıldığında özellikle flotasyon yönteminin ön plana çıktığı, boksit flotasyonu üzerine yapılan çalışmaların yoğunluk kazandığı, başarılı ve ümit verici sonuçların elde edildiği görülmektedir (Birinci ve Gök, 2018).

Boksit flotasyonu konusunda bilinen ilk çalışmanın Rus araştırmacı Anishchenko ve arkadaşları tarafından 1970 yılında yapıldığı bildirilmektedir (Smith, 2009). Daha sonraki yıllarda bu alandaki çalışmaların çoğunluğu Çinli araştırmacılar tarafından sistematik bir şekilde sürdürülmüştür. Li ve Chen’in (1979) ilk çalışmasından sonra özellikle 2000 yılından bu yana çok önemli laboratuvar çalışmaları yapılmış ve düşük modüllü diasporik boksit cevherlerinden silis gideriminde flotasyonun etkili bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Boksit flotasyonu konusundaki literatür çalışmaları incelendiğinde, hem direkt flotasyonun hem de ters flotasyonun eş zamanlı ve karşılaştırmalı olarak çalışıldığı görülmektedir. Ayrıca her iki flotasyon denemelerinde diğer flotasyon değişkenlerine kıyasla bilhassa toplayıcı ve bastırıcı reaktiflerin etkisinin daha fazla olduğu; bu reaktif türlerinin ve kullanım miktarının flotasyonun başarısında kilit rol oynadığı ortaya konulmuştur. İster direkt isterse ters flotasyon olsun, her iki yöntem için amaç Bayer prosesine beslenebilecek kalitede düşük silis içerikli (ya da yüksek modüllü) boksit konsantresi elde etmek olmuştur. Bununla birlikte silis uzaklaştırmaya yönelik

yapılmış olan flotasyon çalışmalarında çoğunlukla ters flotasyonun tercih edildiği ve ters flotasyon üzerine daha fazla sayıda çalışmanın bulunduğu belirlenmiştir.

Yu-ren vd., (2001) yapmış oldukları boksit flotasyonu denemelerinde ticari kısaltması HZB olan bir çeşit uzun zincirli yağ asidini toplayıcı olarak denemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre HZB'nin silikat minerallerine daha fazla adsorbe olduğu tespit edilmiştir.

Yi-ping vd., (2002) boksit cevherinde bulunan diyaspör, kaolinit ve pirofillit flotasyonunda ticari ismi RL olan yeni bir toplayıcı, dağıtıcı sodyum hegzafosfat (NaPO_3)₆ ve pH ayarlayıcı olarak sodyumkarbonat (Na_2CO_3) kullanmışlardır. En yüksek modül oranına pH 8,5 değerinde ulaşılmıştır. Flotasyon işlemi öncesinde ham cevherin modül değeri 5,87 iken, flotasyon işlemi sonucunda elde edilen konsantrenin modülü 11,11 olmuştur.

Yu-hua vd., (2003) yapmış oldukları flotasyon çalışmalarında ise toplayıcı olarak setiltrimetil amonyum bromür (CTAB) kullanarak diyaspör, pirofillit, kaolinit ve illit üzerindeki yüzebilirlik etkisini incelemişlerdir. Bu minerallerin yüzebilirliğinin pirofillit> kaolinit>illit>diyarpor şeklinde sıralandığını gözlemlemişlerdir.

Silikatların flotasyonunda etkin bir toplayıcı dodesil aminin (DDA) varlığında bastırıcı türünün etkisinin incelendiği başka bir çalışmada (Hai-pu, 2004), hidroksamik asit nişastası (HAS) ve hidroksamik asit poliakrilamidin (HPAM) diyaspör ve kaolinit ters flotasyon üzerine etkisini araştırılmıştır. HAS, diyaspör yüzeyindeki toplayıcı dodesil aminin (DDA) kaplanmasıyla, HAS'nin diyasporu bastırdığını, ancak asidik ortamda kaoliniti aktive ettiği, HPAM'nin ise pH 2-10 aralığında hem diyaspör hem de kaoliniti aktive ettiği tespit edilmiştir.

Sheng-gui vd., (2007) tarafından tamamlanan bir çalışmada ise, oktadesil dimetil benzil amonyum klorür (ODBA), setil trimetil amonyum bromür (CTAB) ve dodesil trimetil amonyum klorür (DTAC) gibi dördüncül amonyum tuzu toplayıcıların diyaspörük boksit cevherlerindeki kaolinit, pirofillit ve illitin elektrokinetik davranışı üzerine etkisi incelenerek flotasyon verimleri araştırılmıştır. Dördüncül amonyum tuzlarının toplayıcı olarak denendiği flotasyon testleri sonucunda, yukarıda bahsedilen kil minerallerinin tümü için bu tür toplayıcıların etkili olduğu görülmüştür. Özellikle 2,5-6,0 aralığındaki pH değerlerinde kaolinit, illit ve pirofillit gibi silikat minerallerini ayırmakta başarı sağlamışlardır.

Ma vd., (2009) yapmış oldukları çalışmada, eter diamin ve eter mono amin den olan iki tür amin tipi toplayıcı deneyerek pH 3 ila pH 10,5 arasında iyonik kuvvetin kaolinitin flotasyon davranışına etkisini araştırmış ve eter diaminin eter mono aminden daha güçlü bir toplayıcı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Diyasporik boksit cevheri üzerine Xia vd., (2009) tarafından yapılan başka bir çalışmada, bastırıcı olarak starch(nişasta) toplayıcı olarak da Gemini katyonik toplayıcı türü olan dimetil dodesil amonyum bromür (BDDA) kullanılmıştır. pH 9-10 aralığında gerçekleştirilen flotasyon deneyleri sonucunda modül değerini 6,02'den 9,72'e çıkarabilmişlerdir.

Xia vd., (2009) yapmış oldukları benzer bir çalışmada, dimetil dodesil amonyum bromür (BDDA)'ün yüksek saflıktaki diyaspor, illit, kaolinit ve profilit mineralleri üzerindeki toplayıcı etkinliğini incelemişler; daha sonra diyasporik boksit cevheri üzerinde denemeler gerçekleştirmişlerdir. pH 10 civarında gerçekleştirilen bu denemelerde bastırıcı olarak nişasta kullanılmış ve flotasyon öncesinde cevherin modülü 5,85 iken, flotasyon sonrası bu değer 9,80 olmuştur.

Li vd., (2010) yapmış oldukları mikroflotasyon çalışmalarında toplayıcı olarak dodesilamin (DDA), bastırıcı olarak Yüksek zincirli nişastası (WMS) kullanılarak diyaspor cevherinin bastırmayı ve kaolinit gibi kil minerallerini yüzdürmede başarı sağlandığını ve beslemedeki modül değerini 4,26'dan 12,73'e çıkartmayı başarmışlardır.

Hai-pu vd., (2010) yapmış oldukları daha güncel bir çalışmada, boksit cevherinin ters flotasyonunda toplayıcı olarak seçilen dodesilamin (DDA) varlığında diyasporu bastırmak amacıyla farklı nişasta kullanmışlardır. Katyonik nişasta (CAS), karboksimetil nişasta (CMS), amfoterik nişasta (AMS) ve çözünabilir nişasta (SS) olmak üzere dört farklı nişasta üzerinde yapılan flotasyon deneyleri sonucunda, SS ve CMS ile kıyaslandığında CAS ve AMS'nin diyaspor yüzeyine daha fazla adsorbe olduğu, dolayısıyla bu nişasta türlerinin diyasporu bastırmada daha etkili oldukları belirlenmiştir.

Yüksek silis içerikli gibsit cevherinden silis uzaklaştırma üzerine Marino (2012) tarafından yapılmış yüksek lisans çalışmasında, farklı tane boyutuna öğütülmüş boksit cevheri üzerinde birtakım flotasyon deneyleri gerçekleştirmiştir. Özellikle -106 mikron boyutundaki cevher içerisindeki kaoliniti başarılı bir şekilde uzaklaştırmayı başarmıştır.

Huang vd., (2013) yapmış oldukları çalışmalarında, toplayıcı olarak dimetil dodesilamonyum bromür (BDDA) ve dimetil dodekulamonyum bromür (EDDA) kullanarak bu toplayıcıların kaolinit, pirofillit ve illitin flotasyon davranışını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. BDDA'nın EDDA ya kıyasla daha güçlü bir toplayıcı olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, bu üç silikat mineral yüzeyindeki toplayıcı adsorpsiyonunun elektrostatik çekim kuvvetleri ve hidrojen bağı etkisi ile gerçekleşmiş olabileceğini ifade etmişlerdir.

Jiang vd., (2014) yapmış olduğu çalışmada, dodesiltrimetil amonyum klorür (DTAC) ve setiltrimetil amonyum klorür (CTAC)'ın diyaspor ve kaolinit üzerine adsorpsiyon davranışı ile flotasyon verimini araştırmışlardır. Elde edilen bulgulara göre diyaspor flotasyonundaki iyileşmenin pH artışı ve tane boyutunun küçülmesi ile azaldığı, ancak kaolinit için bu durumun söz konusu olmadığı belirtilmektedir. Bu sonucun nedenini açıklamak amacıyla iki mineralin SEM görüntüleri de incelenmiş, kaolinitin diyaspora kıyasla daha tabakalı yüzey alanına sahip olduğunu (yaklaşık olarak 7 kat) gözlemlemişlerdir. Dolayısıyla diyaspor ve kaolinit flotasyonu arasındaki farkın kristal yapısındaki farklardan kaynaklandığı sonucuna varmışlardır.

Xua vd., (2014), farklı tane fraksiyonlarındaki (0.075-0.038 mm, 0.038-0.01 mm ve 0-0,01 mm) diyaspor ve kaolinit üzerinde, tane boyutunun flotasyondaki etkilerini araştırmışlar. Diyaspor ve kaolinitin farklı kristal düzlemlerindeki adsorpsiyonu, farklı kristal düzlemleri için kırık bağı yoğunluklarının (Db) artan sırası ve hidrofobiklik, kırık bağlarının sayısının artması ile ilişkili olduğunu savunmuşlardır.

Silikat minerali olarak kaolinit ve illit içeren boksit cevheri üzerine Deng vd., (2015) tarafından yapılan bir flotasyon çalışmada yeni bir yüzey aktif madde olarak N-(6-(hidroksiamino)-6-oksoheksil) decanamide (NHOD)'ı toplayıcı olarak denemişlerdir. Boksit cevherinden kaolinit ve illitin uzaklaştırılmasında NHOD'nin oldukça başarılı olduğu; modül değerinin 11,10'a kadar çıkarılabildiği ifade edilmektedir.

Brezilya boksit yatakları üzerine yapılan başka bir çalışmada (Rodrigues vd., 2016), gibsitik boksit cevherinde başlıca silis kaynağı olarak bulunan kaolinit uzaklaştırmak için toplayıcı ve bastırıcı olarak sırasıyla AQ142 ve nişasta kullanılmıştır. Kaolinit başarılı bir şekilde uzaklaştırılmış olup, flotasyon öncesi 11,06 olan silis modülü, flotasyon işlemi sonrasında 26,56' değerine çıkarılabilmektedir.

Liu vd., (2016), boksit cevherindeki silikatlar ile demirli safsızlıkları bastırmak amacıyla sodyum silikat, nişasta gibi tipik bastırıcılarla birlikte sodyum karbonat, kalgon/sodyum hegzametafosfat türü dağıtıcıları da kullanmışlardır. Bastırıcı miktarındaki artışa bağlı olarak silis modülü ile Al kazanımındaki değişimin incelendiği bu çalışmada, bastırıcı çeşiti kısmen önemli olmakla birlikte bastırıcı miktarının çok daha etkili olduğu vurgusu yapılmıştır.

Barbosa vd., (2016) yapmış oldukları çalışmada, seramik spesifikasyonunda boksit konsantresi hazırlamak amacıyla cevherdeki demir oranını %2,5'in altına düşürmeye çalışmışlardır. Gibsitik boksit cevherindeki demirli bileşiklerini uzaklaştırmak için yapılan flotasyon çalışmalarında toplayıcı olarak hydroxamate (AERO 6493), bastırıcı olarak ise nişasta kullanılmıştır. Cevherdeki demir oranını %7,66'dan ancak %4,81-5,03 seviyesine kadar indirebilmeyi başarmışlardır.

Yu vd., (2016) boksit cevheri içerisinde bulunan kaolinit, illit ve profiliti ters flotasyon yöntemiyle uzaklaştırmak için TAS101 adında katyonik toplayıcı kullanmışlardır. Tüvenan cevherin silis modülü 6,21 iken pH 11'de yaptıkları flotasyon neticesinde bu değeri 9,85'e çıkarabilmişlerdir. Ayrıca Al_2O_3 kazanımını %83,34 olmuştur.

Barani ve Kalantari, (2017) İran'da bulunan kaolinit zenginleştirme tesis atıklarından kaolinitin geri kazanımı flotasyon ve flokülasyon yöntemleriyle araştırmışlardır. Toplayıcı olarak kullandıkları dodesilamin (DDA), köpürtücü olarak çam yağı ve pH 7'de yapmış oldukları deney sonucunda %37,19 Al_2O_3 ve %54,19 SiO_2 içerikli bir konsantre elde edilebilmiştir.

Güncel verilere göre Türkiye'de yaklaşık 200 civarında boksit kaynağının olduğu ve bu kaynakların neredeyse tamamına yakınının Toros Kuşağı içinde yer aldığı bilinmektedir. Toplam boksit rezervinin ise yaklaşık 400 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Bu rezervlerin büyük bir kısmı dijasporik, daha az bir kısmı böhmitik cevherlerden oluşmaktadır. Türkiye'deki boksit yataklarının büyük bir bölümü Bayer prosesine doğrudan beslenemeyecek düşük kaliteli (özellikle yüksek silisli) cevherler sınıfına girmektedir. Ancak, bu cevherlerden silis uzaklaştırmaya yönelik çalışmalar yok denecek kadar azdır.

1.1. Amaç

Bu çalışmada, Doğankuzu-Mortaş boksit sahasından (Seydişehir/Konya) temin edilen düşük kalitedeki (düşük modüllü) boksit cevherinden özellikle silisli safsızlıkların flotasyon yöntemiyle uzaklaştırılması; böylece Bayer prosesine doğrudan beslenebilecek kalitede boksit konsantresi (silis modülü için eşik değeri olan 7'nin üzerinde) elde edilmesi amaçlanmıştır.

1.2. Kapsam

Boksit cevherinden cevher hazırlama/zenginleştirme yöntemleriyle silis uzaklaştırma konusunun ele alındığı bu tez çalışması kapsamında farklı tane boylarına öğütülmüş cevher numuneleri üzerinde bir dizi flotasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Alüminyumlu Mineraller ve Boksit

Alüminyum metali yer kabuğunda en çok bulunan üçüncü element olup yaklaşık %8 oranında bulunmaktadır. Bunun yanında yer kabuğunda yaklaşık olarak 250'e yakın alüminyum mineralinin olduğu bilinmektedir. Bu minerallerin %40'ını alüminyum silikatlar oluşturmaktadır. Daha çok silikat ve oksit karışımları fazlarında ortaya çıkan silikat mineralleri ve korund çok sağlam yapılı bileşikler oldukları için alüminyum üretiminde kullanılmamaktadır. Birincil oluşumlar olarak tanımlanan silikat bileşimli kayalardan meydana gelen minerallerin yüzey etkilerinin değişimleri sırasında alüminyum üretimi için uygun olan ikincil mineraller oluşmaktadır. Bazı alüminyum mineralleri Çizelge 2.1'de verilmiştir (Alp vd., 2008).

Günümüzde alüminyum ve alümina üretiminde çok olarak kullanılan hammadde kaynağı boksittir. Boksit sulu alüminyum oksit minerallerinin karışımından oluşan bir mineral grubunun adıdır. Boksitlerin genel formülü $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ olup, Al_2O_3 içeriklerine göre gibbsit/hidrarjilit ($Al(OH)_3$), böhmitik ($AlO(OH)$) ve diyasporik ($\alpha-Al_2O_3 \cdot H_2O$) boksitler olarak üç grupta toplanmaktadır. Boksit, homojen bir kimyasal bileşime ve kristal yapıya sahip bir mineral olmayıp, bu minerallerin heterojen bir karışım şeklinde doğada bulunmaktadır. Ayrıca boksit mineralleriyle birlikte bulunan ve dünya genelindeki bütün boksit yataklarında sıklıkla karşılaşılan birtakım önemli empüriteler de (özellikle Fe_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 gibi) vardır. Boksit, esasen alüminyumca zengin bir mineral topluluğunun adıdır. Boksit bir mineral adı olmayıp böhmit, gibsit ve diyaspor minerallerinin bir karışımıdır. Boksit Mohs sertliği 1-7, yoğunluğu 2,5-3,5 g/cm³ arasında değişen alüminyum oksit ve hidroksitlerin bir karışımıdır. Dünyadaki metal alüminyum üretiminin neredeyse %90'ı bu cevherden sağlanmaktadır. Bu açıdan boksit cevheri Dünya ticaretinde çok önemli bir yere sahiptir. Boksit, diyaspor ($Al_2O_3 \cdot H_2O$), böhmit ($AlO(OH)$), gibsit (hidrarjilit) ($Al(OH)_3$) minerallerinin bir karışımı olup yaygın olarak silis, demir oksitler ve titan safsızlıkları içermektedir. Genellikle rengi içerdiği demir miktarına bağlı olarak sarı kahverengi ve kırmızı olabileceği gibi kirli-beyazdan griye kadar değişmektedir. Toprağımsı ve killi görünüme sahip boksitlerin yanında masif, oldukça sert ve parlak olanları ile oolitik, pizolitik modüllü ve bantlı yapılı olanları da mevcuttur. Boksitin

yoğunluğunun ve renginin değişiklik göstermesi onun gözeneklerinin çokluğu veya azlığı ile içinde bulunan Fe minerallerin miktarından ileri gelmektedir (Alp vd., 2008).

Boksitler nemli, tropikal iklim koşulları altında kayaların aşınması ve yıkanması sonucunda oluşmuş cevherlerdir. Kaya litolojisine göre lateritik ve karstik tipi boksitler olmak üzere iki türde sınıflandırılmıştır. Karstik tipi boksitler karbonatlı kayalarında yataklarda meydana gelirken, laterit tipi boksitler ise alüminosilikat kayalardan meydana gelmektedir (Yang vd., 2019).

Çizelge 2.1. Alümina/alüminyum üretiminde değerlendirilen ve değerlendirme potansiyeli bulunan bazı alüminyum içeren minareller (Alp vd., 2008)

Mineral adı	Mineralojik formülü	%Al	%Al ₂ O ₃
<i>Alüminyum hidroksil minareleri (Boksit mineralleri)</i>			
Gibsit	$\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	34,6	65,4
Diyaspor	$\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	45,0	85,0
Böhmit	$\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	45,0	85,0
<i>Alüminyum oksit minareleri</i>			
Korund	$\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$	52,9	100
<i>Alüminyum sülfat minarelleri</i>			
Alunit	$\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	19,6	85,0
Alumojel	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	15,8	29,8
Aluminit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	15,7	29,7
Kalinit	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	5,7	10,8
Halotrikrit	$\text{FeSO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	5,8	11,0
<i>Alüminyum silikat minarelleri</i>			
Andaluzit/Kiyanit/Silimanit	Al_2SiO_5	33,3	62,9
Kaolinit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	20,9	39,5
Spinel	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	38,0	71,8
Ortoklaz	$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	9,7	18,3
Beril	$\text{BeAl}_2(\text{SiO}_3)_6$	10,4	19,7
Staurilit	$2\text{Al}_2\text{SiO}_5 \cdot \text{Fe}(\text{OH})_2$	26,0	49,0
Profilit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	15,0	28,3
Nefelin	$(\text{Na},\text{K})\text{O}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	17,0	32,27

2.2. Boksitlerin Sınıflandırılması

Boksitler genel olarak oluşum şekillerine, mineralojik bileşimlerine, kullanım alanlarına ve safsızlıkların türü içeriğine göre sınıflandırılmaktadır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Boksitlerin sınıflandırılması (DPT, 2001)

1) Oluşum şekillerine göre boksitler
Lateritik/silikatlı boksitler
Karstik boksitler
2) Mineralojik bileşiklerine göre boksitler
Gibsitikboksitler
Böhmitik boksitler
Diyasporikboksitler
3) Silis ve demir içeriklerine göre boksitler
Al_2O_3/SiO_2 modül değerine göre
Fe_2O_3 tenör değerine göre
4) Kullanım alanlarına göre boksitler
Metalurjik
Çimento
Kimyasal
Refrakter
Aşındırıcı

2.2.1. Oluşum şekillerine göre boksitler

Oluşumlarına bağlı olarak boksitler lateritik (ekvatorial) ve karstik olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Her ikisi de temel kayadan ayrışma ürünleri olup, lateritik boksitler birincil alüminosilikat kayalardan türemişken karstik boksitler ara katmanlı karbonat ve alüminosilikat kayalardan oluşmuştur. Ekvatorial iklim koşullarında oluşmuş lateritik boksitler, Dünya işletilir boksit rezervlerinin %90'ını oluşturmaktadır. Lateritik boksit cevherlerinde başlıca silikat minareli kaolinit/halloysit olup, genellikle götit ($HFeO_2-FeO(OH)$) gibi demir minarelleriyle ilintilidir. Bu boksit minarelleri ise çoğunlukla gibsit ve daha az oranda böhmittir. Karstik boksitler, lateriklerden farklı bozuşma koşullarında oluştuklarında ve

karbonatlı kayaçların varlığından dolayı farklı mineralojik bileşime sahiptir. Karstik cevherlerde de baskın silikat minareli kaolinittir, ancak bir diğer silikat minareli olan şamozit ile de ilintilidir. Karstik boksitlerin tipik alüminyum minareli böhmit ve diaspordur. Bayer prosesi sırasında her iki cevher işlem koşullarını etkilemektedir. Lateritik boksitlerin işlenmesi genellikle karstik boksitlerden daha kolaydır. Lateritik boksitler daha düşük kostik konsantrasyonunda, daha düşük sıcaklık ve basınç koşullarında liç edilebilmektedir.

Silikat Boksitler: Bunlar daha çok alüminyumca zengin silikat kayaçlarının aşınması ve yıkanması sonucu meydana gelir. Bunun için yağışlı ve ılık, tropikal iklimler, geçirgenliği ve tektonik stabilitesi olan kayaçlar en uygun ortamlardır. Diğer elemanların yüzey akıntılarıyla yıkanması alüminyumca zenginleşmeyi sağlamaktadır.

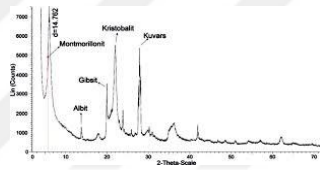
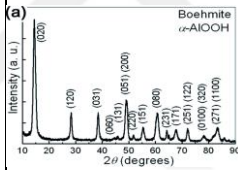
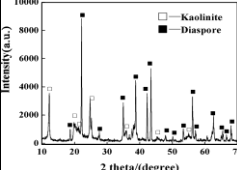
Karstik Boksitler: Kireçtaşı ve dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) gibi karstik boşluklarında meydana gelmektedir. Alüminyum başka ortamlarda çözmüş olan asidik karakterli yüzey sularının, kireçtaşları içinde nötrleşerek alüminyumca zenginleşmesine neden oldukları bilinmektedir (DPT, 2001).

2.2.2. Mineralojik bileşiklerine göre boksitler

Boksitler mineralojik bileşimine ve içerdikleri Al_2O_3 'ün kaynağına göre gibsitik/hidrarjilit ($\text{Al}(\text{OH})_3$), böhmitik ($\text{AlO}(\text{OH})$) ve diasporelik ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) boksitler olarak üç gruba ayrılmaktadır. Gibsitik boksitlerin magmatik kayaçlardaki feldispat ve korundun düşük sıcaklıklarda dekompozisyonu ile oluştuğu bilinmektedir. Böhmitik boksitlerin ise gibsitin dehidratasyonu sırasında bir ara ürün olarak ortaya çıktığı ileri sürülmektedir. Bilinen mineralleri ve mineralojik özellikleri Çizelge 2.3 verilmiştir. Uygun koşullar meydana geldiğinde ayrılan kayaçlardan ilk çökelen boksit minerali gibsit türüdür ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Sonraki dönemde gibsit, uğradığı basınç ve sıcaklık etkisiyle içerdiği 3 mol suyu kaybederek sadece X-Işınlarıyla fark edilebilen değişik yapıdaki boksit minerallerine dönüşür. Örneğin, Dinarid Kuşaklarında üç alüminyumlu hidroksitin üç farklı jeoloji devreye karşılık geldiği yapılan yaş tayinleriyle ortaya konmuştur (Gibson vd., 2017; Anonim, 2019a). Bunlar;

Diasporik boksit..... ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ve böhmit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)-----Triyas kuşağı
Böhmitli boksit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ----- Kretase kuşağı
Gibsitli boksit..... ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) -----Eosen kuşağı

Çizelge 2.3. Boksit mineralleri ve bazı mineralojik özellikleri

Özellik	Boksit mineralleri		
	Gibsit	Böhmit	Diaspor
Bileşim	$\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Yoğunluk g/cm ³	2,3-3,4	3,0-3,2	3,3–3,5
Mohs Sertliği	3,0-3,5	3,5-4,0	6,5-7
Kristal sistemi	Monoklinik	Ortorombik	Ortorombik
Renk	Toprağımsı, beyaz, gri	Kahverengi, kırmızı, gri kahverengiye	Beyaz, yeşil, sarı, leylak, kahverengi,
Çizgi rengi	Beyaz	Beyaz	Beyaz
Dilinim	Her doğrultuda dilinim vermektedir	İnce taneli	Levhamsı
Tipik XRD deseni			
Kostik çözünme sıcaklığı (°C)	>100	>250	>260
Çözünme basıncı (atm)	~8	~54	~60

Yeryüzünde yüzlerce çeşit boksit cevherlerine rastlamak mümkündür. Fakat en yaygın bilinen boksit cevherleri (a) gibsit boksitler (b) böhmitik boksitler ve (c) diasporitik boksitlerdir. Bazı boksit cevherleri içerdikleri minerallere göre farklı renkte bulunabilmektedir. Şekil 2.1’de genel boksit cevherleri ve nadir bölgelerde bulunan farklı renklerdeki boksit minarelleri verilmiştir.



a) Karstik ve silikatlı boksit minarelleri (Anonim, 2019b)



a) Farklı yapı ve dokudaki boksit cevherler örnekleri (Anonim, 2019c)



Şekil 2.1. Başlıca boksit mineralleri ve bazı tipik boksit cevher örnekleri (Anonim, 2019d)

Gibsit: Toprağımsı beyaz, gri veya yeşilimsi renkli nadirde olsa turkuaz renkte olabilmekte ve yarı şeffaf olan gibsit, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ bileşiminde olan bir α -alümin trihidrat olup, monoklinik sistemde kristalleşmekte ve her doğrultuda iyi dilinim vermektedir. Çizgi rengi beyaz, kostik çözünme sıcaklığı yaklaşık 100°C olup, özgül ağırlığı $2,3\text{-}3,4 \text{ g/cm}^3$ arasında değişen gibsit minerali korund, nefelin veya feldispat gibi alüminyumca zengin oluşumların hidrotermal alterasyonu ile meydana gelmiş ikincil bir mineraldir. Mohs sertlik derecesi $3,0\text{-}3,5$ olan gibsitin monoklinik ve triklinik kristal yapılarında olduğu literatürde belirtilmiştir (Alp vd., 2008).

Böhmit: Kahverengimsi kırmızıdan grimsi kahverengiye kadar değişen renklerde bulunan böhmit, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ bileşiminde olan bir γ -alüminmonohidrat olup, özgül ağırlığı $3,0\text{-}3,2 \text{ g/cm}^3$ ve sertliği $3,5\text{-}4,0$ Çizgi rengi beyaz, dilinim şekli ince tanelidir, kostik çözeltisinde çözünme sıcaklığı yaklaşık 250°C dir. Karstik boksitlerin önemli bir minerali olan böhmit Akdeniz çevresinde yaygın olarak bulunmaktadır. Gibsitin dehidratasyonu sırasında bir ara ürün olarak meydana gelen ve genellikle demirli mineraller ile karışık küçük kristaller oluşturan böhmit, ortorombik sistemde kristallenmektedir. Böhmit birçok boksit yatağının başlıca minerallerinden birisi olup, değişik miktarlarda olmak üzere hemen hemen bütün boksit yataklarında, genellikle amorf kümeler halinde bulunabilmektedir (Alp vd., 2008).

Diaspor: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ bileşiminde α -monohidrat olan diasporitin kristal sisteminin böhmitten farklı olduğu optik incelemelerle ortaya konmuştur. Diasporit, böhmitin diyajenez ve hafif metamorfizma ile değişmesinden meydana gelmiştir. Toprak renginden gri, yeşil, leylak, kahverengi, beyaz ve sarıya kadar değişik renklerde bulunabilen diasporit boksitler şeffaf veya yarı şeffaf olabilmekte çizgi rengi beyazdır. Prizmatik veya ince levhalar halinde ortorombik kristallerden oluşmakta olan diasporitin sertliği $6,5\text{-}7,0$ ve özgül ağırlığı $3,3\text{-}3,5 \text{ g/cm}^3$ olarak verilmiş olup, çözünme sıcaklığı ise yaklaşık 260°C dir. Genellikle korund ve zımpara taşı ile birlikte dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ve granüler kil taşları veya kristalize şistler içinde bulunabilen diaspor, ticari yataklarda toprağımsı, granüler ve pisolitik yumrular halinde rastlanılmaktadır. Kalsine edilerek aşındırıcı olarak kullanılabildiği gibi, refrakter tuğla üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Alp vd., 2008).

2.2.3. Silis ve demir içeriklerine göre boksitler

Boksit kalitesini belirleyen en önemli kriterden birisi cevherdeki kazanılabilir alümina (Al_2O_3) miktarı ile reaktif silis (SiO_2) içeriği arasındaki orandır. Literatürde ve alümina endüstrisinde “modül” olarak adlandırılan bu oran, metalurjik kalite boksit cevherleri için kritik öneme sahiptir. Silis içeriğinin önemli bir göstergesi olan modül değerine göre yüksek alüminalı cevherin modül değeri >20 iken, yüksek silis içerikli silisli cevherlerin modül değeri <4 ’tür (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4. Modül oranı ve Fe_2O_3 tenörüne göre boksitler (DPT, 2001)

<i>Modül Değeri</i>	<i>Cevher Tipi</i>
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 > 20$	Yüksek alüminalı cevher
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2: 10-20$	Alüminalı cevher
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2: 4-10$	Silisli cevher
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 < 4$	Yüksek silisli cevher
<i>Fe_2O_3 içeriği</i>	<i>Cevher tipi</i>
% $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 25$	Çok demirli cevher
% $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 10-25$	Demirli cevher
% $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 10$ Az	Az demirli cevher

2.2.4. Kullanım alanlarına göre boksitler

Boksitlerin metalurji, refrakter, aşındırıcı, çimento ve kimya endüstrisi olmak üzere beş önemli kullanım alanı bulunmaktadır (Çizelge 2.5). Boksit cevheri birçok alanda kullanılıyor olmasına rağmen boksitlerin birincil tüketim alanı metalurji sanayi olup, günümüzde üretilen boksitlerin büyük bir bölümü alüminyum metali eldesinde kullanılmaktadır. Alüminyum üretimi amacıyla Bayer prosesinde kullanılan cevherlere “metalurjik kalite boksit” adı verilmektedir.

Çizelge 2.5. Kullanım alanlarına göre boksit spesifikasyonları (DPT, 2001)

İçerik, %	Metalurji	Refrakter*	Aşındırıcı*	Çimento	Kimyasal
Al_2O_3	50-55	>85	80-88	45-55	min. 55
SiO_2	0-15	max. 7,5	4-8	max 6	5-18
Fe_2O_3	5-30	max. 2,5	2-5	20-30	Max 2
TiO_2	0-6	max. 4	2-5	max.3	0-6
*Kalsine edilmiş cevher için					

2.3. Boksit Cevherlerindeki Safsızlıklar ve Etkileri

Yerkabuğunda bulunan tüm cevherler gibi boksit cevherleri de gipsit, böhmit ve diyaspor minerallerinin dışında bünyesinde başka minerallerde bulundurulur. Boksit homojen bir kimyasal bileşime ve kristal yapıya sahip bir mineral olmayıp, minerallerin heterojen bir karışımı şeklinde doğada bulunmaktadır. Ayrıca boksit yataklarında sıklıkla karşılaşılan ve boksit mineralleriyle birlikte bulunan birtakım önemli empüriteleri de (özellikle silis, demir ve titanyum dışında az miktarda da kükürt, fosfor, kalsiyum oksit gibi ve diğer metal oksitler) içermektedir. Bu tür safsızlıklar alümina üretimini ve soda tüketimini önemli derecede etkilenmektedir. Bunun yanı sıra diğer kullanım alanlarını da etkilemektedir. Özellikle boksitlerin ekstraksiyonu (çözünme) esnasında safsızlıklar açısından ana cevherin özellikleri önemli rol oynamaktadır. Dünya genelindeki boksit cevherlerinin ortalama mineralojik bileşimi Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Boksit cevherinin ortalama mineral bileşimi (DPT, 2001; Habashi, 1999)

Bileşik	Miktar	Yaygın mineral kaynakları
Al ₂ O ₃	%35-65	Gipsit (Al(OH) ₃), Böhmit (AlO(OH)), Diyaspor (AlO(OH))
SiO ₂	%0,5-10	Kuvars (SiO ₂), Tridimit, (SiO ₂), Kaolinit (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄), Halloysit (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ .2H ₂ O), Pirofillit (Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂)
Fe ₂ O ₃	%2-30	Götüt (HFeO ₂ -FeO(OH)), Hematit (Fe ₂ O ₃), Siderit (FeCO ₃)
TiO ₂	%0,5-8	Rutil (TiO ₂), Anataz (TiO ₂), İlmenit (FeTiO ₂), Lökoks (FeTiO ₃)
CaO	%0-55	Kalsit (CaCO ₃), Dolomit (CaMg(CO ₃) ₂), Manyezit (MgCO ₃)

Boksitlerde bulunan en yaygın safsızlıklardan birisi demirli bileşiklerdir ki bu bileşikler çoğunlukla demir oksit ve hidroksit mineralleri şeklinde bulunmaktadır. Boksitler ortalama %2-30 arasında Fe içeriğine sahip olabilmektedirler. Boksitlerde rastlanan başlıca demir mineralleri manyetit (Fe₃O₄), hematit (Fe₂O₃), limonit ve götütür (HFeO₂-FeO(OH)). Boksitler, içerdikleri demir oksitlerden dolayı renklidirler. Hematit (Fe₂O₃) boksite kırmızı, limonit ise sarı renk verir. Eğer boksit açık-beyaz renkte ise demir içeriğinin az olduğu anlaşılır. Boksitlere eşlik eden bir diğer safsızlık

ise kil mineralleridir. Özellikle kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve illit ($\text{KAl}_2(\text{OH})_2(\text{AlSi}_3(\text{O.OH})_{10})$) grubu killer dünyadaki bütün boksitlerde az veya çok oranda rastlanılmaktadır. Boksit yataklarının, özellikle silikat boksitlerin tabanında daima killi bir tabaka bulunmaktadır. Ilıman iklim ve asidik ortam koşullarda ayrışma ürünü kil iken, daha sıcak iklim ve alkali ortam koşullarında çökelen ürün boksittir (Anonim, 2009a).

Boksitlerin bileşimi üzerine yapılan incelemelerde elde edilen bilgilere göre boksitlerin yapısına 43 farklı elementin girdiği belirlenmiştir. Bunlardan sadece on tanesinin (Ni, O, H, C, Al, Si, Ti, Ca, Mg, Fe) tenörleri %1 in üzerindedir. Beş element (P, V, Cr, Na, K) %1 in, geri kalan diğer elementler ise %0,1 in altında değerler göstermektedir (Caner, 1971). Bunun yanı sıra Ga, Zn, Pb, Cu gibi minareller de içerdiği görülmüştür. (Cablık, 2007).

Silisli safsızlıklar ve etkileri: Boksit cevheri içinde, işletme güçlükleri ve gerekse hammadde kayıpları bakımından boksitlerin en önemli safsızlık silisli bileşiklerdir (Kılıç, 2013). Boksit cevherlerinde önemli safsızlıklardan olan silisin mineral kaynakları kuvars (SiO_2), tridimit, kaolinit, kalsedon (SiO_2) illit, halloysit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), pirofillit ($\text{H}_2\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_4$) gibi silikatlardır. Boksit cevherindeki yüksek orandaki silis Bayer prosesi üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratmaktadır (Vural,1977). Kuvars (SiO_2) düşük sıcaklıkta reaksiyona girmezken yüksek sıcakta yani 235-260°C'de (rutil hariç) soda ve alümina kaybına neden olmaktadır. Boksit cevherinde bulunan farklı mineral fazların çözünürlük koşulları üzerinde oldukça etkilidir. Boksit içerisinde bulunan minerallerin hemen hemen hepsi yüksek fazlarda çözünür hale gelir (Dickson, 2017). Bu kayıplar toplam işlemin maliyetini arttırmakta ve Bayer işleminin verimini düşürmektedir (Whittington ve Fallows, 1997; Whittington, 1998; Martin vd., 2001; Kumar vd., 2016). Silisin neden olduğu sorunlar, ileriki bölümlerde ayrı bir başlık altında ele alınarak daha ayrıntılı olarak işlenecektir.

Demirli safsızlıklar ve etkileri: Boksit cevherlerinde bulunan Fe, kırmızı çamur miktarının, nakliye maliyetlerinin ve dolayısıyla yıkama işlemlerinde kullanılan su ve iş gücünün artmasına neden olmaktadır. %25 ile 30 arasında Fe_2O_3 içeren boksit cevherleri Bayer prosesi ile rahatlıkla işlenebilmektedir (Kılıç, 2013). Boksitlerde demir mineralleri genellikle hematit (Fe_2O_3), götit ($\text{HFeO}_2\text{-FeO(OH)}$), siderit (FeCO_3), limonit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$), manyetit(Fe_3O_4) ve pirit (FeS_2) gibi çok değişik formlarda

bulunabilmektedir. Boksitlerin bünyesinde bulunan demir yüzdesi arttıkça çamur miktarı artarak kostik kayıplarını yükseltmekte ve kırmızı çamur çöktürme ve yıkama devrelerini olumsuz şekilde etkilemektedir. Boksitin bünyesindeki demir oranı, demirli minerallerin türü ve yapısı kırmızı çamurun yüzey özelliklerini etkileyerek, pülpün flokülasyonla çöktürülmesinde önemli rol oynamaktadır. Genellikle iki değerli demir mineralleri kırmızı çamurun çökmesini yavaşlatmaktadır (Vural, 1977). Bu sebeple Bayer prosesine beslenecek boksit cevheri önce manyetik ayırma yöntemi ile Fe minarelleri uzaklaştırılır, ayrılan Fe minarelleri kırmızı çamur attığının yüksek miktarda azalmasına neden olur. Boksit cevherlerinde bulunan hematit gibi Fe içeren boksit cevherleri çözeltide çok fazla tepkimeye uğramazken, içerisinde bulunan alümina götitler ise yüksek sıcaklıkta götit içerisinde bulunan alüminyum açığa çıkarken, götit ise hematite dönüşebilmektedir (Dickson vd., 2017).

Titan mineralleri ve etkileri: Boksitteki titanın iki önemli mineralinden birisi rutil, diğeri anatazdır. Titan otoklavlarda sodyum metatitanat oluşturup (NaHTiO_3) kostik kayıplarına neden olduğu gibi bazı hallerde dijasporun çözünürleşmesini etkilemekte dolayısıyla verimin düşmesine sebep olmaktadır. Bayer prosesine kireç ilave edilerek (CaO veya Ca(OH)_2) çözelti içerisinde titanlar ile tepkimeye girerek (CaTiO_3) şeklinde kırmızı çamur ile uzaklaştırılmaktadır. Ancak, NaHTiO_3 formasyonu ısıtıcılarda ısı transfer katsayılarını önemli derecede etkilemekte ayrıca iletim boru çaplarının daralmasına neden olmakta dolayısıyla rejenere buharın değerlendirilmesinde sınırlayıcı rol oynamaktadır (Vural, 1977). Boksit cevherinin liç sırasında reaksiyon girme sıcaklığı, boksit tür ve yapısına göre değişmektedir örneğin gibsit $140\text{-}150^\circ\text{C}$ 'de çözünürken böhmit ise yaklaşık 220°C 'de çözünmektedir.

Boksit cevherinde bulunan Ti minarelleri yüksek sıcaklıklarda, boksit yüzeyini jelatinsi bir film gibi kaplayarak boksitin çözünmesini engelleyerek sodyum titanları oluştururlar. Genellikle rutil minareli yüksek sıcak tepkimeye girmezken anataz ise daha yüksek sıcaklıklarda tepkimeye girerek alümina verimini azaltmaktadır (Ireland vd., 2014; Dickson vd., 2017).

Sülfürlü minareller ve etkileri: Boksitler genellikle kükürt ihtiva etmezler. Nadirinde olsa kükürt cevher içerisinde pirit (FeS_2) markasit (FeS_2) veya alunit ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) halinde bulunabilir. Kükürdün bir kısmı alüminat çözeltisine kadar geçebilir ve nöselit ($5\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{SO}_3$) halinde soda ve

alümina kaybına sebep olur. Kalsinasyon işlemi sırasında organik yakıttan kaynaklı kükürdün bile alüminaya geçebildiği belirtilmektedir (Özen, 2015).

Diğer safsızlıklar: Bunun yanı sıra boksitlerde bulunan kalsiyumlu bileşiklerin oranı %1-2'ye kadar çıkabilmektedir ve bu bileşiklerin çoğunlukla dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ve apatit ($\text{CaF}_2 \cdot 3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) halinde bulunduğu aktarılmaktadır (Özen, 2015). Karbonat mineralleri Bayer prosesinde soda oluşturması nedeniyle önemlidir. Na_2CO_3 boru hatlarında tıkanmalara yol açtığı ve evaporasyon bölümünde ısı geçirgenlik katsayılarını düşürücü rol oynadığı için belli bir seviyenin üzerinde kireç ile kostifikasyona tabi tutulur. Boksitlerin bünyesinde genellikle az miktarda fosfor(P), flor(F) ve vanadyum(V) bileşikleri de bulunur. Boksitlerin çözünürleşmesi sırasında bu elementler kısmen alüminat çözeltisine geçerek proses üzerinde olumsuz etkiler yaparlar; alüminat çözeltilerinde (V) ve (P) tuzlarının bulunması çözelti stabilitesini düşürücü bir rol oynar ve üretilen hidratin kristal tane boyutu küçülür. Fazla miktarlarda (P) da hidrat tane boyutunu düşürücü rol oynar. Diğer bir safsızlık olan vanadyum, alüminanın elektroliz aşamasında elektrik iletkenliğini düşürücü etkiye sahiptir. Bu nedenle çözeltideki (V) alümina kalitesini bozucu ve çözelti stabilizesini etkileyici bir orana geldiğinde sistemden uzaklaştırılmalıdır. Diğer taraftan boksitlerde bulunabilecek organik maddeler evaporasyon bölümünde buharlaştırma prosesini olumsuz yönde etkilemekte ve aparatların kirlenmesine sebep olmaktadır. Ayrıca köpük teşekkülüne neden olduğundan fabrikanın çeşitli bölümlerinde faydalı hacimlerde azalmalar söz konusu olmaktadır (Vural, 1977). Bayer prosesinde çözelti içerisine alınan fosfor çözünmede sodaya karşı oldukça aktif bir rol oynar yarak soda kayıpları neden olmaktadır (Martin, 2001).

2.4. Türkiye’de Boksit Yatakları ve Özellikleri

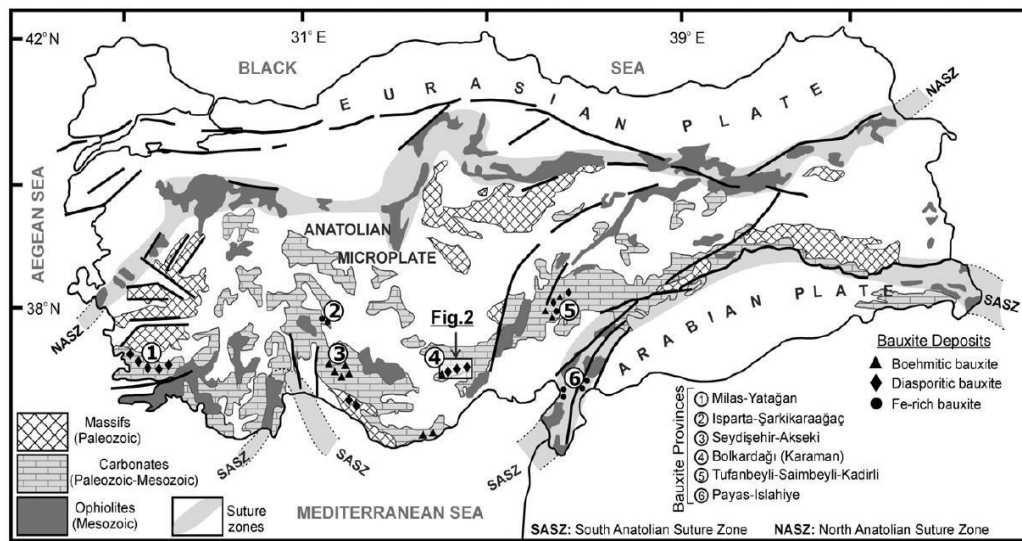
Dünya boksit rezervlerinin toplam 55 ila 75 milyar ton civarında olduğu tahmin edilmektedir. Bu rezervin Afrika'da %32, Okyanusya %23, Güney Amerika ve Karayipler'de %21, Asya'da %18 ve diğer ülkelerde ise %6 olarak dağılım gösterdiği bildirilmektedir. Ülkeler bazında düşünüldüğünde ise boksit rezervlerinin çok az sayıda ülkede yoğunlaşma gösterdiği görülmektedir (Şekil 2.2). Dünya boksit rezervlerinin neredeyse üçte ikisi Gine, Avustralya, Jamaika ve Brezilya'da bulunmaktadır. Hatta yalnızca Gine ve Avustralya'nın sahip olduğu boksit

rezervlerinin neredeyse dünya boksitlerinin yarısını oluşturmaktadır. Dünya boksit rezervlerinin yalnızca %0,4'lük kısmı Türkiye'de bulunmaktadır (Vassiliadou, 2014).



Şekil 2.2. Dünyada büyük boksit rezervlerine sahip ilk on ülke (Vassiliadou, 2014).

Türkiye'de bugüne kadar tespit edilen yaklaşık 200'e yakın boksit oluşumuna rastlanılmıştır. Bu oluşumlar Şekil 2.3'de görüldüğü gibi çoğunlukla güneyde ve batıdan doğuya uzanan Toros Kuşağı'nda bulunmaktadır. Türkiye'nin önemli boksit yatakları ve bazı özellikleri Çizelge 2.7'de ayrıca belirtilmiştir. En önemli boksit yatakları Milas (Muğla) çevresinde zımpara yatakları ile birlikte bulunan diyasporit, Akseki (Antalya)-Seydişehir (Konya) ve İslâhiye (Gaziantep)-Payas (Hatay) yataklarıdır. Diğerleri ise, Akşehir, Yalvaç, Alanya, Konya, Kokaksu (Zonguldak) Adana, Kahramanmaraş'ta bulunan boksit yataklarıdır. Yalvaç boksit yatakları dışında kalan diğer tüm yataklar karbonatlı boksitlerdir (Çağatay ve Arman, 1982; Uyanık vd., 2016).



Şekil 2.3. Türkiye'nin önemli boksit yatakları (Uyanık vd., 2016)

Çizelge 2.7. Türkiye’de bulunan önemli boksit yatakları ve özellikleri

Bulunduğu Bölgeler	Mineralojik Karakteri	Oluşum Tipleri	Tenör (%)		Kaynak
			Al ₂ O ₃	SiO ₂	
Milas-Yatağan	Böhmitik	Karst-Allokton	~43-55	~4-14	Anonim, 2019f
Isparta Şarkikaraağaç	Diyasporitik Böhmitik (Demirli)	Lateritik-Allokton	~33-45	~10	Öncel ve Soğüt, 2008
Seydişehir-Akseki	Böhmitik	Karst-Yarı Allokton	~57	~7	Karadağ vd., 2009
Bolkardağı-Karaman	Diyasporitik Böhmitik (Demirli)	Karst-Allokton	~53	~12	Hanılçı, 2013
Adana-Saimbeyli	Diyasporitik	Karst-Allokton	~50-52	~6-10	Anonim, 2019g
Payas-Islahiye	Diyasporitik Böhmitik (Demirli)	Karst-Yarı Allokton	~7-35	~13-25	Koç ve Değer., 1992
Zonguldak-Kokaksu	Böhmitik (Kısmen gibsit içerir)	Karst-Yarı Allokton	~45	~14	Alp, 1999

Muğla (Milas-Yatağan) boksitleri: Menderes masifinin örtü serisi olan kristalize kireç taşlarının 150-200 metresinde, diskordans, karstik rölyeflere eriyen taban kireç taşlarının arasında yer alan terrarosa oluşumlu boksitik jellerin çökelp üzerine gelen tavan kireçtaşları arasında kalıp muhtemelen hersiniyenorojenezi ile şiddetli metamormizmaya uğrayarak diyasporik boksitler oluşmuştur. Cevher dairesel damar şeklinde GGD-KKB doğrultusunda, genellikle 60° GGB eğimindedir. 2-8 metre kalınlığında, 350-380 metre uzunluğunda ve ekonomik olarak kabul edilen derinlik ise 80-85 metre civarındadır. Milas diyasporit yataklarından alınan örneklerin mikroskopik incelemelerinde fazla oranda diyasporit yanında ve çok az oranlarda hematit (Fe₂O₃), manyetit (Fe₃O₄), periklas (MgO), kuvars (SiO₂), kalsit (CaCO₃), korund (Al₂O₃), rutil (TiO₂) ve ilmenit (FeTiO₃) saptanmıştır. Diyasporitler hematit (Fe₂O₃) ile yan yana iç içe oluşmuş kısmen submikroskopik hematit ile kırmızıya

boyanmıştır. Yer yer çok iri dijaspor kristalleri görülebilmektedir. Diyaspor dan sonra en fazla bulunan hematit (Fe_2O_3) içerisinde çok az manyetit (Fe_3O_4) artığına da rastlanmaktadır. Yatak ortalama %55,8 Al_2O_3 ve %10,2 SiO_2 tenörüne sahiptir (Wipperf, 1964; Çağatay ve Arman, 1982; Saatcioğlu, 2004).

Şarkikaraağaç (Isparta) boksitleri: Şarkikaraağaç'ın güneyinde bulunan boksit yataklarının mineralojisi kökeni, kimyasal bileşim ve oluşum yaşı bakımından birbirleriyle ilişkileri bulunmayan tabakalı bir cevher kuşağının yüzeyinde oluşmuştur. Alt tabaka genellikle alt ve orta kambriyen yaşlı Çaltepe Formasyonu'na ait dolomitler ile diğer yaşlı Feletepe Formasyonu'na ait kayaçlar arasında demirli boksit yataklarını temsil eder. Başlıca mineralleri dijaspor, hematit (Fe_2O_3), böhmite, şamozit, kaolinit, pirokroit ve götittir. Yatakları oluşturan kaynak kaya türü Sultandağları'nın kuzeyinde gözlenen Ordovisiyen zamanda oluşmuş yaşlı kırmızı kumtaşlarıdır. Lateritik oluşum gösteren ve demirli boksitler sınıfına giren bu yataklar ortalama %33,32 Al_2O_3 , %14,79 SiO_2 , %38,48 Fe_2O_3 , %4,21 TiO_2 tenörüne sahiptir (Ayhan ve Karadağ vd., 1985; Öncel, 1995).

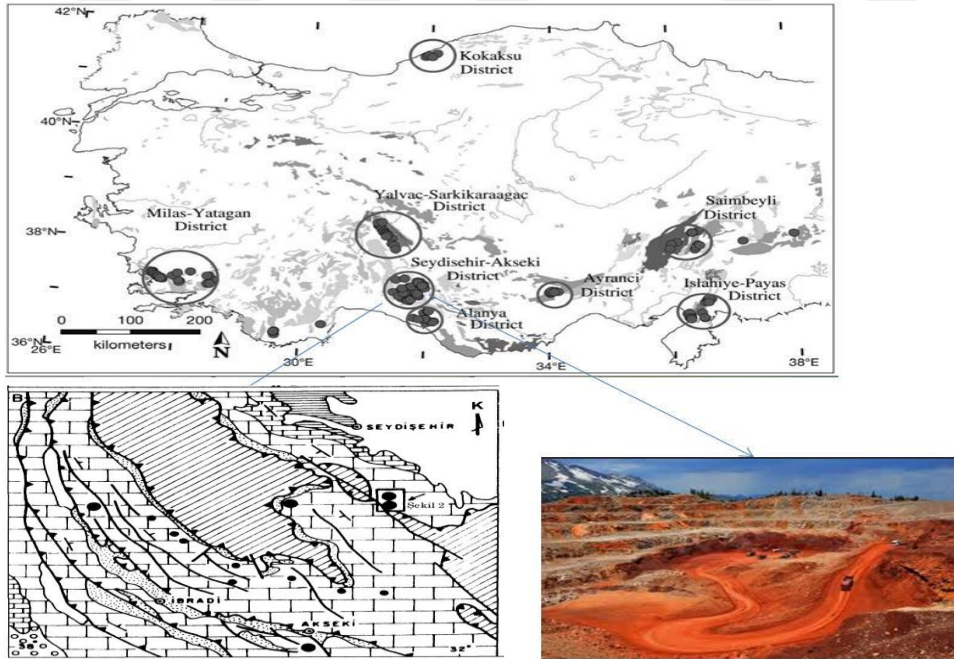
Küçükkoraş (Ayrancı-Karaman) boksit yatakları: Bolkardağı (Karaman) Ayrancı ilçesinin 15 km güneydoğusunda bulunan ve yaklaşık 300 km^2 'lik bir sahayı kaplayan boksit yatağında farklı yapıda cevher tipleri olduğu görülmektedir. Başlıca dijaspor, hematit ve kil mineralleri içeren bu cevher tipleri siyah boksit, kahverengi boksit, oolitik boksit ve killi boksitlerdir. Bölgede Miyosen yaşlı oluşumların bindirdiği tektonik naplardan birisi olan Bolkardiyen Biriminde Permiyen-Kretase yaşlı bir kaya bulunur. Üst Permiyen Dedeköy Formasyonu'na ait dolomitler ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ile kireçtaşları arasında boksit minerallerine rastlanılmaktadır. Boksit oluşumlarının Genç Triyas-Erken Jura Dönemi'nde ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. Boksit cevherlerinin porojenezindeki önemli mineralleri dijaspor ($\text{AlO}(\text{OH})$), hematit (Fe_2O_3), anataz (TiO_2), kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), rutil (TiO_2), kalsit (CaCO_3), muskovit ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), manyetit (Fe_3O_4), kuvars (SiO_2), götit ($\text{HFeO}_2 \cdot \text{FeO}(\text{OH})$), klorit ($\text{Mg,Fe,Al}_6(\text{Si,Al})_{40}\text{O}_{10}(\text{OH})_8$), ve alüminyum hidroksit, gibsit, böhmite, illittir. Boksit bünyesinde, farklı görünüşe sahip farklı cevher türleri tanımlanabilmekte (Kansun vd, 2010) ve ortalama %55 Al_2O_3 , %26 Fe_2O_3 , %3,5 SiO_2 ve %3,5 TiO_2 içeriğine sahiptir. Lateritik tortular daha yüksek silis içeriğine (ortalama %21 SiO_2) sahiptir (Hanilci vd., 2006; Hanilci, 2013).

Kokaksu (Zonguldak) boksit yatakları: Kokaksu Vadisi boyunca uzanan bu yataklar böhmitik boksitler sınıfında değerlendirilmektedir. İrili ufaklı oluşum gösteren bu yataklardan en büyüğü 1 km uzunluktadır ve 50 m ile 500 m arasında değişen genişliğe sahiptir. Dolomitik kireçtaşları içinde bulunan boksitler kumtaşları ile örtülmüştür. Pisolitik yapıli sert cevherin başlıca mineralleri en çok diyaspor, böhmite, limonit yanında az miktarda hematit, rutil, anataz ve kil mineralleridir. Cevherde demir minerallerin azaldığı bölgelerde kırmızı-kahverengi, sarımsı, yeşilimsi ve griye geçişlidir. Kimyasal analiz sonuçlarına göre boksit cevheri ortalama olarak %54 Al_2O_3 , %24 Fe_2O_3 , %6 SiO_2 ve %2,3 TiO_2 içermektedir. Batı ve orta Toroslar'daki boksit yatakları alt kretase kireçtaşları içerisinde oluşmuşken, Kokaksu yatakları dolomitik kireçtaşları içinde bulunmaktadır. Karbonatlı boksit yatakları kireçtaşları karstik boşluklarını doldurmakta ve çökel kayalarla uyumsuz şekilde örtünmektedir. Karasal ortamda kireçtaşlarının karstikleşmesi ile birlikte alüminyumca zengin silikat kayalarda boksitleşme meydana gelmiştir (Çağatay ve Arman, 1982).

Hatay (Payas-İslahiye) boksit yatakları: Boksitler, killi kireçtaşları ile ara katlı Kretase yaşlı kireçtaşları içinde yataklanmışlardır. Bu birim ve boksit yatakları uyumsuz şekilde kalınlıkları birkaç metre ile 15-20 m arasında değişen fosilli kireçtaşları ile örtülmüştür. Bölgenin diğer kayaları Paleozoik yaşlı şistler ve kuvarsitlerle yerleşmiş yapı Üst Kretase olan ofiyolitik biçimdedir. İslâhiye-Payas boksitleri tamamen limonit ve hematitten dolayı kırmızı ve kahverengi görünümündedir. En fazla karşılaşılan boksit minerali diyaspordur. Diyaspor yer yer limonit ve hematitin çatlak ve aralarını dolduran damarcıklar, yer yerde bu minerallerde böbreğimsi büyüme oluşturmaktadır. Cevherde çok az pisilomelan görünmektedir. Diyaspor bazen değişik kaynaklarda bantlı yapıli gösterilmektedir. Temel bileşenleri diyaspor yer yer demir mineralleri içermektedir. Az miktarlarda kaolinit, böhmite, gibsite hematit ve limonit içermekte ve damarlar şeklinde kesmektedir. İslâhiye-Payas boksitlerinin hematit, manyetit, rutil, anataz ve kromit tanecikleri içermesi boksitin kökenin ofiyolitik yapıda olduğunu ve dolayısıyla alüminyumca zengin olabileceğini göstermektedir. İslahiye boksitleri ortalama %7-35 Al_2O_3 , %13-25 SiO_2 ve %38 Fe_2O_3 içermektedir (Wipperf, 1964; Çağatay ve Arman., 1982; Koç ve Değer, 1992).

2.4.1. Seydişehir (Konya) bölgesi boksit yatakları

Seydişehir’de bulunan ve hala hazırda işletilmekte olan Doğankuzu ve Mortaş boksit yatakları Türkiye’nin en önemli karstik tipi boksit yataklarıdır. Türkiye'nin ekonomik açıdan değerlendirilebilir boksit yatakları (Şekil 2.4)’te görüldüğü gibi Toros Dağları’nın merkezi olan Seydişehir-Akseki bölgesini oluşturmaktadır. Bu bölgedeki en önemli boksit yatakları Mortaş ve Doğankuzu yataklarıdır. Boksit yataklarında böhmite, diaspor, hematit, rutil, smektit, pirit, kuvars, kalsit, markazit ve götit bulunur. Rengi kahverengi ile kırmızı arasında olan boksit mineralleri masif, oolitlik ve pizolitlik dokuludur. Mortaş yatağı yaklaşık 5 milyon ton rezerv sahtir ve %50 Al_2O_3 tenörlüdür. Doğankuzu boksit yatağı ise Mortaş yatağının 2 km güneybatısındadır. %61 Al_2O_3 tenörlü bu yatak yaklaşık 15 milyon ton boksit rezervine sahtir. Bu yatakların her ikisinden de açık işletme yöntemiyle boksit üretimi yapılmakta ve çıkarılan cevher Seydişehir Alüminyum Tesisleri’nde işlenmektedir. Seydişehir alüminyum fabrikası verilerine göre boksit cevherinin kimyasal bileşimi ortalama %59 Al_2O_3 , %16 Fe_2O_3 , %8 SiO_2 , %2,5 TiO_2 ve %12 kızıdırma kaybı şeklindedir.



Şekil 2.4. Türkiye’de bulunan boksit yatakları ve Seydişehir-Akseki boksit sahası (Öztürk ve Hanilçi, 1999)

Oluşumu ve jeolojik yapısı: Mortaş yatağı boksitleri homojen yapıda olmayıp fiziksel, kimyasal, mineralojik ve petroğrafik özelliklerinde farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar yatak içinde düzgün bir dağılım göstermemektedir. Boksitin rengi demir oksitleri ve demir hidroksitlerinin miktarına bağlı olarak değişmektedir. Genellikle krem sarısı, kiraz kırmızısı ve kırmızımsı kahverengi boksitler çoğunluktadır. Boksitin göz ile görünümü topraksı ve soluktur. Oldukça sert olan boksit çekiçe küçük boyutlara zorlukla kırılmakta ancak enlem düzlemleri boyunca küçük parçacıklara ayrılmaktadır. Bu küçük parçacıklar çoğunlukla rombohedral şeklindedir. Boksit yatak içinde herhangi bir tabakalaşma veya herhangi bir dokusal özellik göstermemekle beraber bazı yerlerde önemsiz birkaç küçük konkresyon göze çarpmaktadır. Eldeki örneklerle boksitte bakıldığında boksitin tek türlü bir yapı gibi görünmektedir. Boksite mikroskop altında bakıldığında ise, dış görünümünden çok farklı olduğu ve çeşitli dokusal özellikler gösterdiğini görülmektedir. Boksit çoğunlukla çok ince boyutta ve amorf olup içerisinde bazı küçük boksit parçacıkları bulunmaktadır. Bu küçük boksit parçacıklarının yanı sıra oolite benzer konkresyonlar ve taşınmış boksit parçacıkları dikkati çekmektedir. Konkresyonların boksit içindeki dağılımı çoğunlukla düzensiz olsa da bazı kısımlarında konkresyonların bir araya gelebildiği görülmektedir.

Kalitatif mineraloji ve kimyasal veriler minerallerin yatak içinde homojen bir dağılıma sahip olmadığını göstermektedir. Yatak içinde miktarı en fazla olan alüminyum minerali böhmittir. Yatağın büyük bir kısmında saptanamayacak kadar az miktarda dijaspor bulunduğu için bu oran önemsizdir. Böhmite ek olarak yatakta bulunan diğer alüminyum mineralleri az miktarda dijaspor, gibsit, kaolinit ve montmorillonittir. Yatakta bulunan demir mineralleri ise hematit, götit, hidrohematit ve hidrogötittir. Mortaş boksit yatağının oluşumu aşağıda açıklandığı şekilde olabilir: Alt Kretase kirektaşları kimyasal bozuşmayla erir, erimeyen maddeler ise kireçtaşı üzerinde birikir. Erimeyen maddeler içindeki silika alkali suların etkisiyle erir ve taşınır. Erimeyen maddenin bozuşması sonucu geriye alujeller, amorf demir oksit ve amorf demir hidroksi oksitleri kalır. Titanyum minerali olarak sadece anataz bulunmaktadır. Gibsit ve kaolinit sadece çatlaklarda mekanik karışımlar halinde görülmüş olup bunların boksitin bozuşması sonucu oluşmuş ikincil mineraller olduğu düşünülmektedir (Atabey, 1976; Öztürk vd., 2002).

Mineralojisi ve Jeokimyası: Mortaş ve Doğankuzu boksit yatakları KB-GD doğrultulu ve GB'ya eğimli olarak Mortaş Tepe'den Doğankuzu Tepesi'ne kadar devamlılık göstermektedir. Cevherleşmede taban ve tavan ilişkilerinin en iyi gözlemlendiği yer Doğankuzu Tepe'nin güney yamaçlarıdır. Burada dik bir yarda, eğim yönünde bütün birimler geçilmekte ve cevherin taban ve tavan kireçtaşları arasındaki konumu ayrıntılarıyla izlenebilmektedir. Bu bölgeden alınan örnekler üzerinde yapılan incelemelerde boksitlerdeki birincil minerallerin böhmite, hematite, rutil, smektit, kuvars, kalsit ve tridimit olduğu saptanmıştır. Cevherde ayrıca pirit, markasit ve yer yer diyor bulunduğı; daha az oranda kaolinite, anataz, götite içerdığı aktarılmaktadır (Karadağ vd., 2009). Mortaş boksitleri ile kıyaslandığında Doğankuzu boksitlerinin Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O ve TiO_2 içeriklerinin daha yüksek, buna karşılık SiO_2 , CaO ve K_2O içeriklerinin ise daha düşük olduğu bilinmektedir (Öncel, 1995; Öztürk vd., 2002).

2.5. Türkiye'de Alümina ve Birincil Alüminyum Üretimi

Türkiye' alüminyum metal kullanımına 1950'li yıllarda başlanmıştır. 1956 yılında çok küçük ve az sayıda atölyelerde ancak 100 tona kadar alüminyum işleniyordu. İşlenen alüminyum metalinden özellikle alüminyum profiller yapılmakta idi ve bu profil ürünler başlıca inşaat-yapı sektöründe kullanılmaktaydı. 1960'lı yıllara gelindiğinde ise, taşıt ve dayanıklı tüketim malları sanayilerinin kurulması, inşaat faaliyetlerinin artması ve enerji yatırımlarına paralel olarak iletişim şebekelerine yapılan yatırımların gelişmesi sonucu alüminyuma olan talep hızla artmaya başladı. Özellikle de alüminyumun inşaat sektöründe kullanımının yaygınlaştığı bu yıllarda alüminyumla ilgili yeni yeni kuruluşlar kurulmaya başladı. Ancak o dönemde hammadde teminini sağlayacak tesis olmadığından firmalar ithalat yoluyla hammadde teminine gidiyorlardı. Daha sonraları artan talebe bağlı olarak alüminyum ihtiyacının yurtiçinden karşılanması amacıyla boksit aramalarına başlandı. Aramalar sonucunda Maden Tetkik Arama (MTA) tarafından Seydişehir'in Mortaş ve Doğankuzu mevkiilerinde işletilebilir boksit rezervleri tespit edildi. Tespit edilen bu sahalar 1965 yılında işlemek amacı ile ETİBANK'a devredildi. Kamu sektörü bu alandaki çalışmalarına hız vererek 1974 yılında Seydişehir Alüminyum Tesisleri üretime başladı. Sektörde 1970'li yıllarda görülen en önemli gelişme, hammaddenin (boksit madeni) yurtiçinde üretilmesine başlanması olmuştur. Bu durum, özellikle küçük

boyutlu işletmelerin hızla kurulmasını teşvik etmiştir. Ayrıca alüminyumun uç ürünlere dönüştürülmesi ve ürün çeşitliliğinin artması sektörün gelişmesine önemli katkı sağlamıştır. 1980’li yıllarda alüminyum sektöründe teknoloji transferinin ve kapasite artışının olduğu dönemler olmuştur. Ancak, Seydişehir Alüminyum Tesislerinin sıvı alüminyum üretiminde tek kuruluş olması ve kapasitesinin artan yurtiçi talebi karşılayamaması nedeniyle 1985 yılından itibaren de ithalat yapılmaya başlanmıştır. 1990’lı yıllarla birlikte Türkiye’deki alüminyum kullanım alanlarındaki artış devam etti. Ayrıca bu dönemde sektör ihracata da yönelmeye başladı. Sektörün örgütü olan ve 1971’de kurulan Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği (TALSAD) de 1992’de Avrupa Alüminyum Birliği’ne üye olmuştur (Günay, 2006). Türkiye’de alüminyum üretiminde bulunan önemli kuruluşlar Çizelge 2.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.8. Türkiye’de alüminyum üretiminde bulunan önemli kuruluşlar (Alan, 2008)

	<i>Kuruluş Adı-Özel Sektör (Sektörde kamu kuruluşu yoktur)</i>	<i>Bulunduğu Şehir</i>	<i>Üretim Konusu</i>
1	ETİ Alüminyum A.Ş.	Konya	Birincil
2	Assan Demir ve Sac San. A.Ş.	İstanbul	Yassı Üretim
3	CMS Jant ve Makine Sanayi A.Ş.	İzmir	Döküm
4	Asaş Alüminyum San. ve Tic. A.Ş.	İstanbul	Ekstrüzyon
5	CrownBevcan Ambalaj San. ve Tic. A.Ş.	Kocaeli	İçecek Kutusu
6	Has Çelik ve Halat San. A.Ş.	Kayseri	İletken
7	Kale Oto Radyatör San. ve Tic. A.Ş.	İstanbul	Döküm
8	Saray Döküm ve Madeni Aksam San. A.Ş.	İstanbul	Ekstrüzyon
9	Şahinler Metal San. ve Tic. A.Ş.	Ankara	Biyet ve külçe döküm
10	Cevher Döküm San. A.Ş.	İzmir	Döküm
11	Teknik Alüminyum San. A.Ş.	İstanbul	Yassı Üretim
12	Feniş Alüminyum San. ve Tic. A.Ş.	Kocaeli	Ekstrüzyon
13	Erdoğanlar Alüminyum San. ve Tic. A.Ş.	İstanbul	Ekstrüzyon
14	İspak İzmit Sıvı Paketleme San. A.Ş.	İstanbul	Ambalaj
15	Altın Kablo San. A.Ş.	İstanbul	İletken
16	P.M.S Metal Profil Alüminyum San.ve Tic. A.Ş.	Bursa	Ekstrüzyon
17	Çuhadaroglu Metal San ve Paz. A.Ş.	İstanbul	Ekstrüzyon
18	Aksan Metal San. ve Tic. A.Ş.	İstanbul	Ekstrüzyon

Türkiye'de boksit üretimi Doğankuzu-Mortaş sahalarında açık işletme yöntemiyle yapılmaktadır. Daha önce yeraltı ve açık işletme şeklinde yürütülen Milas Boksit İşletmesi'nin faaliyetlerine son verilmiştir.

Türkiye'de birincil alüminyum üretimi yalnızca Seydişehir'de Kurulu bulunan ve yıllık 200,000 ton alümina üretim kapasitesine sahip ETİ Alüminyum A.Ş. tarafından yapılmaktadır. Alümina tesisinin maksimum boksit talebi 450,000 ton/yıl civarındadır (normal kapasite 400,000 ton/yıl). Zaman zaman tenör, modül ve diğer hususlara bağlı olarak bu talep 500,000 ton düzeyine ulaşabilmektedir. Seydişehir'de üretilen alüminanın 120,000 tonu sıvı alüminyuma dönüştürülmekte, kalan 80,000 tonu ise uzun vadeli sözleşmeler veya spot piyasalarda satılmaktadır (Onüçyıldız vd., 2013).

ETİ Alüminyum A.Ş., her biri başlı başına birer fabrika niteliğinde olan maden işletmesi, alümina ve alüminyum üretim tesisi, dökümhane ve haddehane üniteleri ile 4'ü yardımcı üretim birimi olmak üzere toplam 24 destek biriminden oluşmaktadır (Şekil 2.5). Boksit sahalarının Etibank'a devrinden sonra da Seydişehir ve Akseki bölgelerinde, 1985 yılına kadar devam ettirilen arama çalışmaları sonunda, 19 milyon ton görünür rezerv artışı sağlanarak, bölgenin toplam boksit cevher potansiyeli 47 milyon ton seviyesine ulaştırılmıştır. Günümüzde tesisler yılda 461,400 ton boksit işleme, 200,000 ton kalsine alümina ve 60,000 ton birincil alüminyum üretim kapasitesine ulaşmıştır. Sıvı alüminyum dökümhane ve haddehanede işlenerek çeşitli vasıf ve ebatta külçe, ingot, profil, levha, rulo ve folyo halinde piyasaya sunulmaktadır. Ayrıca kâğıt, tekstil, kimya sanayi ve su arıtma ünitelerinde değişik amaçlar için kullanımı olann alüminyum sülfat ($Al_2(SO_4)_3$) üretimini amacıyla 1980 yılında alüminyum sülfat fabrikası tesislere dahil edilmiştir.

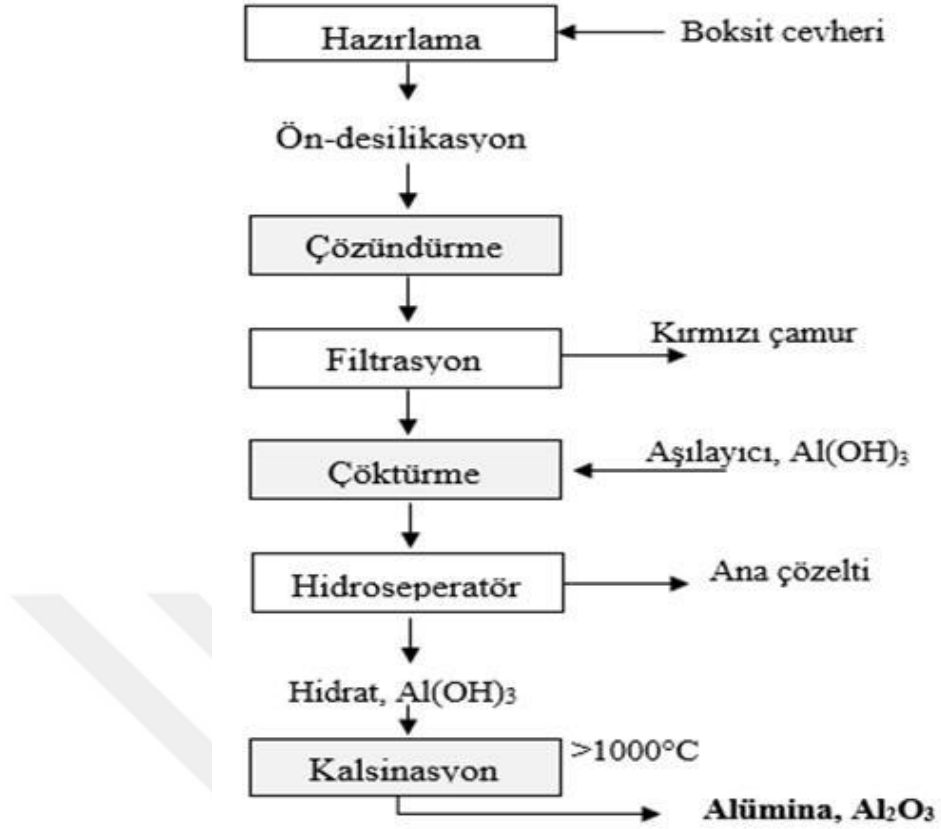
ETİ Alüminyum A.Ş. Genel Müdürlüğü 13.08.2003 tarih ve 2003/49 sayılı Özelleştirme Yüksek Kurulu kararı ile özelleştirme kapsam ve programına alınan ülkemizin tek alüminyum üretim entegre tesisleri, Eylül 2005 tarihinden itibaren Cengiz Holding bünyesinde faaliyetlerine devam etmektedir (Onüçyıldız vd., 2013).



Şekil 2.5. Eti Alüminyum AŞ'ye ait bir görüntü (Anonim, 2019e)

2.6. Bayer Prosesiyle Boksit Cevherlerinden Alümina Üretimi

Bayer prosesi Avusturyalı Karl Joseph Bayer tarafından 1887 yılında uygulanmaya başlanmıştır. Dünya alümina üretiminin %90'dan fazlası, yüksek saflıkta ürün veren, genel olarak basit bir teknolojiye sahip olan Bayer prosesi ile sağlanmaktadır. Bayer prosesine ait temel işlemleri gösteren genel akış şeması Şekil 2.6'de verilmiştir. Dünya genelinde, Bayer prosesi ile gerçekleştirilen alümina üretiminde boksit cevheri uygun boyuta kırıldıktan sonra NaOH sulu ortamda değirmenlerde öğütülerek ham pülp (katı-sıvı karışımı) haline getirilir. Gibbssit ve/veya böhmit bakımından zengin boksit cevherlerin yüksek sıcaklıklarda ve basınç altında NaOH çözeltisi ile reaksiyona sokulmak suretiyle, kimyasal yolla cevherdeki alüminyum hidroksit (Al_2O_3) çözünerek sodyum alüminat ($NaAlO_2$) çözeltisi halinde sıvı faza geçer ve demir, silis, titanyum vb. gibi katı safsızlıkları içeren yeni bir pülpü oluşturur. Pülpdeki çözünmemiş bileşikler çökeltme tankının dibine çöktürülerek biriktirilen katı atıklar (bu katılar genellikle demir oksitler, kuvars ve diğer minerallerin içerisinde buluduran kırmızı çamur ve kırmızı kum) sodyum alüminat çözeltisinde bulunan kostik çözeltileri geri kazanmak için yıkanıp daha sonra kurutma depolarına pompalanır. Yıkanmış çamur, bu iş için inşa edilen çamur barajına sevk edilip depolanmakta ve ihtiva ettiği kostik sodanın çevreyi kirletmesi önlenmektedir.



Şekil 2.6. Bayer prosesi genel akım şeması

Başka bir tanka gönderilen istenilen temizlikteki sodyum alüminat çözeltisi aşılansarak alüminyum hidroksit (hidrat= $\text{Al}(\text{OH})_3$) kristali halinde çöktürülür. Elde edilen hidrat, fırınlarda 1100–1200 °C sıcaklıkta kimyasal bağlı suyu uçurmak amacıyla kalsine edilerek alümina elde edilmektedir (Hacıoğlu, 2007., Riessen vd., 2013). Cevher tipine göre boksitlerin çözünme sıcaklığı ve basınç değerleri Çizelge 2.9’te verilmiştir.

Çizelge 2.9. Boksitlerin NaOH çözeltisinde tepkimeye girme sıcaklık ve basınçları

Boksit cevheri tipi	Sıcaklık (°C)	Basınç (atm)
Gibsitik boksitler	>100	3-7
Böhmitik boksitler	>200	28-40
Diyasporik boksitler	>240	46-60

Eti Alüminyum A.Ş. Alümina Üretim Fabrikası: Bayer prosesi ile alümina (ve alüminyum) üretiminin gerçekleştiği Seydişehir Alümina Fabrikası'nda dört ana işlem kademesi bulunmaktadır (Alp vd., 2008). Bunlar;

- i. Hammadde ve çözelti hazırlama,
- ii. Boksit çözündürme,
- iii. Hidrat ($\text{Al}(\text{OH})_3$) üretimi,
- iv. Kavurma ve Al_2O_3 üretimi

i.Hammadde ve çözelti hazırlama: Hammadde hazırlama bölümünde, boksit cevheri Bayer prosesinde işlenebilir duruma getirilir. Panolarda stoklanan cevher Bayer prosesinin gerektirdiği silis modüllünü sağlayacak şekilde taşıyıcı araçlarla kırıcı bunkerlerine taşınır. Panolardan alınan boksitlerin harmanlanmasında silis modüllü'nün ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) 7'nin üstünde olmasına dikkat edilmektedir. Bu oran, genellikle düşük silis modüllü ve yüksek modüllü boksit cevherinin belirli miktarlarda karıştırılıp harmanlanmasıyla sağlanmaktadır.

Boksit cevherinin kırılıp depolanması: Kırıcı bunkerine alınan boksit cevheri, çekiçli kırıcılarla 25-40 mm' nin altına kırılarak stoklanır. Kırıcının saatlik kapasitesi kırma boyutuna bağlı olarak 260-500 ton arasında değişmektedir. Kırılan boksit 8.000 ton kapasiteli 2 kapalı alanda depolanır. Depolama sırasında boksitin tam kimyasal analizi yapılarak özellikle silis modülü kontrol edilmektedir. Depolanan boksit, bilyalı değirmende yaş olarak öğütülmek üzere bantlarla bilyalı değirmen bunkerlerine sevk edilir. Bunkerler 3 adet olup her birinin kapasitesi yaklaşık 1.000 tondur.

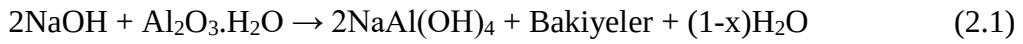
Yaş Öğütme: Kırılmış boksitin Bayer prosesinde gerekli olan tane ebadına düşürülmesi için iki kademeli yaş öğütme sistemi seçilmiştir. Öğütme sonunda Bayer prosesine beslenmek istenilen cevherin tane boyu için sınır değerler şu şekildedir. +100 mesh (-149 μm) tane iriliğindeki malzeme oranı en fazla %4 iken, -270 mesh (-53 μm) tane iriliğindeki malzeme oranı ise en az %75 olmalıdır (Hacıoğlu, 2007).

Çözelti hazırlama: Boksit bünyesinde bulunan çeşitli safsızlıkların, özellikle SiO_2 içeren mineraller kostik kayıplarına sebep olur. Bu kayıpların karşılanması için prosese sürekli olarak taze sıvı kostik ilave edilmektedir. Çözeltideki Na_2O konsantrasyonu 450-550 g/L olacak şekilde ayarlanmaktadır. Çözelti daha sonra toplam hacmi 2300 m^3 olan 3 adet tankta toplanmakta ve ihtiyaç duyulan miktarlarda sisteme ilave edilmektedir (Hacıoğlu, 2007).

ii.Boksit çözündürme: Bu bölüm otoklavlar ve kırmızı çamur bölümünü kapsar. Otoklavlarda kostikli sıvıda öğütülmüş boksit belli bir basınç ve sıcaklık altında kimyasal reaksiyona girerek (Reaksiyon 2.1) Al_2O_3 'ü sıvı faza geçmekte ve geriye kırmızı çamur kalmaktadır. Kırmızı çamur ünitesinde; çözünmeyen bileşikler çöktürülmek suretiyle temiz sodyum alüminat çözeltisi elde edilmekte ve 6 kademe yıkamadan sonra atık olarak kalan kırmızı çamur boru hatları ile çamur atık barajına gönderilmektedir. Otoklavlar kısmı; ham pülp karıştırıcıları, pistonlu pompalar, ısıtıcılar, otoklavlar, separatörler, seyreltme karıştırıcıları ile ilgili tank ve boru bağlantılarını kapsar.

Otoklavlar: 4 otoklav bataryası vardır. %100 kapasitede 3 batarya çalışır, 1 batarya yedektir. Bir otoklav bataryasında ikisi ısıtma sekizi reaksiyon otoklavı olmak üzere 10 adet otoklav bulunur. 2. grup ısıtıcılardan 160 °C'de gelen pülp, ısıtma otoklavlarında kazan dairesinden gelen buharla reaksiyon sıcaklığı olan 240 °C' ye ısıtılır ve reaksiyon süresi 2 saattir.

Seperatörler: Kimyasal reaksiyonunu tamamlamış pülp, yaklaşık 238°C ve 27,5 Atü basınçtan, 4 kademe seperatörden geçirilerek atmosferik şartlara indirgenir. 1. ve 3. kademe seperatörlerden çıkan buhar ısıtıcılarda, 2. kademedan çıkan buhar buharlaştırma bölümünde ve 4. kademedan çıkan buhar ise sıcak su üretiminde kullanılır (Hacıoğlu, 2007).



iii)Hidrat ($Al(OH)_3$) üretimi: Bu bölümde, otoklavlar ve kırmızı çamur bölümünde elde edilen sodyum alüminat çözeltisi ($NaAl(OH)_4$) hidroliz edilerek alüminyum hidroksit (hidrat) $Al(OH)_3$ elde edilir(Reaksiyon 2.2). Daha sonra buharlaşma bölümüne gönderilir. Buharlaştırma bölümü, zayıf çözeltinin buharlaştırılması ve soda (Na_2CO_3) ile organik safsızlıkların çöktürülerek prosten uzaklaştırılması amacıyla Bayer prosesinde yerini alır.

Dekompozisyon ve hidrat bölümü; Plakalı ve borulu ısı değişticiler, vakumlu soğutucular, vakum filtreleri, dekompozörler, seperatörler, tikinerler ve ilgili tank ve boru bağlantılarını kapsar.

Vakumlu soğutucular (3 adet): Otoklavlar bölümden yaklaşık 100 °C' de gelen alüminat çözeltisinin sıcaklığının yaklaşık 65 °C' ye düşürülmesini sağlar. Bu soğutma

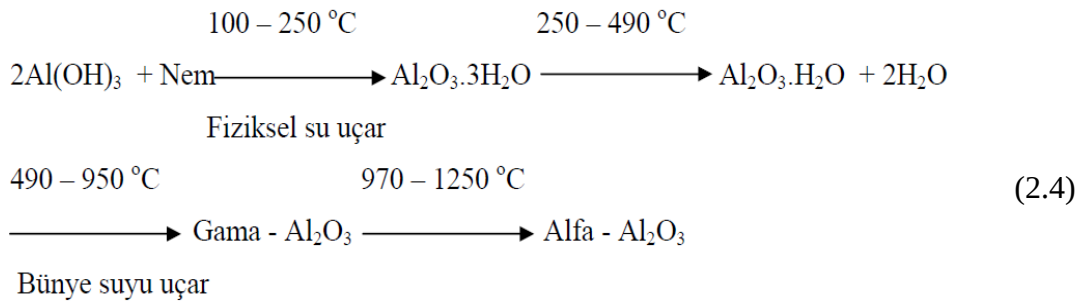
işlemi sırasında elde edilen buhar ise borulu ısı değıştiricilerde zayıf çözeltinin ısıtılmasında kullanılır (Hacıoğlu, 2007).



Kostik modülü: Düşük kostik modülünde oluşan hidrat artar. Başlangıçta 1,65 olan kostik modülü reaksiyon sonunda 3,45' e yükselir. Genellikle bu değerin 1,5 ile 2 arasında olması istenmektedir (Hacıoğlu, 2007; Şahin, 2011).

$$\text{kostik modülü} = 1,65 \times \frac{Na_2O_k}{Al_2O_3} = 1,5-2 \quad (2.3)$$

iv) Kavurma ve Al_2O_3 üretimi: Bayer prosesi sonunda üretilen $Al(\text{OH})_3$ ' in döner fırınlarda fiziksel (yüzey suyu) ve kimyasal suyu (bünye suyu) uçurularak Al_2O_3 üretilir (Reaksiyon 2.4). $Al(\text{OH})_3$ 'ün Al_2O_3 haline dönüştürme safhaları aşağıda özetlendiğı gibidir. Hidrat bölümünde üretilen hidrat konveyörlerle hidrat bunkerine taşınır, buradan paletli besleyici vasıtasıyla iki milli karıştırıcıya dökülür. İki milli karıştırıcıda, toz yutma sisteminden gelen sıcak tozlarla, hidrat karıştırılarak bir besleme borusu yardımıyla fırına beslenir. Döner fırınlar 3,6-4 m iç çapında 75 m uzunluğundadır. Fırın 2 devir/dk hızda dönmektedir. Fırın içi 250 ve 200 mm yüksekliğinde ateş tuğlaları ile kaplanmış olup, alüminyum hidrat girişinden itibaren 9,5 m'lik bir bölümü ön kurutmayı sağlamak için zincir sistemiyle donatılmıştır. Fırında hidratın uğradığı değışiklikler şu şekildedir.



Fırınlara verilen hidrat %10–12 arasında neme (fiziksel suya), %34-35 kimyasal suya (bünye suyuna) sahiptir. Fırınlara kapasitesi Al_2O_3 15 ton /saattir. Döner fırından 1000°C civarında çıkan alümina; 3 m çapında 34 m uzunluğunda ve %2,5 eğimi olan soğutucuya dökülür. Soğutucu dış cidarına soğuk su verilerek alümina 80- 90°C' ye

kadar soğutulur. Soğutucuda bunker vasıtasıyla pnömatik pompa kamaralarına intikal eden alümina pnömatik pompalarla elektroliz veya ticari alümina silolarına sevk edilir (Hacıoğlu, 2007). Sonuç olarak 4-5 ton boksit cevherinden yaklaşık olarak 2 ton alümina üretilmektedir (Alp vd., 2008).

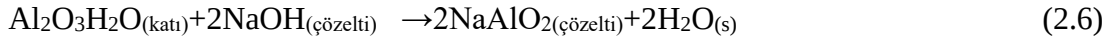
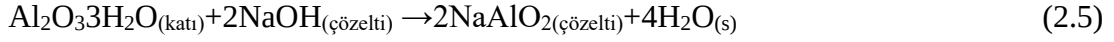
2.7. Yüksek Silisli Cevherlerin Bayer Prosesine Etkileri (Silis Sorunu)

Boksit cevherleri esas olarak yalnızca alüminyum minarelerini içermezler bunun yanı sıra Si, Fe, Ti bileşiklerine sahip başka mineral safsızlıkları da barındırırlar. Bayer prosesinde boksitlerin çözünmesi sırasında cevher içindeki silis safsızlıkları kostik soda ile beraber çözünmektedir. Çözünen silikalar daha sonra çözelti içerisinde soda ve alüminyum ile reaksiyona girerek tesis boyunca sodyum alüminyum silikat(kabuklanma) ürünü olarak çökelir. Boksit içinde ana reaktif silis minerali çoğunlukla kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)'dir. Kuvars (SiO_2), çözünme işlemi sırasında önemli derecede çözünmeye uğramaz ve genellikle kırmızı çamur atığında giderilir (Armstrong vd., 1999; Jiang vd., 2018).

Dünyadaki hemen hemen bütün boksit yataklarında bulunan silisin başlıca iki mineral kaynağı vardır. Bunlar; kuvars ve kuvars dışındaki silikat minerallerdir (ki özellikle kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve illit ($\text{KAl}_2(\text{OH})_2(\text{AlSi}_3(\text{O.OH})_{10})$) türü killerdir). Alkali ortamda çözünme eğiliminde olan silis türüne “reaktif silis”; çözünmeye karşı daha pasif davranış gösteren silis türlerine ise “reaktif olmayan silis” denilmektedir (Smith, 2009). Reaktif olmayan silis normal şartlar altında hiçbir değişikliğe uğramadan kırmızı çamurla atılır. Boksitlerdeki en yaygın reaktif silis kaynağı kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), illit ($\text{KAl}_2(\text{OH})_2(\text{AlSi}_3(\text{O.OH})_{10})$) ve halloysit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) mineralleridir. Reaktif silis, soda ve alümina ile birleşerek sodyum-alüminyum silikat kompleksleri ($2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) halinde çökerek bu maddelerin kırmızı çamurla beraber atılmasına sebep olur.

Bayer prosesi, boksit cevheri içinde bulunan alüminyum bileşiklerinin kostik soda (NaOH) çözeltisi ile liç edilmesi ve liç çözeltisinden birtakım işlem kademelerinden sonra alümina (Al_2O_3) kazanımı temeline dayanmaktadır. Boksit cevherindeki alümina türleri, yüksek derişime sahip kostik çözeltisi içerisinde belirli sıcaklık ve basınç altında sodyum alüminat (NaAlO_2) oluşturarak çözeltiye alınmaktadır. Alümina türlerinin kostik çözeltisindeki çözünme mekanizması özet olarak (2.5) ve (2.6) numaralı reaksiyonlarla gösterilmiştir (Habashi, 1999; Smith, 2009). Ancak bu

Çözündürme işlemi sırasında yalnızca alumina türleri nmemekte, safsızlık türü ve liç koşullarına bağlı olarak başlıcası silis olmak üzere fosfor, klor, sülfür, flor türlerinde de nme meydana gelmektedir. Bunlar arasında en dikkat çekici ve alümina üretim süreçlerine daha fazla olumsuz etkileri olanı özellikle silisli safsızlıklardır.



(X:SO₄²⁻, CO₃²⁻, Cl²⁻, OH⁻ vb.)

Boksit cevherindeki silis türleri de liç işlemi sırasında NaOH zeltisi ile reksiyona girer ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) oluşumu meydana getirir (Reaksiyon 2.7 ve 2.8). Oluşan sodyum silikatlar çözeltide nmş halde bulunan sodyum alüminatlar ile (Reaksiyon 2.5 ve 2.6) reaksiyona girerek desilikasyon ürünleri olarak isimlendirilen sodyum alüminyum silikatları (Na₆[Al₆Si₆O₂₄].Na₂X) oluşurmaktadır (Reaksiyon 2.9). Bu rnler hem istenmeyen miktarlarda soda kaybına hemde tesis içerisinde bazı olumsuzluklara neden olmaktadır. nrlk problemleri nedeniyle sistemden tam olarak uzaklaştırılamayan silis bileşimli bu ürünlerin neden olduğu kritik sorunları üç başlık altında özetlemek mümkündür.

- I. Sorun:** Silisin nmesi ve sodyum alümino silikat kompleksleri oluşumu sorunu. Reaktif silika türlerinin nmesi kostik tkretiminde aşırı artışlara neden olmaktadır. Bunun yanında alümina silikat yapısına giren alüminyum, her ne kadar reaktif silikadan geçmiş olsa da, ciddi miktarda alümina kayıplarına yol açmaktadır (Eşitlik 2.10 ve 2.11). Eti Alüminyum özelinde alümina ve kostik kayıplarının ortalama olarak şu şekilde olduğu belirtilmektedir.

$$\text{Alümina kaybı} = 1,0 \times (\text{aktif SiO}_2) \quad (2.10)$$

$$\text{Sudkostik kaybı} = 0,9 \times (\text{aktif SiO}_2) \quad (2.11)$$

II. Sorun: Çözünürlük problemleri nedeniyle sistemden tam olarak uzaklaştırılamayan sodyum alüminyum silikat bileşiklerin özellikle buharlaştırma üniteleri iç yüzeyinde birikerek silikat çökmesi (kabuk oluşumu) sorunu. Oluşan silikat kabuk, buharlaştırma bataryalarında, çözelti iletim borularında, vanalarda kesit daralmasına ve zaman zaman da bu ünitelerde tıkanmalara yol açmaktadır. Ayrıca bu ünitelerin akış rejiminin değişmesi ve ısı transferinin azalması gibi durumlarla karşılaşmaktadır. Oluşan kabukların temizlenmesinde çeşitli kimyasal maddelere (sülfirik asit gibi) ihtiyaç duyulması hem ilave bir maliyet oluşturmakta hem de iş gücü ve zaman kaybına neden olmaktadır.

III. Sorun: Desilikasyon türlerinin çöktürme basamağına taşınması ve safsızlık olarak alüminayı kirletmesi sorunu. Silikat türlerin son ürüne karışmasıyla alumina kalitesi bozulmakta ve saflık derecesi olumsuz yönde etkilenmektedir. Neticede silisleşmenin yol açmış olduğu bu tip teknik ve ekonomik problemler nedeniyle alumina üretim verimi ve alumina kalitesi düşmektedir. Alumina verimi ve kalitesi alüminyum üreticileri için çok önemli ekonomik öneme sahiptir. Alumina kalitesinin silikat türlerinin kirletmesinin yanında verimde ciddi düşüşler olacağından daha fazla boksit cevherine gereksinim duyulacaktır. Bu tür sorunların önüne geçmek için alüminyum firmaları çeşitli ön zenginleştirme işlemleri yaparak bu sorunları en aza indirme çabası içine girmektedir (Dickson vd., 2017).



Şekil 2.7. Isı eşanjörünün duvarlarında meydana gelen kabuklaşma (Armstrong vd., 1999)

Genel olarak bakıldığında alümina üretim tesislerde üretim maliyetleri sürekli değişkenlere (kaolinit, illit vb. gibi kil minerallere) bağlı olarak değişebilmektedir. Bu değişimin en önemli nedeni silis modülüne bağlı olarak modül oranındaki değişimdir ve modül oranı düştükçe maliyetlerde çok ciddi artışlar meydana gelmektedir. Bu bakımdan silis modülündeki değişim tesis dizaynı, kapasite ve maliyetler açısından kritik öneme sahiptir. Silis modülündeki değişiminin diğer önemli etkileri aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Vural, 1977).

Silis modülü düştükçe aynı üretimi yapabilmek için daha fazla boksiti işlemek gerekmektedir. Ancak, kurulu tesislerde cevher işleme kapasitesi sınırlı olduğundan belli bir silis modülünde çalışma zorunluluğu vardır. Kurulacak tesislerde ise daha büyük veya daha çok sayıda teçhizat gerektiğinden teçhizata ödenecek bedel yükselecek, dolayısıyla ton alümina da amortisman girdisi artacaktır.

Düşük silis modülle çalışıldığında daha viskos bir pülp elde edileceğinden hidrosiklonlar, pistonlu pompalar, diğer aparatlar ve geçişler etkilenecektir.

Alümina fabrikalarında düşük silis modüllü boksitler kullanıldığında çamur miktarı önemli ölçülerde artacağından çöktürme ve yıkama devreleri zorlanacak, kurulmuş tesislerde belli bir silis modülünün altına düşmek bu nedenle de mümkün olmayacak ve düşük silis modüllü boksitlerin işlenmesi zorunlu olduğu hallerde ise aynı teçhizatlarla üretilen alümina miktarı azalacağından alümina maliyetinde önemli bir yer tutan sabit girdilerin miktarı artacaktır. Ayrıca alümina üretiminde önemli bir konu olan desikilasyon reaksiyonları da olumsuz yönde etkilenecektir.

Yukarıdaki açıklamalardan görülebileceği gibi düşük silis modüllü boksitle çalışmada alümina üretim ekonomisi ve teknolojik çalışma şartları olumsuz şekilde etkilenecektir. Bununla birlikte düşük silis modüllü boksitlerin işlenmesinin gerekli olduğu durumlarda Bayer prosesi üzerinde bazı değişikliklere gidilmesi ve ilave işlem kademelerine gereksinim duyulmaktadır. Diğer bir yaklaşım da cevherden reaktif silisin uzaklaştırılmasına yönelik yöntemlerin denenmesidir (Vural,1977). Yapılan çalışmalarda da görüldüğü üzere reaktif silislerin desikilasyon ürünlerinin oluşmasından ve bu ürünlerinin temizlenmesine kadar DPS (sistemlerde çökelen ürünler veya kabuklar) ürünleriyle beraber sodyum hidroksit kaybına neden olmaktadır. Çökelmelerden kaynaklanan bu soda kayıpları, ekonomik kayıpların temel kaynağını oluşturmakta ve boksitin reaktif silika içeriği ile doğrusaldır. Reaktif silika

içeriği ağırlıkça %8'den büyük olan boksitler silisli boksit olarak kabul edilir ve genellikle ekonomik değildir (Smith, 2009).

Özetle, reaktif silisin Bayer prosesine etkileri ve bu etkilerin neden olduğu önemli sonuçlar maddeler halinde sıralanacak olursa;

- Isıtıcıların verimliliğini bozar ve korozyona neden olur,
- Kostik ve alümina kaybına sebep olur,
- Çözelti akışını durdurmayı ve kabuk oluşumu çözmek için devreden sülfürik asidin yıkanmasını içeren kireç çözme gibi birtakım kimyasal işlemler yapılmakla beraber, üretim süresinin kaybolmasına (devrelerin temizlenmesi için üretimin durması) ve ilave maliyetlere (insan gücü ve kimyasal temizlik reaktifleri) neden olur.
- Kabuklanma olayının oluşturduğu bölgelerde istenmeyen düşük ve yüksek sıcaklıkların meydana gelmesine neden olmaktadır.

Bir fikir vermesi bakımından, Queensland Alümina Limited (QAL) rafinerisinde 1995'te kabuklanma sorunuyla ilgili enerji tüketimi maliyetinin 10 milyon \$'a ulaşmış olduğunu bildirilmektedir. Alüminyum fiyatlarının zirve yaptığı bu yıllarda tüm büyük üretici firmalar alüminyum üretimin maliyetlerini daha aşağılara çekmek için çeşitli çalışmalara başlamışlardır (Armstrong vd., 1999).

Boksitlerden alümina üretiminde bünyedeki Al_2O_3 tenörü ve Al_2O_3 mineralojik modifikasyonları (Gibsit, böhmit, dijaspor) üretim teknolojisi ve ekonomisi açısından büyük önem taşır. Bir trihidrat modifikasyonu olan gibsit tipi boksitlerin işlenmesi ile monohidrat modifikasyonu olan böhmit veya dijaspor tipi boksitlerin kostik ile çözünürleşmesi arasında büyük farklılıklar mevcuttur. Gibsit yaklaşık $105^{\circ}C$ 'de reaksiyona girebildiği halde diğerleri için daha yüksek sıcaklık ($200-240^{\circ}C$) gerekebilmektedir. Yüksek sıcaklık silisin tamamı sodyumalüminyum-hidroksilikat birleşimleri oluşturduğu halde, gibsitik boksitlerin işlendiği sıcaklık silisin sadece bir kısmı (aktif silis-kaolinit) reaksiyona girdiğinden Na_2O ve Al_2O_3 kayıplarında önemli azalmalara sebep olmaktadır (Vural, 1977). Gibsitik boksitler genellikle daha az soda kaybı, düşük alümina kirlilik ve çözünme işleminde enerji tasarrufu sağlarken böhmit ise yüksek sıcaklıkta silika ile çözünmektedir. Soda ve alümina kaybına neden olan istenmeyen durumlar meydana gelmektedir (Whittington, 1996; Dickson, 2017). Boksitlerde alüminyum mineralleri dışında korund, kil mineralleri ve ayrıca demir oksit ve demir hidroksit formlarında da bulunmaktadır. Demir mineralleri bünyesinde izomorfik yapıda bulunan Al_2O_3 'ün kostik ile çözünürleşmesi oldukça güçtür.

Her alüminyum tesisinde teorik verim ile otoklav verimi arasında, uzun çalışmalardan elde edilen değerlerden istifade edilerek, sürekli olarak farklılık saptanabilir.

Bu farklılık aşağıdaki nedenlerle açıklanabilir;

- Teorik verim hesabında öngörülen modül (Al_2O_3/SiO_2) değerinin farklı olması,
- Boksitlerdeki mevcut silis, demir, titan ve benzeri konponentlerin varlık durumundaki değişim,
- Sekonder diyaspor oluşumu ve titan-diyaspor perdelemesi.

Silise bağlı kimyasal kostik kaybı yanında boksitlerin TiO_2 , P_2O_5 , F, SO_2 , V_2O_5 , CO_2 , ve G gibi mineral bileşikleri de kostik kayıplarına neden olmaktadır. Bu kayıpların miktarı çalışılan otoklav modülüne bağlı olarak değişmekte ve denge modülüne yaklaştıkça azalmaktadır.

Bu kostik kayıplarına ilaveten tesislerdeki kırmızı çamur yıkama sistemine ve elde edilen kırmızı çamurun morfolojisine bağlı olarak değişen “yapışkan kostik kayıpları” ve kırmızı çamur “sıvı faz kostik kayıpları” da mevcuttur (Vural, 1977).

2.8. Boksit Cevherinden Fiziksel Zenginleştirme Yöntemiyle Silis Uzaklaştırma

Daha önce de değinildiği üzere günümüzde ticari alümina üretiminin neredeyse tamamı hammadde olarak boksitin kullanıldığı Bayer prosesi ile karşılanmaktadır. Ancak, bu işlem sırasında boksit bileşiğindeki alüminanın yanı sıra kaolinit, illit, kuvars gibi reaktif silikat türleri de çözünmektedir. Sonuçta yüksek silis içerikli boksit cevherinin üretim prosesinde kullanılması üretim maliyetlerinde çok ciddi artışlara neden olmaktadır. Silis kaynaklı sorunların çözümüne yönelik uygulamalar ve yapılan bilimsel çalışmalar incelendiğinde üç farklı stratejinin geliştirildiği görülmektedir. Bunlar;

Reaktif silis girdisini azaltma: Bayer prosesi öncesinde ham boksit cevheri üzerinde uygulanan ön desilikasyon (pre-desilication) işlemlerini içerir. Reaktif silikaya yönelik bu işlemler doğrudan doğruya Bayer prosesine entegre olmayıp, genellikle, uygun bir zenginleştirme yöntemiyle reaktif silikanın makul seviyeye düşürülmesi veya kostik çözeltisinde silikanın çözünme davranışına yönelik ön işlemler (kalsinasyon gibi) şeklinde uygulanmaktadır (Dickson vd., 2017; Birinci ve Gök, 2018).

Bayer prosesi üzerinde bazı modifikasyonları denemek: Bu seçenekte iki durum gözetilerek modifikasyon yapılması önerilmektedir: (a) Kostik çözeltisinde çözünen reaktif silisi kimyasal yolla farklı yapıdaki çeşitli silikat türü bileşiklere dönüştürerek desilikasyon ürünleri olarak sistemden uzaklaştırmak ve/veya (b) Daha düşük soda içeriğine sahip alternatif desilikasyon ürünleri elde etmek.

DSP'den sodanın geri kazanımı: Kostik içeren atıkların ve desilikasyon ürünlerin yeniden işlenerek kostik sodanın bir miktarının kazanılması ve prosese tekrar beslenmesi işlemlerini kapsamaktadır.

Bu bölümde, başta silis ve demir olmak üzere istenmeyen minalleri uzaklaştırmaya yönelik olarak uygulanan ancak doğrudan doğruya Bayer prosesine entegre olmayan (desilikasyon öncesi işlemleri içeren) boksit zenginleştirme yöntemleri tanıtılmıştır. Bu yöntemlerin bir kısmı doğrudan cevherden silis uzaklaştırmasına yönelik işlemleri kapsamaktadır. Bir kısmı da desilikasyon süresince silisin çözünme davranışını iyileştirmek amacıyla boksit cevherine uygulanan ısı ve mekano-kimyasal ön işlemleri içermektedir (Dickson vd., 2017; Birinci ve Gök, 2018). Çizelge 2.10'da Bazı boksit zenginleştirme yöntemleri ve yöntemlerinin uygulama kolaylığı ve zorluklarının ilişkileri verilmiştir.

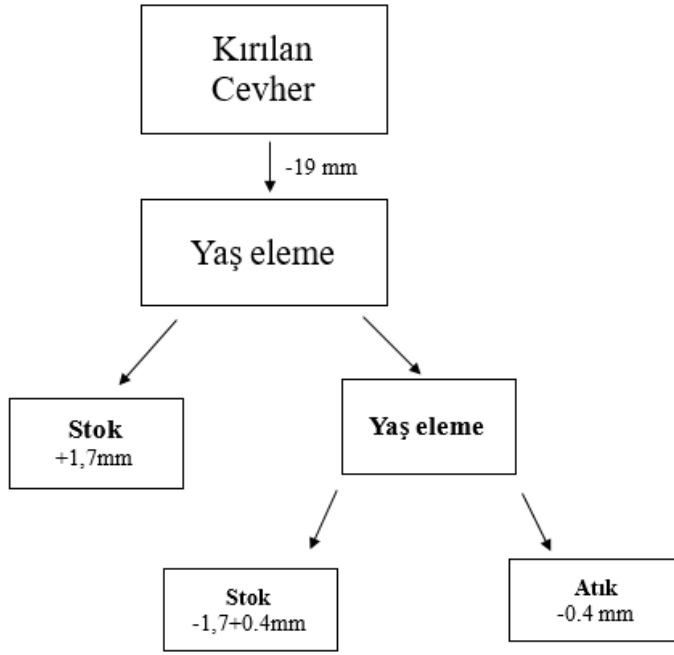
Çizelge 2.10. Bazı önemli boksit zenginleştirme yöntemleri (Birinci ve Gök, 2017)

Yöntem	Tanımı	Endüstriyel uygulama kolaylığı, zorluğu
Eleme-yıkama	Cevheri oluşturan mineraller arasındaki sertlik, gevreklik, dilinim, kırılabilirlik, kırılış şekli gibi fiziksel özellik farklılıklarına dayanan bir zenginleştirme yöntemidir.	Oldukça kolay, uygulaması basit, zenginleştirme maliyeti nispeten düşük olan bir yöntemdir. Ancak, uygulanabilirliği büyük ölçüde boksitin türüne ve mineralojik yapısına bağlı kalmaktadır. Kırma, öğütme, aşındırma gibi fiziksel işlemler sırasında kil minerallerinin ince boyutlara geçmesi durumunda başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir.
Gravite ayırması	Mineraltaneleri arasındaki yoğunluk farkına dayanan bir yöntem olup, minerallerin akışkan bir ortam içinde (su, hava ve ağırortam) özgül ağırlık farkıyla kolaylıkla birbirlerinden ayrılabilir.	Boksit mineralleri ile diğer minerallerin yoğunluklarının birbirine çok yakın olması, tane serbestleşmesinin gravite ayırmanın neredeyse imkansız olduğu çok ince tane boylarında gerçekleşmiş olması uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır.
Manyetik ayırma	Farklı manyetik duyarlılık gösteren minerallerin düşük veya yüksek bir manyetik alanda “manyetik olan” ve “manyetik olmayan” şeklinde birbirinden ayrılmasıyla gerçekleştirilen bir zenginleştirme yöntemidir.	Özellikle refrakter kalite boksit spesifikasyonuna uygun özellikte düşük demir içerikli boksit üretimi amacıyla uygulanmaktadır. Uygulanabilirliği büyük ölçüde boksitin türüne ve mineralojik yapısına bağlı kalmaktadır.
Biyoliç	Bu yöntemde; liç yöntemi ile çözünmeyen bileşiklerin, bazı bakteri yöntemi ile çözeltiye alınma işlemidir. Hidrometalurji, pirometalurji gibi bildik yöntemlere göre biyoliç düşük maliyetli, düşük enerji giderli, basit operasyon şartları, düşük iş gücü ve en önemlisi çevre dostu bir yöntem olmasından dolayı önemli avantajlar sağlamaktadır.	Bakterilerin yaptığı iş suda çözünmeyen mineralleri suda çözünür hale getirmektir. Biyoliç yöntemi uzun süreli bir işlemdir, proses kontrolü zordur, mikro organizmaların sürekli takip edilerek faaliyetlerini sürdürmeleri sağlanmak zorundadır. Ayrıca silikatların çözünmesi sırasında karşılaşılan önemli sorunlardan biriside alümina türlerini de çözünmesidir
Flotasyon	Minerallerin yüzey/ara yüzey özellik farklılığından yararlanılarak, hidrofobik tanelerin sıvı içerisinde oluşturulmuş hava kabarcığına tutunarak sıvı yüzeyine taşınması, diğer minerallerin ise sıvı içerisinde bastırılarak birbirinden ayrılmasını sağlayan bir zenginleştirme yöntemidir	Endüstriyel uygulamalar bakımından başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Diğer yöntemlere göre silis giderim verimi daha yüksektir ve kostik kayıplarında ciddi azalmalar görülmektedir. Flotasyonun başarısı büyük ölçüde boksit türüne bağlı olmakta, diyasporitik boksit cevherleri için daha başarılı olmaktadır.

Eleme/Yıkama yöntemi

Boksit cevherindeki silikat türlerin (kaolinit, illit gibi kil mneralleri) tercihen daha küçük tane boylarına geçmesi durumunda bu yöntem oldukça etkilidir. Belirli tane boylarında boksit cevheri titreşimli ve kavisli eleklerden yaş olarak elenir. Kolay dağılabilen yüksek silisli kil minarelleri ince fraksiyonda toplanarak cevherden uzaklaştırılmaktadır. Cevherde silis kaynağının kuvars (SiO_2) olması durumunda, uzaklaştırılması gereken hedef hedef minarel bu defa kuvars (SiO_2) olmaktadır. Eleme-yıkamayla silis uzaklaştırma yönteminin Weipa (Queensland, Australia) boksit madeninde etkin bir şekilde uygulandığını bilinmektedir. Şekil 2.8’de gösterildiği gibi, tesiste 19 mm altına kırılan cevher yaş eleme işleminden geçirilmekte 0,4 mm’nin altında kaolinit uzaklaştırılabilmektedir. Bu yöntemin uygulanabilirliği büyük ölçüde boksit türüne ve minerolojik yapısına bağlıdır. Bu konuyla ilgili Venezuela boksit cevherleri üzerine yapılan bir çalışmada 0,1-3,0 μm boyut aralığında tamburlu yıkayıcı-siklon kombinasyonunu denemişlerdir. Mısır’da Amer ve Abdala (1996)’in yaptıkları çalışmada öğütme ve sınıflandırma ile kuvarsın yaklaşık %82’ini uzaklaştırmayı başarmıştır ve (2006) diğer çalışmalarında boksitlerden yıkama ile killerin uzaklaştırılmasında ultrasonik yıkama, tamburlu yıkama ile su jetli yıkama yöntemlerini kullanılmış ayırmaya etki eden parametreleri incelemişlerdir (Smith, 2009).

Her uygulamanın olduğu gibi eleme-yıkamayla silis uzaklaştırmanın da birtakım zorlukları bulunmaktadır. Eleme-yıkama yönteminde baksit cevherin minerolojik yapısına önemlidir özellikle Pizolitik boksitli cevherlerde, silisi oluşturan minareller çoğunlukla kaolinittir (Smith, 2009). Silis uzaklaştırma yöntemleri arasına farklı modifikasyonlarla denenmiştir. Yapılan başka bir çalışmalarda 50 mm altına indirilen boksit cevherleri önce ultrasonik yıkayıcılarla, bir arada bulunan kil minerallerin parçalanmasını sağlamak daha sonra yıkama yöntemiyle ayrılmış olan kil minerallerini uzaklaştırma denenmiştir. Yapılan başka bir çalışmada ise tambur içerisine yerleştirilen su jeti ile tambur içerisine bulunan boksit cevherlerin bir pompa yardımıyla silislerin parçalanıp yıkanması yapılmıştır. Su jeti ile silis uzaklaştırma başarı sağlanamazken, ultrasonik yıkayıcı ile yapılan çalışmada ise ancak silis in %30’unu uzaklaştırmayı başarılmıştır (Ahmad vd., 2014).



Şekil 2.8. Weipa boksit zenginleştirme tesisine ait basitleştirilmiş akım şeması (Smith, 2009)

Gravite yöntemi

Gravite yöntemi, taneler arasındaki yoğunluk farklılığından yararlanmak suretiyle silikat minerallerinin (kaolinit, kuvars vd.) boksit cevherinden belirli ölçüde uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır. Ancak boksit mineralleri ile silikat mineralleri arasındaki yoğunluk farkı nispeten az olduğundan nadiren uygulama olanağı olan bir yöntemdir. Ayrıca gravite ayırma yönteminin etkinliği ve ayırma kalitesinin büyük oranda tane iriliğine bağlı olduğu bilinen bir gerçektir. Bu nedenle gravite ayırma, mineraller arasında en az $0,1 \text{ g/cm}^3$ kadar bir yoğunluk farkının olması koşuluyla, nispeten iri tane boylarında serbestleşmenin olduğu cevherler için önerilmektedir. Diğer taraftan, özellikle masif yapıdaki boksit cevherlerinde bileşimi oluşturan minerallerin çok az bir kısmı nadiren iri boyutlarda serbestleşebilmektedir. Bu tip cevherlerde alümina mineralleri ile silikat mineralleri arasında çok ince tane boylarında kısmi bir serbestleşme meydana gelmektedir. Gravite ayırmanın etkinliğinin azaldığı çok ince tane boylarında jig, ağır-ortam gibi klasik gravite ayırıcılar kullanılamamaktadır. Her ne kadar Knelson konsantratörü, Kelsey jigi, Multi-gravite ayırıcısı, Falcon konsantratörü gibi yeni nesil gelişmiş gravite ayırıcılarının kullanılmasıyla gravite ayırmada çok ince tane boylarına inilmiş olsa da bu tip ayırıcıların daha çok altın gibi ağır metal içerikli cevherlerin

zenginleştirilmesinde daha verimli ve başarılı oldukları bilinmektedir. Bu tip ayırıcıların boksit cevherlerinin zenginleştirilmesi amacıyla kullanıldığına dair bilimsel bir çalışmaya da henüz rastlanılmamıştır. Gravite zenginleştirme üzerine çok az sayıda literatür çalışmasına rastlanılmıştır ve bu çalışmalarda daha çok boksit cevherinin demir içeriğini düşürmek veya kalkerli safsızlıkları uzaklaştırmak amacıyla gravite ayırmanın uygulandığı belirlenmiştir. Gao vd., (2008) lateritik oluşum göstermeyen düşük kalite diyasporitik boksit cevherlerinin hidrosiklonla zenginleştirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, siklon alt ve üst akımından aldıkları ürünlerin Al ve Si tenörlerinde bir miktar farklılıkların olduğunu, alt akımdan alınan ürünün Al tenörünün daha yüksek, silis tenörünün daha düşük olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Bayer prosesi atıklarından titanyum minerallerinin kazanımına yönelik yapılan bir diğer çalışmada (Rao vd., 1996), gravite ayırıcı olarak sallantılı masa kullanılmış, yoğunluğu daha yüksek olan titan mineralleri (rutil ve ilmenit) daha düşük yoğunluklu minerallerden (kuvars, götit, sodalit) başarılı bir şekilde kazanılabilmektedir. Literatürde rastlanan birkaç çalışmaya rağmen, boksit cevherlerinden gravite yöntemleriyle özellikle silis gideriminin endüstriyel ölçekte (tesis bazında) büyük çapta uygulandığına dair birkaç güncel bilgiye rastlanılmıştır. Özellikle Brezilya boksitleri için geleneksel yöntemler olarak bilinen aşındırma yıkama, ağır ortam ayırması, spiral zenginleştirme, manyetik ayırma ve bunların kombinasyonlarının başarılı sonuçlar verdiğinden bahsedilmektedir (Massola vd., 2009). Bu yöntemlerin başarılı olmasında silisli safsızlıkların nispeten iri tane boylarında serbestleşmiş olması ihtimalinin önemli bir payı olduğu düşünülmektedir. Nitekim Brezilya'da iri boyutlarda serbestleşmenin olduğu gnays kökenli boksit cevherlerinden kuvarsın; amfibolit kökenlilerden ise demir ve titanlı safsızlıkların gravitik yöntemlerle etkin bir şekilde uzaklaştırılabildiği ve tesis ölçeğinde uygulandığı bilgisi bulunmaktadır (Chaves vd., 1999). Benzer konuda Yunanistan'da boksit madenciliği yapan bir firmanın (S&B Industrial Minerals, SA) boksit cevherlerindeki kalkerli safsızlıkları ağır ortam ayırması yöntemiyle başarılı bir şekilde uzaklaştırdığı bilinmektedir (Papoutes, 1999; Smith, 2009; Birinci ve Gök, 2018).

Biyoliç yöntemi

Metalürjide biyo-teknolojik prensiplerin uygulanması her geçen gün dahada önem kazanmaktadır. Mikro organizmaların cevher içersindeki mineral kaynaklarının oluşması ve çözülmesinde önemli rol oynadığı çok eski zamanlardan beri bilinen bir bilgidir. Son zamanlarda biyoteknolojik yöntemler mineral zenginleştirilmesinde popüler bir araştırma konusu olmuştur. Belirli hidrometalurjik işlemlerde mikro organizma kullanılması birçok ülkede yaşanan problemler için bir çözüm sunmaktadır. Böylece bu gibi ülkelerde basit yöntemlerle üretilemeyen düşük tenörlü cevherlerden metallerin geri kazanımı için metotlar geliştirilmiştir. Geleneksel yöntemlerin çok pahalı ve çevreye oldukça zararlı olmasından dolayı daha ekonomik ve çevreye karşı daha duyarlı yöntemler geliştirilmesine gereksinim duyulmuştur. Son yıllarda geliştirilen mikrobiyolojik liç yöntemleri metalik hammaddeler için çok önemlidir. Klasik yöntemler ile çözeltiye alınamayan veya parçalanamayan düşük tenörlü cevherler ve endüstri atıkları bakteriler ile ekonomik biçimde geri kazanılmaktadır (Arslan, 2008).

Son yıllarda biyoteknolojik gelişmelere bağlı olarak büyük gelişme gösteren biyolojik kazanım teknikleri büyük oranda önem kazanmış ve madencilik endüstrisinde giderek artan bir uygulama alanı bulmuştur. Biyoliç; özetle, geleneksel liç yöntemleri ile çözünmeyen bileşiklerin, bazı bakteriler yardımıyla çözeltiye alınma işlemidir. Biyoliç düşük maliyetli, düşük enerji gideri, basit operasyon şartları, düşük iş gücü ve en önemlisi çevre dostu bir yöntem olmasından dolayı önemli avantajlar sağlamaktadır. Ancak liç etkisi büyük oranda bakterilerin verimli çalışmasına bağlı olup, metallerin en yüksek oranda ekstrakte edilmesi bakterilerin optimum büyümesi sonucunda gerçekleşmektedir. Anand vd. (1996), boksitlerden demir ve kalsiyum türlerinin liç yöntemiyle uzaklaştırılmasına yönelik yaptıkları bir çalışmada, çeşitli bakteri türü ortamında organik asitlerin çözündürme etkinliğini incelemişlerdir. Boksit cevherindeki kalsiyum ve demir türlerinin çözeltiye alınmasında organik asitlerin olumlu etkisi olduğu sonucuna varmışlardır. Boksitten silikatların uzaklaştırılmasına yönelik yapılan diğer bir çalışmada (Groudeva ve Groudev, 1983), silikatları uzaklaştırmak için spesifik “silikat bakteriler” kullanılmıştır. Doğada çok yaygın olarak bulunan “Bacillus subtilis” türü bakterinin silikat uzaklaştırmada oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Ancak silikat türlerinin çözünmesi sırasında karşılaşılan önemli sorunlardan birisi alümina türlerinin de çözünmesi olmuştur. Bununla birlikte

5 günlük kesiksiz biyoliç süresi sonunda silikanın %55'i uzaklaştırılabilmektedir. Biyoliç yönteminin en önemli zorluğu ön işleme gerek duyulması ve bu işlemin uzun zaman almasıdır. Bir diğer husus ise bakteri liçi sırasında hem silikat hem de alumina türlerinin beraber çözünmesinden ileri gelen seçimliliğin zayıf olması sorunudur (Smith, 2009; Birinci ve Gök, 2018).

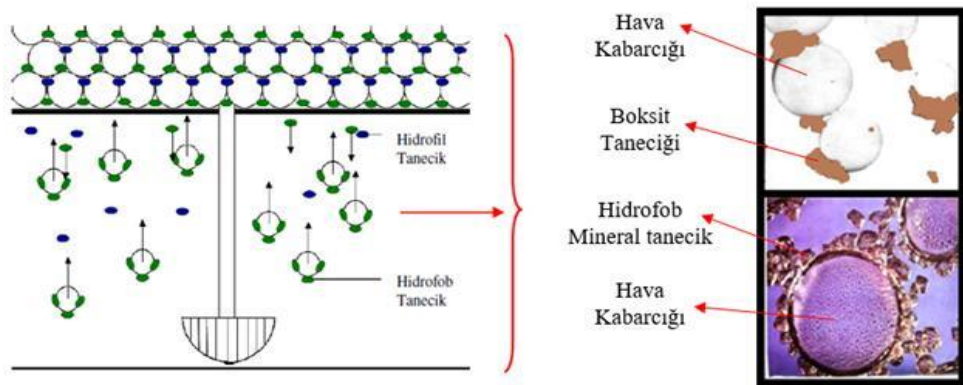
Manyetik ayırma yöntemi

Bu konu üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, manyetik ayırmanın çoğunlukla demir, nadir olarak silis uzaklaştırma amacıyla uygulandığı görülmüştür. Manyetik ayırmayla demir uzaklaştırma işlemi daha çok Refrakter kalitede boksit cevherleri söz konusu olduğunda uygulanmaktadır. Bilindiği gibi Refrakter malzeme yapımında kullanılan boksitlerin demir içeriği oldukça önemlidir ve Fe_2O_3 oranının maksimum %2-3 olması koşulu vardır. Metalurjik boksit cevherleri söz konusu olduğunda ise manyetik ayırma silis uzaklaştırma amacıyla uygulanmaktadır. Bu durumda kuvars, kaolinit gibi silisli mineraller manyetik ayırmayla boksit minerallerinden ayrılmaktadır. Ancak bu ayırma işleminde boksit cevherinin mineralojik yapısı, silis minerallerinin diğer mineral(ler)le olan ilişkisi (özellikle demir-silis, demir-alümina, alüminasilis mineralleri arasındaki bağlanma durumu), serbestleşme durumu, serbest ve bağlı tane kompozisyonu, bağlı tane yoğunluğu gibi cevher yapısına bağlı özellikler son derece önemli olmaktadır. Örneğin, bazı boksit türlerinde silisli mineraller, hematit gibi manyetik özelliği olan demirli minerallere daha fazla bağlanabilmekte ve manyetik ayırmayla belirli ölçüde boksitten uzaklaştırılabilmektedir. Bu konularda yapılan birkaç seçilmiş bilimsel çalışma (Sadler ve Venkataraman, 1991; Yılmaz, vd., 2015) incelendiğinde, manyetik ayırmanın daha çok refrakter malzeme endüstrisinin istediği spesifikasyonuna uygun özellikte düşük demir içerikli boksit üretimi amacıyla uygulandığı görülmektedir. Stamboliadis ve Kailis (2004) yaptıkları bir çalışmada, yüksek CaO içerikli boksit cevherinden kalsitin uzaklaştırılmasında yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı kullanmışlar ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Ancak bu çalışmaların hiç birisi henüz endüstriyel olarak uygulanamamaktadır (Smith, 2009; Birinci ve Gök, 2018).

2.9. Boksit Cevherinden Flotasyonla Silis Uzaklaştırma

2.9.1. Flotasyon ve mekanizması

Köpüklü flotasyon yöntemi, mineral endüstrisinde ince öğütülmüş cevherlerden değerli minerallerin seçici özeliği ile geri kazanımı için yaygın kullanılan bir yöntemdir (Popli, 2015). Cevher hazırlama süreçleri içinde minerallerin yüzey/arayüzey özellikleri farkından yararlanılarak değerli ve değersiz mineralleri birbirinden ayırmak için kullanılan bir yöntemdir (Çilek, 2006). Başka bir deyişle çok ince tane büyüklüğünde ayrılması mümkün olmayan minerallere uygulanan etkin bir zenginleştirme yöntemidir (Atak, 1990). Günümüzde köpük flotasyonu olarak klasikleşen bu yöntemde tane yüzeyinin fiziko-kimyasal özelliklerinin doğal olarak farklı oluşuya da bu özelliklerin bazı kimyasal maddeler kullanılarak değiştirilmesiyle değerli mineraller değersiz minerallerden ayrılmaktadır. Yüzeyi doğal olarak hidrofob olmayan mineraller bazı kimyasal reaktifler kullanılarak hidrofob yapılabilmektedir. Benzer şekilde hidrofob özellikteki mineraller de çeşitli bastırıcı reaktifler yardımıyla hidrofil yapılabilmektedir. Her iki tür mineral tanelerini bulunduran bir pülp içerisine hava verildiğinde hidrofob parçacıklar hava kabarcıklarına yapışarak pülp yüzeyine taşınırken, hidrofil mineraller pülp içerisinde kalırlar (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Flotasyonun oluşum mekanizması ve kabarcık-tanecik bağlarının oluşturulması
(Hacıfazlıoğlu, 2009)

Flotasyon Reaktifleri: Flotasyon işleminde istenilen minerallerin köpüğe yapışmasını sağlamak için farklı kimyasal reaktiflerden faydalanılır (Kaymaz, 1990). Kullanılan reaktifler cevherin içerdiği minerallerin yüzey özelliklerini flotasyon için uygun hale getirilerek istenilen minarelin köpüğe yapışmasını sağlama istenmeyeni ise

bastırılması gibi işlemleri kapsar. Başka bir deyişle cevherin içerdiği bir minarelin veya minarel grubun tercihen su sevmez hale gelirken, diğer minarellerin ise su sever halde kalmalarının sağlanmasıdır. Cevherin su ile etkileşime başladığı öğütme aşamasından itibaren reaktif pülpe, katı halde, emülsiyon halinde veya sulu çözelti halinde beslenirler. Bu kimyasallar önem sırasına göre; toplayıcılar, köpürtücüler, bastırıcılar, canlandırıcılar ve pH ayarlayıcılar olmak üzere başlıca 5 grup altında toplanmaktadır. (Atak, 1990; Çilek, 2006).

Toplayıcı reaktifler: Toplayıcı reaktifleri flotasyon devresinde pülp içerisinde mineral yüzeyine bağlanarak, yüzeyi hidrokarbon tabakası ile kaplayan ve istenilen mineralin hava kabarcığına yapışmasını sağlar (Atak, 1990). Başka bir deyişle, flotasyonda bir cevher içerisindeki kazanılmak istenilen hedef minerali hidrofob yapmak için kullanılan organik bileşikler toplayıcı olarak adlandırılır. Bu bileşiklerin her biri taşıdıkları polar ve polar olmayan gruplar nedeniyle aynı zamanda yüzey aktif maddedir. Bir yüzey aktif maddenin toplayıcı olarak tanımlanması için hidrofob yapılmak istenilen minarelin bulunduğu pülp içine atıldığında çözünerek veya dağılarak hedef mineral yüzeyine fiziksel veya kimyasal olarak bağlanması gerekmektedir (Çilek, 2006).

Yüzeyleri polar olmayan mineraller zayıf kovalent bağlarla bağlı moleküllerden oluşmuş olup kırılma yüzeyleri Van der Waals kuvvetleriyle birbirine bağlıdır. Böyle mineral yüzeyleri doğal olarak hidrofobiktir, suda ıslanmaz ve hava kabarcıklarına yapışırlar. Yüzeyleri polar olan mineraller kuvvetli kovalent bağlarla bağlı moleküllerden oluşmuş olup kırılma yüzeyleri iyonik bağlarla bağlıdır ve su molekülleri ile kolaylıkla reaksiyona girip ıslanırlar yani hidrofil özellik gösterirler. Polar mineral yüzeylerini hidrofob yüzeyler haline getirmek ve polar olmayan mineral yüzeylerini de daha fazla hidrofob yapmak için bu yüzeylerce adsorbe edilen kimyasal reaktifler toplayıcı (kollektör) olarak tanımlanırlar.

İyonlaşmayan (Non-Polar) toplayıcılar: Bu tür toplayıcılar elektriksel yük açısından nötr, polar grupları olmayan hidrokarbon zincirinden oluşmuş organik (genellikle yağlar) bileşiklerdir. Doğada bulunan birkaç tür mineral sahip oldukları kristal kafes yapısı ve atomlar arası bağın bir sonucu olarak kendiliğinden hidrofobdurlar. Bu nedenle bu tür minareller için toplayıcı kullanmaya gerek olmadan sadece köpürtücü kullanarak yüzdürmek mümkündür. Fakat doğal hidrofob olan

minarellerin flotasyon hızlarının ve flotasyon başarısının artırılması amacıyla polar grup taşımayan motorin, gaz yağı gibi organik bileşikler kullanılır. Bu tür maddeler, polar olmayan hidrokarbon zincirinden ibaret olduklarından, doğal hidrofob minarellerin yüzeylerini bir film gibi sararak doğal hidrofob minarallerin flotasyon başarısı artırmış olur (Çilek, 2006).

İyonlaşan (polar) toplayıcılar: Suda iyonlaşan bu toplayıcılar anyonik ve katyonik toplayıcılar olarak iki kısma ayrılabilir. Özellikle anyonik toplayıcılar sınıfı içinde çok çeşitli yapıda toplayıcılar bulunmaktadır. Ayrıca flotasyon kimyasalları firmaları, diğer Flotasyon kimyasalları olduğu gibi, ürettikleri her bir toplayıcı grubu için toplayıcının kimyasal isminden farklı isimler kullanabilmektedirler. Bu kısımlar hidrokarbon radikalini içeren polar olmayan kısımlar ve pozitif veya negatif yüklü polar kısımlardır (Çilek, 2006).

Mineral yüzeyinin toplayıcı ile kaplanması

Mineral yüzeylerinin anyonik veya katyonik çeşitli toplayıcılarla kaplanması ve flotasyona hazırlanması, böyle özetlenebilir;

- 1) Mineral flotasyonunun mümkün olabilmesi için çözelti içinde hidrokarbon ihtiva eden bir madde (iyon veya molekül) minarelin yüzeyinde toplanmalıdır.
- 2) Genellikle hidrokarbon ihtiva eden madde bir iyondan ibarettir.
- 3) Mineral yüzeyindeki toplayıcı tabakası genellikle bütün yüzeyi kaplayan bir tabakadan daha azdır.
- 4) Toplayıcının mineral yüzeyinde toplanması, buna eşdeğerde iyonun mineralden çözeltiye geçmesi ile mümkün olur.
- 5) Bazı minerallerin flotasyonunda oksijenin ve yüzey oksitlenmesinin önemli bir rolü vardır. Bu oksitlenme, toplayıcılarla kaplanmanın bir kısmı olarak kabul edilebilir.
- 6) Toplayıcının yüzeyinde toplanması için fazla miktarda toplayıcı eklenmesine gerek yoktur. Bilakis fazla miktarda toplayıcı ilavesi (Micelle teşekkülü sebebi ile) yüzeyde toplayıcının toplanmasını önler (Atak,1990).

Fiziksel Adsorpsiyon: Mineral yüzeyi ile toplayıcı iyonun zıt elektrik yük taşımaları sonucu, elektrostatik çekim yolu ile mineral taneciklerinin toplayıcı ile

kaplanmasıdır. Oksit ve silikatlarda mineral yüzeyinin elektriksel yükünü tayin eden ve değiştiren (potansiyeli tayin eden iyonlar) en önemli etken ortam pH'ıdır. pH in belirli bir değerinde, yüzey elektrik yükü veya bunu tayin eden elektro kinetik potansiyel (zeta potansiyeli) sıfıra eşittir. Mineral yüzeyinin yükü taşımadığı 'sıfır yük noktası' denir. Bu pH değerinin altında hidrojen iyonu adsorpsiyon nedeni ile yüzey pozitif elektrik yük taşır. Yüksek pH larda ise yüzey elektrik yükü negatiftir. Organik sülfonat ve sülfatların ve bazen yağ asitleri ve sabunların mineral yüzeyinin adsorpsiyonu yüzeyin pozitif elektrik yükü taşıdığı koşullarda elektrostatik etkileşimle gerçekleşir. Aminler ise yine elektrostatik etkilerle mineral yüzeylerinin negatif olduğu koşullarda yüzeyi adsorplar.

Kimyasal Adsorpsiyon: Oksit ve silikat minerallerinin katyonu ile anyonik yapılı bir toplayıcının (genellikle yağ asitleri ve sabunlar) kimyasal reaksiyonu ile oluşur. Toplayıcı reaktifin yüzeye yaklaşmasında elektrostatik etkileşimin rolü varsa da nötr veya düşük değerlerde negatif yüzeylerde toplayıcılar adsorplanabilir. Kimyasal reaksiyon oksit ve silikatın katyonu ile toplayıcı arasında olabileceği gibi, oksit ve silikat yüzeyinde önceden adsorplanmış (fiziksel ve kimyasal olarak) metal katyonu ile toplayıcı iyonu arasında olabilir. Bu sebeple hem fiziksel hem de kimyasal adsorpsiyonla oksit ve silikatların flotasyonunda pülpün kontrolü çok önemlidir (Önal vd., 2014).

2.9.2. Boksit cevherlerinin flotasyonu

Boksit flotasyonunda iki seçenek söz konusudur. Birincisinde cevherde istenmeyen reaktif silisin giderilmesi amacıyla silisli safsızlıklar yüzdürülür (ters flotasyon); diğer seçenekte ise boksit mineralleri yüzdürülmeye çalışılır (direkt flotasyon).

Tesis ölçeğinde boksit flotasyonu ilk defa Çin'de (Henan eyaleti Zhongzhou bölgesinde) uygulanmaya başlamıştır. Bu tesis, düşük tenörlü diyoritik boksit cevherinden silis uzaklaştırma amacıyla kurulmuştur. %65'e yakın diyoritik içeren boksit cevherleri içerisinde silikat mineralleri olarak kaolinit, illit, pirofillit ve kuvars bulunmaktadır. Kırma ve öğütme işlemleri sonrası 45 mikrondan küçük boyutlu taneler, siklonlar kullanılarak, şlam olarak atılmaktadır. Şlam uzaklaştırılmış boksit cevheri daha sonra flotasyon devresine gönderilmektedir. Çok kademeli flotasyon

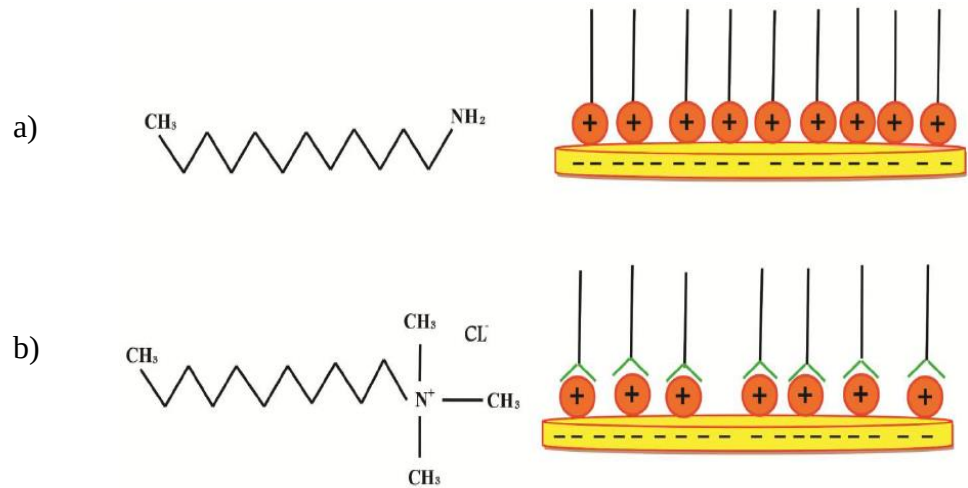
Boksit Cevherinin Ters Flotasyonu: Kısmen yüksek modüllü boksit cevherlerinde istenmeyen kaolinit, demir, titan vb. minarelleri hava kabarcığına tutunmasını sağlayarak yüzdürülmesi ve boksit minerallerinin bastırılması ile ayrılmak istenmesidir. Boksit flotasyonu yönteminde yüzdürülmek istenilen tanelerin yüzey özelliği farklılığından yararlanılmaktadır. Bu yöntemde ince boyutlu kil taneleri flotasyon hücresinde hava kabarcığına yapışıp su yüzeyine çıkması sağlanmaktadır. Eğer taneler iri olursa, taneciği etki eden yerçekimi kuvveti tanecik ile hava kabarcığı arasındaki adhezyon kuvvetinden büyük olacağından yüzdürülecek tanecikler hava kabarcığı ile taşınamayacaktır.

Yue-hua Hu ve arkadaşları düşük dereceli boksitin ters yüzdürme çalışmasına, yeni toplayıcıların geliştirilmesini içeren ve kaolinitin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ters yüzdürülmesi ile ilgili çalışmalarda bulundular (Yuehua vd., 2005). Ters flotasyonla yüksek dereceli boksitten gelen kaoliniti ters yüzdürme uzaklaştırmak mümkün görülmüştür. Özellikle kaolinit partiküllerinin yüzey özelliklerine dair son zamanlarda yapılan temel çalışmalara ve bunların etkileşimlerine dayanarak, kaolinitin ters yüzdürme kısmındaki partikül agregasyonunun boksit cevherinden önemi ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra ters flotasyonda kuvars ile kaoliniti ayırmada da etkili olduğu görülmüştür (Shrimali ve Miller, 2016; Liu vd., 2015).

Silikatların Flotasyonu: Geniş bir minarel grubunu oluşturan oksit ve silikatlar, mineral yüzeylerin elektriksel özelliklerine, toplayıcı reaktifin elektrik yüküne, minarelin çözünürlüğüne ve metal toplayıcı bileşiğinin kararlılığına göre yüzdürülebilirler. Bu özelliklere bağlı olarak, toplayıcılarla kaplanması ya elektrostatik çekim (fiziksel adsorpsiyon) ile veya yüzey iyonları ile kimyasal reaksiyon şeklinde olur.

Boksit flotasyonunda katyonik toplayıcılar: Bu tür toplayıcıların (katyonik toplayıcı) aktif grubu yani polar kafalar (pozitif+) elektrik yüklü olmakla, mineral taneciği de buna bağlı olarak (negatif-) elektrik yüklü olmaktadır. Sülfürlü ve oksitli cevherlerin düzenli çalışmalarında kullanılırlar (Ethem, 1974). Bu tür toplayıcıların en önemlileri beş değerlikli azot bazlı (NH_x) aminlerdir. Bir hidrojenin hidrokarbon radikali ile değişikliği birincil aminleri, iki hidrojenin değişikliği ikincil aminleri, üç hidrojenin değişikliği üçüncül aminleri ve dört hidrojen değişikliği dördüncü aminleri oluşturur. Katyonik toplayıcılar yani aminler, genellikle metal oksitlerin

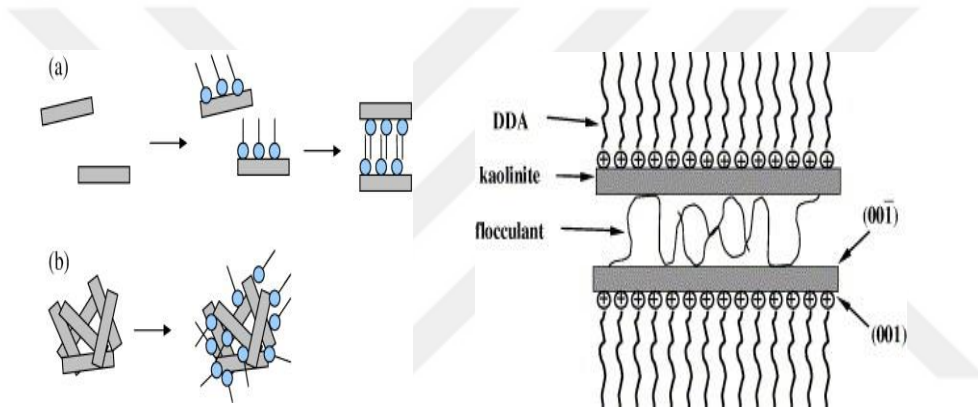
flotasyonunda, örneğin kuvars (SiO_2) gibi silikatların kaolinitteki silisin yüzeyine, barit gibi sülfatların ve kromit'in flotasyonunda kullanılırlar. Mineral yüzeylerinde adsorbe olmalarında elektriksel çift tabaka etkili olup, elektrostatik bağlanma (fiziksel bağlanma) söz konusudur. Bu çeşit bağlanma anyonik toplayıcıların kimyasal bağlanmalarına karşın nispeten zayıf bir bağlanmadır. Ters boksit flotasyonlarında Kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) gibi alüminosilikatlar için en uygun toplayıcı türü Katyonik toplayıcılardır. Katyonik toplayıcıların birçoğu köpürtücü özelliğe sahiptir, bu durum köpürtücü kullanımı önemli derece de azaltmaktadır. Katyonik toplayıcılar alüminosilikatlar için iyi bir toplayıcı olsa da fazla toplayıcı kullanımı minarelin yüzeyinde birikmesine ve mineral yüzeyinin köpük ile temasına engel olmaktadır, uygun miktarda toplayıcı kullanılması çok önemlidir. Boksitlerin ters flotasyonunda katyonik toplayıcı olarak yaygın kullanılan ikincil amin grubundaki dodesil amin (DDA), dördüncü amin grupları olan setiltrimetil amonyum klorür (CTAB), dodesil trimetil amonyum klorür (DTAC) vd. gibi bazı önemli katyonik toplayıcılar Çizelge 2.11'de gösterilmiştir. Şekil 2.11'de ise toplayıcının negatif yüklü mineral yüzeyine adsorpsiyonu gösterilmiştir (Rahimi vd., 2017). Yapılan birçok çalışmada bu tür toplayıcılarla olumlu sonuçların olduğu daha önceden belirtilen literatür çalışmalarında belirtilmiştir. (Rodrigues vd., 2016). Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'de dodesilamin'in kaolinit yüzeyine adsorpsiyonu görülmektedir.



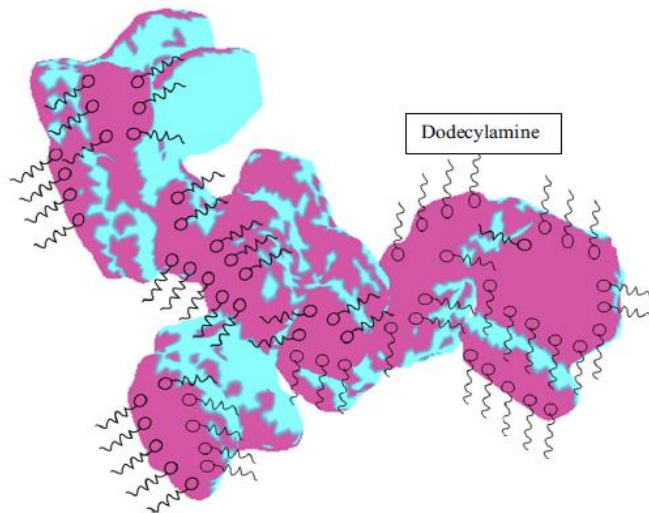
Şekil 2.11. DDA (a) ve DTAC (b) toplayıcılarının zincir yapısı ve negatif yüklü mineral yüzeyine adsorpsiyonu (Rahimi vd., 2017)

Çizelge 2.11. Boksitin flotasyonunda yaygın olarak kullanılan bazı toplayıcılar (Gibson vd., 2017)

ToplayıcıAdı	Kimyasal Formülü	Flotasyon Yöntemi
Dodesil-amin (DDA)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2\text{NH}_2$	Ters flotasyon
Setiltrimetil amonyum klorür (CTAC)	$\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{ClN}$	Ters flotasyon
Dodesil trimetilaminyum klorür (DTAC)	$\text{C}_{12}\text{H}_{25}(\text{CH}_3)_3\text{NCl}$	Ters flotasyon
Dimetildodesil amonyum bromür (BDDA)	$(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11})_2\text{N}(\text{CH}_3)_2(\text{Br})$	Ters flotasyon
Oleik asit	$\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$	Direkt flotasyon
Sodyum Oleat	$\text{C}_{18}\text{H}_{33}\text{NaO}_2$	Direkt flotasyon



Şekil 2.12. Dodesilamin'in kaolinit yüzeyine adsorbsiyonu (Yuehua vd., 2004)



Şekil 2.13. Dodesilamin kümesinin boksit içerisindeki kaolinit yüzeyine adsorbsiyonu (pembe parçacıklar kaolinit silis yüzeyini temsil eder) (Liu vd., 2015)

Boksit flotasyonunda bastırıcılar: Bastırma yüzebilen mineralleri yüzemez, diğer bir deyişle hidrofobik yüzeyleri hidrofilik yüzeyler haline getirme olayıdır. Bastırıcı reaktiflerin çoğunluğu inorganik bileşikler olup bunlara ilaveten bazı organik bileşikler de bastırıcı olarak kullanılmaktadır. Boksit flotasyonunda en yaygın kullanılan bastırıcılar Çizelge 2.12’de verilmiştir. Boksit cevherindeki silikatlar ile demirli safsızlıkları bastırmak amacıyla sodyum silikat, nişasta gibi tipik bastırıcılarla birlikte sodyum karbonat, kalgon/sodyum hegzametafosfat türü dağıtıcılar da kullanılmaktadır. Bunların diyaspor flotasyonu üzerine etkileri literatürde ayrıntılı olarak çalışılmıştır. Boksit cevherlerin ters flotasyonunun incelemesi için çeşitli bastırıcılar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Boksitlerin ters flotasyonları da en sık kullanılan bastırıcılar sodyum heksametafosfat ((NaPO₃)₆, SHMP) ve nişastadır. Boksit cevherlerinin bastırılmasında bastırıcı olan SHMP'nin özellikle diyaspor cevheri üzerinde önemli bir bastırıcı etkisinin olduğu bildirilmiştir (Liu vd., 2016; Xu vd., 2004; Yu-hua vd., 2008; Marino, 2012).

Çizelge 2.12. Ters boksit flotasyonunda yaygın olarak kullanılan bazı bastırıcılar (Gibson vd., 2017)

Bastırıcının Türleri	Kimyasal Formül	Bastırılacak mineral
Starch (nişasta)	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n .	Diyaspor
Katyonik starch (CAS)		Diyaspor
Amphoterik starch (AMS)		Diyaspor
Hydroxamicacid starch (HAS)		Diyaspor
Sodiumhexmetaphosphate (SHMP)	(NaPO ₃) ₆	Diyaspor

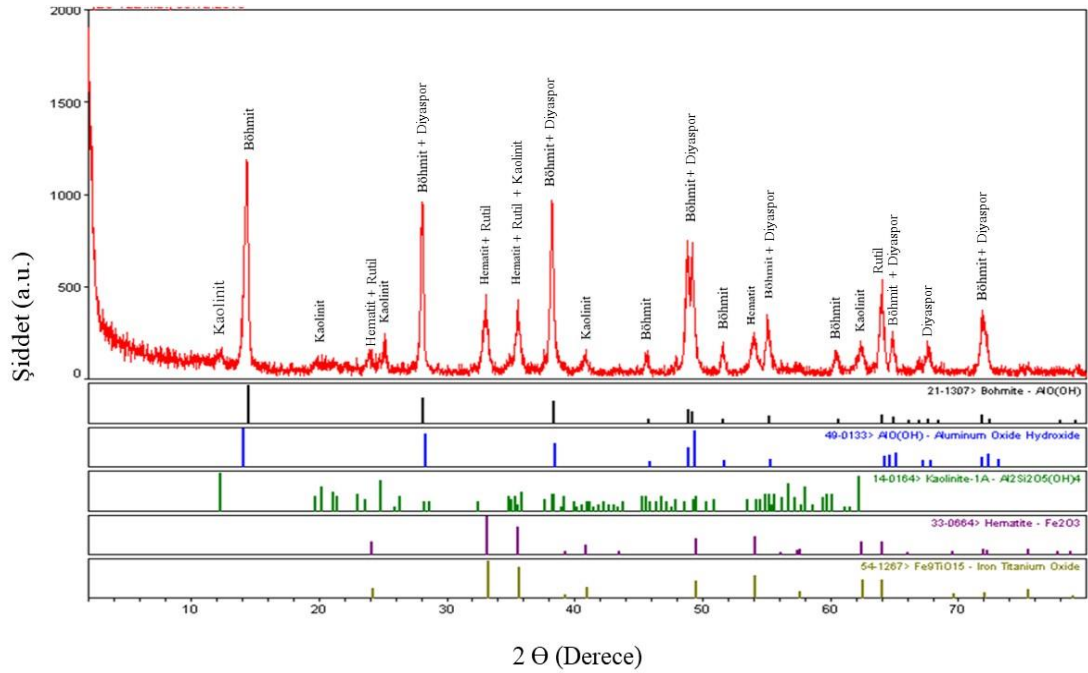
Boksit flotasyonunda dağıtıcılar ve pH ayarlayıcılar: Flotasyonda ortamın pH’ı çok önemli bir değişken olup, toplayıcıyla mineral yüzeylerinin kaplanması, aktifleştirme ve bastırma işlemlerinde pH’ın önemi büyüktür. Diğer bir deyişle bu işlemlerin belli pH değerlerinde yapılması zorunluluğu vardır. Boksit flotasyonunda yaygın olarak kullanılan dağıtıcı sodyum karbonattır (Na₂CO₃). pH’ın alkali (bazik) ortamlarda ayarlanmasında ucuz olması nedeni ile en çok kullanılan reaktif kireçtir (CaO). NaOH, Na₂CO₃ ve KOH’da yüksek pH değerlerine erişmek için kullanılabilir. pH değerini asidik ortamlarda tutulmasında ise yine ucuz olması nedeni ile en çok kullanılan sülfürik asittir (H₂SO₄) (Rodrigues vd., 2016; Rahimi vd., 2017).

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

3.1. Cevher Numunesi

Bu çalışmada deneysel çalışma malzemesi olarak Doğankuzu-Mortaş (Seydişehir/Konya) işletmesinden temin edilen boksit cevheri kullanılmıştır. Cevheri oluşturan başlıca mineraller X-ışınları kırınımı (XRD) tekniği ile belirlenmiş olup mineral kristallerine ait pik deseni Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre cevherde başlıca minarel pikleri böhmite (AlO(OH)), kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), hematite (Fe_2O_3), rutil/anataz (TiO_2) olduğu görülmektedir. Aynı sahadan alınan cevherler üzerine yapılan önceki çalışmalardan elde edilen bilgi ve tecrübelerle göre cevherde daha az oranda gipsit (Al(OH)_3), diaspore (AlO(OH)), götit (FeO(OH)), kalsit (CaCO_3) ve kuvars (SiO_2) minerallerinin de olduğu bilinmektedir.

Cevherin X-ışınları floresans (XRF) spektroskopisi ile elde edilen kimyasal analiz sonuçları ise Çizelge 3.1’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, cevherin %57,33 Al_2O_3 ve %9,01 SiO_2 içeriğine sahip olduğu görülmektedir. Bu değerlere göre cevherin silis modüllü ($\%\text{Al}_2\text{O}_3/\%\text{SiO}_2$) 6,36 olmaktadır. Bu değer Bayer prosesi için eşik değeri kabul edilen 7’nin altında olduğu ve tüvenan cevherin doğrudan Bayer prosesine beslemesinin ekonomik olarak mümkün olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.1. Boksit örneğinin XRD grafiği

Çizelge 3.1. Boksit cevherinin XRF ile belirlenmiş kimyasal analiz sonucu

<i>Cevherlerin kimyasal bileşimi ve başlıca oksit dağılımı (%)</i>						<i>Silis Modülü</i>
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K.K.*	%Al ₂ O ₃ /%SiO ₂
57,33	9,01	17,25	2,59	0,46	13,19	6,36

*Kızdırma kaybı

3.2. Kullanılan Kimyasallar

Kimyasallar flotasyon çalışmalarında önemli yere sahip olmakla beraber deneysel çalışmaların temelini oluşturmaktadır. Flotasyon çalışmalarında kullanılacak reaktifler çalışmaların başarısı bakımından son derece önemlidir. Yapılan boksit flotasyonu çalışmalarında toplayıcı reaktif olarak DDA (dodesilamin, CH₃(CH₂)₁₁NH₂) ile CTAB (setiltrimetil amonyum bromür, C₁₉H₄₂BrN); dağıtıcı olarak sodyum karbonat (Na₂CO₃); bastırıcı olarak mısır nişastası (starch); köpürtücü olarak ise MIBC((CH₃)₂CHCH₂CH(OH)CH₃) kullanılmıştır. Deneyde kullanılan flotasyon kimyasallarının bileşimi ve kullanım amaçları Çizelge 3.2’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Flotasyon deneylerinde kullanılan kimyasal reaktifler

<i>Kimyasalın adı</i>	<i>Bileşimi/saflığı</i>	<i>Kullanım amacı</i>
Dodesilamin (DDA)	C ₁₂ H ₂₇ N	Katyonik toplayıcı
Setiltrimetil amonyum bromür (CTAB)	C ₁₉ H ₄₂ BrN	Katyonik toplayıcı
Sodyum karbonat	Na ₂ CO ₃	Dağıtıcı ve pH ayarlama
Mısır nişastası (Starch)	%98 saflık	Bastırıcı reaktif
MIBC	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CH(OH)CH ₃	Köpük oluşturma
Hidroklorik asit (HCl)	%37 saflık	pH ayarlama

3.3. Kullanılan Cihazlar ve Aletler

Çalışmanın tüm aşamalarında kullanılan cihazlar ve aletler topluca Çizelge 3.3’de verilmiştir.

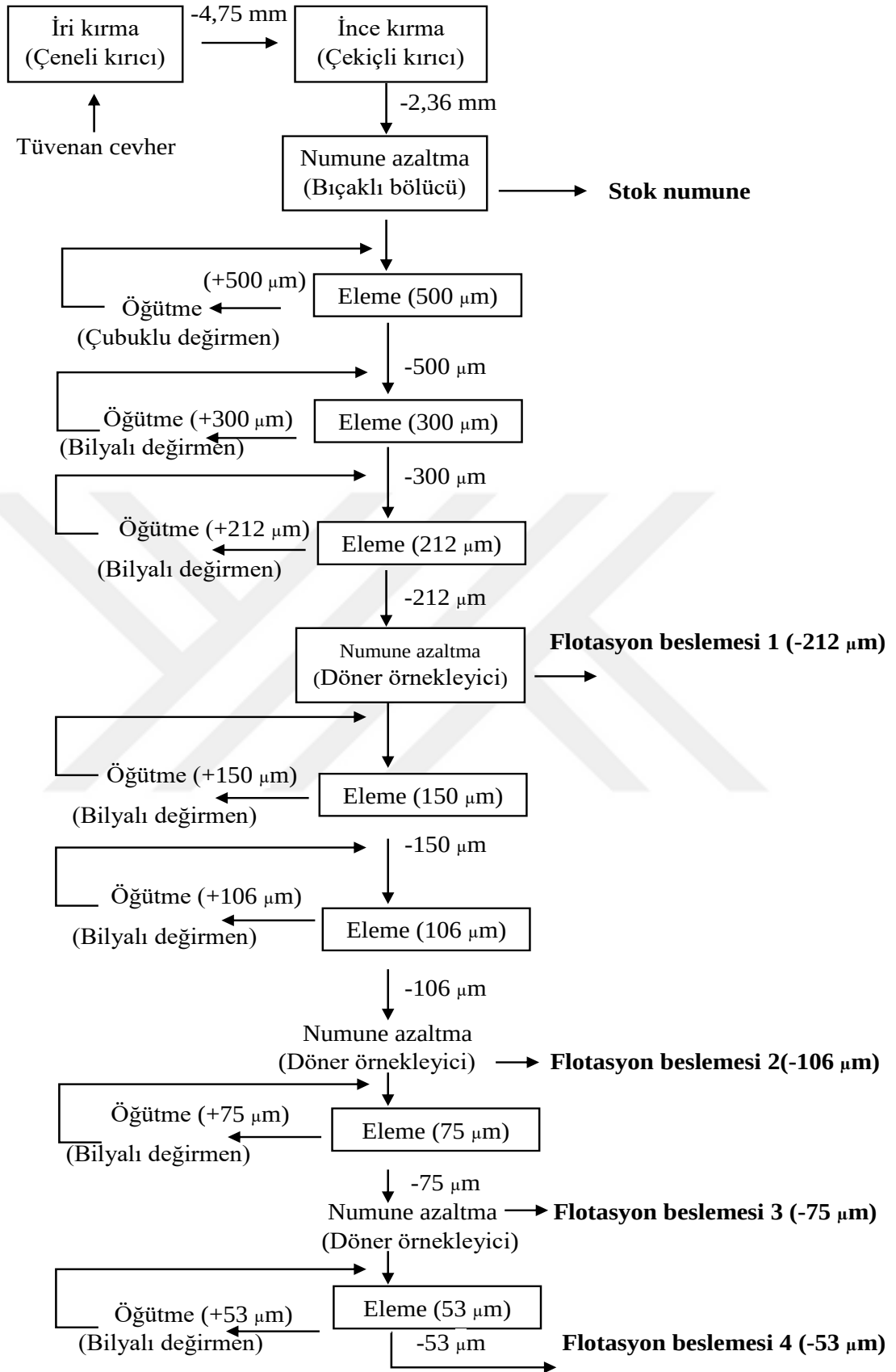
Çizelge 3.3. Çalışmalarda kullanılan alet ve cihazlar

<i>Cihaz/alet adı</i>	<i>Marka ve model</i>	<i>Kullanım amacı</i>
Çeneli Kırıcı-I	Çağlayan Makine sanayi ve ticaret	İri kırma işleminde (-10 mm)
Çeneli Kırıcı-II	Ünal Müh. ve Mak. Sanayi	Orta kırma işleminde (-5 mm)
Çekiçli Kırıcı	Gamak IE2	İnce kırma işleminde (-2 mm)
Çubuklu Değirmen	Ünal Müh. ve Mak. Sanayi	İri öğütme işleminde
Bilyalı Değirmen	Ünal Müh. ve Mak. Sanayi	İnce öğütme işleminde
Elek sarma makinesi	UTEST	Otomatik elemeye
Oluklu Bölücü	Ünal Müh. ve Mak. Sanayi	Numune azaltma işleminde
XRD	Rigaku RadB- Dmax II	Mineralojik analizler
XRF	Thermo scientific ARL ADVANT’X 9800-XRF	Kimyasal analizler
Flotasyon makinesi ve hücresi	Denver	Flotasyon deneyleri
pH metre	METTLER TOLEDO	pH ölçümleri
MasterSizer	MALVERN 2000 MOD.	Tane boyut analizi
Manyetik ısıtıcı/karıştırıcı	MISUNG SCIENTIFIC CO. LTD.	Çözelti hazırlama
Hassas Terazî	MettlerToledo	Malzeme tartımı
Etüv	NÜVE FN 500	Malzeme kurutma

3.4. Yöntem

3.4.1. Boksit cevherinin hazırlanması

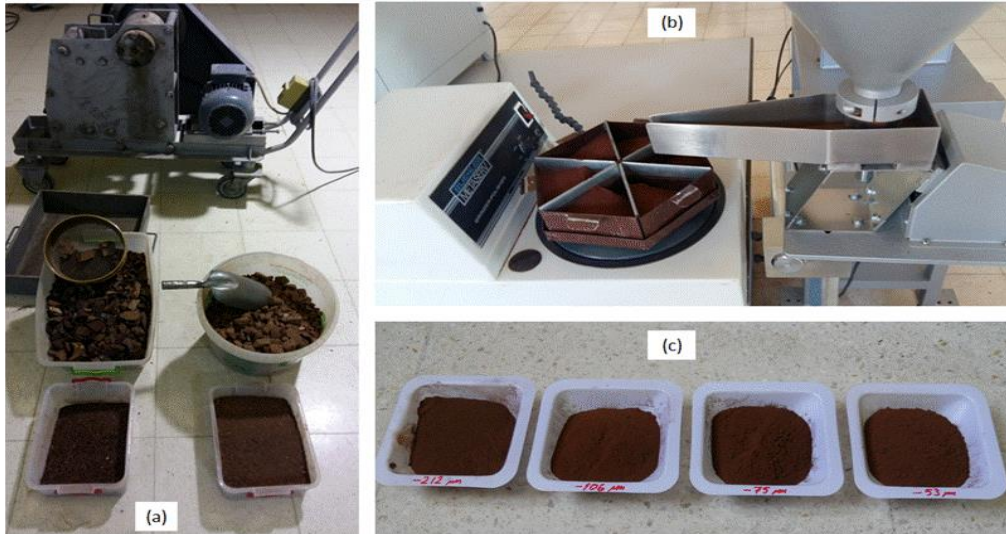
Kırma ve Öğütme: Doğankuzu-Mortaş boksit yatağından sağlanan yaklaşık 100 kg ağırlığındaki ham boksit cevheri İ.Ü. Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarına getirilmiştir. Parça cevher, zenginleştirme işlemlerinde kullanılmak üzere, kırıcı ve öğütücüler yardımıyla sistematik boyut küçültme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.2). Önce çeneli ve arkasından çekiçli kırıcı kullanılarak cevherin tamamı 2,36 mm altına kırılmıştır. Kırılmış cevher 105 °C sıcaklığa ayarlanmış kurutma dolabında sabit tartıma ulaşıncaya kadar kurutulmuştur. Kurutulmuş cevher, deneysel çalışma malzemesi ve stok numune olmak üzere bıçaklı bölücü kullanılarak iki kısma ayrılmıştır. Deneysel çalışma malzemesi olarak ayrılan kısım önce çubuklu değirmende -500 µm boyutuna öğütülmüştür. Daha sonra, flotasyon beslemesi olarak kullanılmak üzere, 500 µm altına öğütülen cevher kapalı devre bilyalı değirmende sırasıyla 300, 212, 150, 106, 75 ve 53 µm altına öğütülmüştür. Bunlardan -212, -106, -75 ve -53 µm boyutlu cevher numuneleri flotasyon beslemesi olarak seçilmiştir (Şekil 3.3). Bu numunelerin tane boyut dağılımını “MasterSizer” analiz cihazı ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 3.4 ve Şekil 3.4’de verilmiştir.



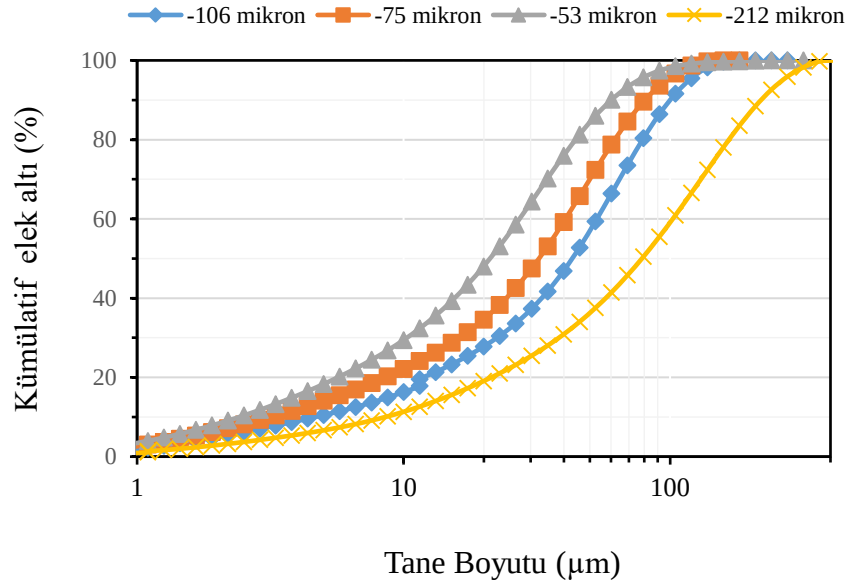
Şekil 3.2. Zenginleştirme işlemlerinde kullanılan boksit cevherinin hazırlanmasına ilişkin boyut küçültme akım şeması

Elek Analizi: Elek analizi işleminde ASTM E-11 model standart test elekleri (pirinç malzemedan üretilmiş, 200 mm çapında ve 50 mm derinliğinde) kullanılmıştır. Malzemenin kuru ve yaş olarak elenmesi işleminde Ro-tap otomatik eleme makinesinden yararlanılmıştır. İdeal eleme süresi 15 dakika olarak alınmıştır. Eleme sonrası her bir eleğin üzerinde kalan kuru malzeme tartılarak, tartım sonuçları elek analiz tablosuna kaydedilmiştir. Ayrıca her fraksiyonun Al_2O_3 ve SiO_2 içerikleri de tespit edilmiştir. Al_2O_3 ve SiO_2 analizleri XRF tekniği kullanılarak yapılmıştır.

Şekil 3.4 incelendiğinde, eğrilerin birbirine paralellik gösterdiği dolayısıyla tane boylarında orantılı bir küçülmenin olduğu söylenebilir. Tane boyutu küçüldüğünde beklenildiği gibi elek altı eğrilerlerinin sola kaydığı net bir şekilde görülmektedir. Ancak farklı boyutlardaki bu cevherler için ince tane oranlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Nitekim Çizelge 3.4’de verilen d_{10} , d_{50} , d_{90} değerlerine bakıldığında özellikle -106, -75, -53 μm boyutlu cevherler için d_{10} değerinin birbirine çok yakın olması bu tespiti desteklemektedir.



Şekil 3.3. Boyut küçültme ve örnek azaltma ekipmanları: (a) Kırıcı ve kırılmış cevher, (b) Döner örnekleyici, (c) Öğütülmüş cevherler (flotasyon beslemesi)



Şekil 3.4. Flotasyon beslemelerine ait kümülatif elek altı eğrileri

Çizelge 3.4. Flotasyon besleme numunelerine ait d_{10} , d_{50} ve d_{90} değerleri

Cevher tane boyutu (μm)	d_{10}	d_{50}	d_{90}
-212	11,215	103,385	289,317
-106	5,354	56,619	131,846
-75	3,640	37,005	92,335
-53	2,770	24,207	69,039

Numune Azaltma: Şekil 3.2’de verilmiş olan boksit cevherinin hazırlanması aşamalarında numune alma/azaltma işlemine gereksinim duyulmuştur. İri kırılmış cevherin azaltılmasında klasik konileme-dörtleme yöntemi; ince kırılmış cevherin azaltılmasında ise oluklu bölücü kullanılmıştır. Öğütmüş cevherlerin azaltılmasında ve flotasyon besleme numunelerinin hazırlanmasında döner örnekleyici kullanılmıştır (Şekil 3.3b). Zenginleştirme işlemleri için hazırlanan tüm numuneler nem almayacak şekilde torbalanarak muhafaza edilmiştir.

3.4.2. Aşındırmalı-yıkama

Aşındırıcı-yıkama deneyleri, mekanik karıştırıcı ve buna bağlı bir pervane ile donatılmış, sekizgen kesitli, 2 L'lik bir cam hücrede (Şekil 3.5) yapıldı. Aşındırmalı-yıkama testlerinde pülpte katı oranı, ağırlıkça %70 olarak ayarlandı. Karıştırma hızı 400 rpm'ye ve aşındırma süreleri sırasıyla 60, 120 ve 240 dakika olarak yapıldı. Aşındırma işleminin ardından, pülpün her bir boyut fraksiyonunu, özellikle 45 um'den daha küçük partiküller içeren en ince boyut fraksiyonunu ayırmak için ASTM E-11 tipi test elekleri kullanılarak yaş eleme yöntemiyle ile sınıflandırıldı. Eleme işleminden sonra, iri ve ince parçacıklar içeren tüm büyüklükteki parçalar etüvde 105 ° C'de kurutuldu. Elek boyutu fraksiyonlarının kimyasal analizi, XRF ile belirlendi. Aşındırmanın etkisini gözlemlemek amacıyla, aşındırılmamış bir numune üzerinde yaş eleme ile yapıldı.



<i>Deneysel parametreler</i>	
Pülpte katı oranı	%70
Karıştırma hızı	400 rpm
Karıştırma cam hücre	2 litre
Aşındırma süresi (dakika)	60, 120, 240

Şekil 3.5. Aşındırmalı-yıkama deney düzeneği ve aşındırma koşulları

3.4.3. Flotasyon deneyleri

Flotasyon işlemi için Denver flotasyon makinesi kullanılmıştır ve deneyler 1,5 litre hacimli hücre içerisinde gerçekleştirilmiştir. Flotasyon işleminde sabit tutulan bazı çalışma parametreleri Çizelge 3.5'te verilmiştir. Tüm deneylerde başlangıç flotasyon beslemesi 400 g alınmıştır. Koşullandırma ve flotasyon aşamasında pülpte katı oranı sırasıyla %45 ve %25 olarak belirlenmiştir. Flotasyon makinesine bağlı karıştırıcı pervane hızı 1100 dev/dk ayarlanarak sabit tutulmuştur.

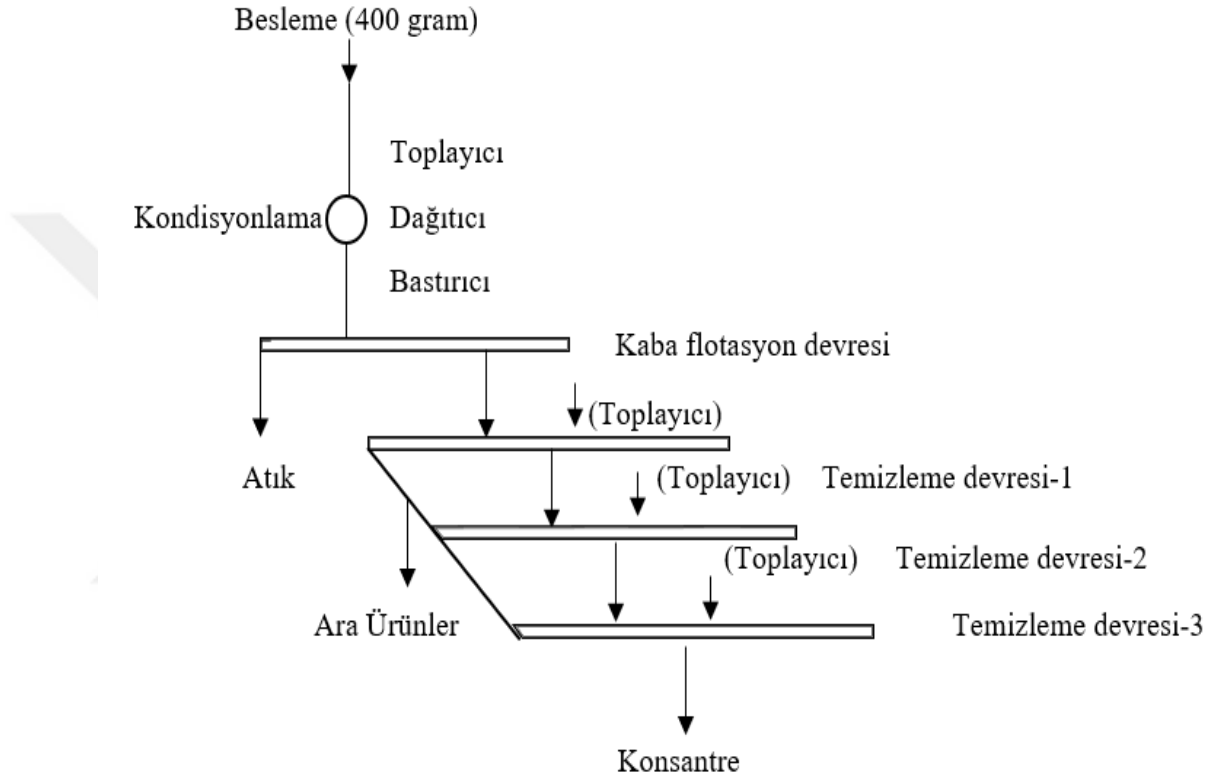
Çizelge 3.5. Flotasyon koşulları ve sabit tutulan parametreler

Cevher miktarı	400 g
Karıştırma hızı	1100 d/d
Koşullandırma pülpte katı oranı	%45 (400 g cevher+500 mL su)
Flotasyon pülpte katı oranı	%25
Dağıtıcı koşullandırma süresi	5 dk
Bastırıcı koşullandırma süresi	3 dk
Toplayıcı koşullandırma süresi	2 dk
Köpük alma süresi	5 dk
pH	Düşük(5,5); Doğal(7,5); Yüksek(10,5)

3.4.4. Flotasyon deneyleri

Flotasyon işlemi genel akış şeması Şekil 3.6'te verilmiştir. Flotasyon deneylerine ilk olarak pülp hazırlamakla başlanılmıştır. Flotasyon hücresi içerisine 500 ml saf su konulduktan sonra cevher numunesi ilavesi (400 g) yapılmıştır. Bu şekilde katı oranı ~%45 olan pülp 5 dk süreyle karıştırılmıştır. İkinci adımda uygun görülen pH değeri için pH reaktifi eklenerek 5 dk daha koşullandırma yapılmıştır. Üçüncü adımda önce dağıtıcı ve bastırıcı gibi kontrol reaktifleri, daha sonra toplayıcı reaktif ilavesi yapılarak öngörülen sürelerde koşullandırma yapılmıştır. Yüzdürme işlemi öncesinde son olarak tamamlama suyu ilavesi (600 mL) yapılarak pülpte katı oranı ~%27 civarına getirilmiştir. Bu şekilde ideal konuma getirilmiş olan pülp seviyesi köpük alma süresi boyunca yıkama suyu ilavesiyle sabit tutulmaya çalışılmıştır. Köpük alma işlemi öncesi gerekli görüldüğü durumlarda köpürtücü reaktif de kullanılmıştır. Kaba

flotasyon devresinde 5 dakika süreyle köpük alındıktan sonra hücre içerisinde kalan pülp üç temizleme işleminden geçirilerek flotasyon sonlandırılmıştır. Flotasyon işlemi sonrasında kaba flotasyon yüzeni olarak alınan bir adet atık, temizleme devresi yüzenlerinin birleştirilmesiyle elde edilen bir adet ara ürün ve hücre içerisinde kalan nihai boksit konsantresi elde edilmiştir. Flotasyon deney düzeneği ve flotasyon ürünleri Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.6. Flotasyon işlemi genel akım şeması

Flotasyon deneylerinde elde edilen bütün ürünler 105°C’de kurutulduktan sonra tartılarak ağırlıkları kaydedilmiştir. Bu ürünlerin Al_2O_3 ve SiO_2 tenörleri XRF analiz tekniği kullanılarak tespit edilmiştir. Bu tenör değerleri kullanılarak ürünlerin modül değeri (Eşitlik 3.1) ve Al_2O_3 verimleri ise (Eşitlik 3.2) kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.7. Flotasyon deney düzeneği ve flotasyon ürünleri

$$Modül = \frac{\% Al_2O_3}{\% SiO_2} \quad (3.1)$$

Al_2O_3 Kazanma Verimi

$$V(\%) = \frac{K.k}{F.f} \times 100 \quad (3.2)$$

F: Tüvenan boksit cevher miktarı

K: Konsantre boksit cevher miktarı

f: Tüvenan boksit cevherin % Al_2O_3 tenörü

k: Konsantre boksit cevherin % Al_2O_3 tenörü

V: Verim

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Kırılmış ve Öğütülmüş Cevherin Analizi

Bu bölümde, boyut küçültme işlemleri sırasında iri ve ince tanelerde meydana gelebilecek silis modülündeki değişimi tespit etmek amacıyla herhangi bir değişimin meydana gelip gelmediğini belirlemek, kırılmış ve öğütülmüş cevherin elek analizi ile 2,36 mm, 500 ve 150 µm altına öğütülmüş boksit cevherinin elek analiz yöntemiyle belirlemiş olduğumuz tane boyut dağılımı, Al_2O_3 , SiO_2 içerikleri ve silis modül değerlerine bakarak boyut küçültme işlemleriyle silis modülünün yükselip yükselenmediğini gözlemlemektir.

Zenginleştirme yöntemi olarak, uygulanabilirliği oldukça basit ve kolay olan tane boyuna göre sınıflandırma ile zenginleştirme yapılmıştır. Bu yöntemde cevher minarelleri arasındaki kırılgenlik, sertlik, kırılış şekli, dilinim gibi fiziksel özellik farklarından yararlanmakta; boyut küçültme işlemi sırasında iri veya ince tane boylarında minareller belirli ölçüde birbirlerinden ayrılabilirlerdir. Boksit cevherindeki silis içerikli kil türü minarellerin (kaolinit, illit, halloysit vb.) tercihen daha küçük tane boylarına geçmesi durumunda bu yöntemin başarılı olabileceği ön görülmektedir.

Parça cevher, kırıcı ve öğütücüler yardımıyla sistematik boyut küçültme işlemine tabi tutulmuştur. Önce çeneli ve arkasından çekiçli kırıcı kullanılarak cevherin tamamı 2,360 mm altına indirilmiştir. Kırılmış cevher 105°C sıcaklığa ayarlanmış kurutma dolabında sabit tartıma ulaşınca kadar kurutulmuştur. Kurutulmuş cevher, deney malzemesi ve stok numune olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Deneysel çalışma malzemesi olarak ayrılan kısım daha sonra bıçaklı bölücü kullanılarak yeterli miktar ve sayıda örneklerle ayrılmıştır. Bu örneklerden bir kısmı 2,360 mm olarak diğer kısmı çubuklu değirmende kuru öğütlemeyle (öğütme+eleme kapalı devre) 500 µm altına öğütülmüştür. Diğer bir parça ise, çubuklu değirmen öğütme koşullarında önce 500 µm altına, daha sonra bilyalı değirmende kuru öğütlemeyle 150 µm altına öğütülmüştür. Öğütülen numunelerin elek analizi yapılmış, elek fraksiyonlarının Al_2O_3 ve SiO_2 içeriği analiz edilerek silis modülleri hesaplanmıştır.

2,360 mm 500 µm ve 150 µm tane boyutu altına indirilmiş boksit cevher numunelerin elek analiz yöntemiyle belirlenen tane boyut dağılımı, fraksiyonların Al_2O_3 , SiO_2 ve silis modülü değerleri Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3'te verilmiştir. Çizelge 4.1

ve Şekil 4.1 incelendiğinde, ince tane boylarına inildikçe Al_2O_3 içeriği düşmekte, SiO_2 içeriği ise artmakta olduğu görülmektedir.

İri ve ince fraksiyonlar için silis modül değerleri aralarındaki fark az da olsa değişim göstermektedir. 2,360 ve 0,850 mm'nin altına kırılmış cevherin fraksiyonlardaki silis modül dağılımına bakıldığında en iri fraksiyonda 6,46 iken tane boyutu azaldıkça silis modül değerinin en ince fraksiyonlarda (-0,045 mm) 5,06 lara kadar düştüğünü görülmektedir. Bu durum, özellikle kaolinitin minerolojik yapısı gereği daha fazla ufalandığı ve daha fazla oranda ince tane fraksiyonlarda biriktiğini göstermekte ve Bayer prosesi için kabul görülen silis modül değerinin altında kalmıştır.

Çizelge 4.1. 2,360 mm'nin altına kırılmış cevherin analizi

Elek Aralığı (mm)	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Dağılım (%)		Silis Modülü (Al_2O_3/SiO_2)
		Al_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	SiO_2	
-2,360 + 0,850	56,06	58,01	8,98	56,43	55,08	6,46
-0,850 + 0,300	26,45	57,54	9,13	26,41	26,42	6,30
-0,300 + 0,106	10,84	57,19	9,41	10,76	11,15	6,08
-0,106 + 0,045	4,42	56,27	9,86	4,31	4,75	5,71
-0,045	2,23	54,01	10,67	2,09	2,60	5,06
Besleme	100	57,63	9,14	100	100	6,31

500 μm altına öğütülmüş boksit cevherinin elek analiz sonuçlarının verildiği Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2'de incelendiğinde, ince tane boylarına inildikçe Al_2O_3 içeriği düşmekte olup, aksine SiO_2 içeriğinin ise artmakta olduğu görülmektedir. Bu durum 2,36 mm altına kırılmış boksit cevher analiz sonuçlarına aynı şekilde benzerlik göstermektedir. Boksit cevheri içerisinde bulunan kaolinitin ince fraksiyonlarda birikmesi minerolojik yapısından kaynaklanmaktadır. İri ve ince fraksiyonlar için silis modülündeki değişimi incelendiğinde orijinal cevherin modül değeri 6,36 iken, en iri tanelerde bu oran 6,54'e yükselmiş ve azda olsa bir iyileşme görülmüştür. En ince tanelerde ise 5,68'e düştüğü görülmektedir. Buna rağmen silis modülü 7'nin üzerine çıkamamıştır. Benzer sonuçlar elde edildiği Çizelge 4.3'e bakıldığında ise bilyalı değirmende -150 μm tane boyutuna öğütülmüş cevher için, çubuklu değirmen öğütmesine benzer şekilde, ince tane boylarına inildikçe Al_2O_3 içeriği düşmekte ve

SiO₂ içeriği ise artmaktadır. Örneğin en iri tanelerin oluşturduğu -150+106 µm aralığında malzemenin Al₂O₃ ve SiO₂ içeriği sırasıyla %58,01 Al₂O₃ ve %8,78 SiO₂ olurken, en ince tanelerin oluşturduğu -38+0 µm aralığındaki malzeme %55,63 Al₂O₃ ve %9,33 SiO₂ içeriğine sahiptir. En iri tanelerde modül 6,61'e kadar çıkmıştır ve orijinal cevher modülü ile kıyaslandığında %4 lük bir artış olduğu anlaşılmaktadır. En ince tanelerin (-38 µm) silis modülü 5,96 olmuştur. Ancak elek aralığındaki malzemelerin tümünde silis modülü 7'nin altında kalmıştır.

Çizelge 4.2. 500 µm altına öğütülmüş cevherin analizi

Elek Aralığı, (µm)	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Dağılım (%)		Silis Modülü (Al ₂ O ₃ /SiO ₂)
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
-500+300	41,29	57,66	8,81	41,53	40,38	6,54
-300+212	16,56	57,52	8,86	16,61	16,28	6,49
-212+150	11,84	57,43	8,98	11,86	11,80	6,39
-150+106	8,62	57,12	9,05	8,59	8,66	6,31
-106+75	5,86	57,15	9,16	5,84	5,96	6,24
-75+53	4,21	56,81	9,21	4,17	4,30	6,17
-53+38	3,45	56,35	9,25	3,39	3,54	6,09
-38	8,17	55,13	9,70	7,86	8,80	5,68
Besleme	100,00	57,33	9,01	100	100	6,36

İnce fraksiyonlarda Al₂O₃ içeriğinin düştüğü, buna karşılık SiO₂ içeriğinin ise yükseldiği görülmüştür. Cevherdeki alüminyumlu bileşiklerin birincil kaynağının boksit minareli (böhmit, diaspore, gibsite), silisyumlu bileşiklerin kaynağının ise kil minarelleri (özellikle kaolinit) olduğu bilinmektedir. Buna göre ince tane boylarında SiO₂ içeriğinin artmış olması, bu tane boylarındaki bir miktar kaolinit artmış olduğu anlamına gelmektedir. Buna karşılık iri tane boylarında Al₂O₃ içeriğinin çok az da olsa artan bir değişim göstermesi boksit minarelleri bakımından bir artışı ifade etmektedir. Bununla birlikte Bayer prosesine beslenen boksit cevheri için en önemli kriterlerden biri olan silis modülünün 7'nin üzerinde olması koşulu sağlanamamıştır. Bir başka şekilde ifade etmek gerekir ise, yalnızca boyut küçültme sonrası sınıflandırma işlemi ile Bayer prosesine doğrudan beslenebilecek kalitede boksit konsantresi elde edilememiştir. Bu durum boksit cevherleri için beklenebilecek bir durumdur. Çünkü

boksit cevherlerinin minerolojisi gereği karmaşık bir yapı sergilemekte, sertlik ve kırılabilirlikleri birbirine çok yakın olan boksit minarelleri ile kil minarelleri iç içe geçmiş bir doku oluşturmakta, ayrıca kil minarellerinin tenörü daha az olmasına rağmen cevher içerisinde homojen bir dağılım göstermektedir. Böyle bir yapı içerisinde kil minarellerini seçimli olarak boksit minarellerinden ayırmak neredeyse imkânsızdır. Birinci vd. (2018a) nin boksit cevherlerinden silis uzaklaştırmaya yönelik sadece kırma ve boyut küçültme işlemleriyle silis modülünün yükselip yükselmediğini gözlemlemek için bir takım çalışmalar yapılmıştır.

Çizelge 4.3. 150 µm altına öğütülmüş cevherin elek analiz analizi

<i>Elek Aralığı, (µm)</i>	<i>Ağırlık (%)</i>	<i>Tenör (%)</i>		<i>Dağılım (%)</i>		<i>Silis Modülü (Al₂O₃/SiO₂)</i>
		<i>Al₂O₃</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>SiO₂</i>	
-150+106	37,61	58,01	8,78	38,06	36,65	6,61
-106+75	18,41	53,04	8,32	17,03	17,00	6,37
-75+53	13,50	57,07	8,96	13,44	13,42	6,37
-53+38	10,47	56,94	9,02	10,40	10,48	6,31
-38	20,01	55,63	9,33	19,42	20,72	5,96
Besleme	100	57,33	9,01	100	100	6,36

4.2. Aşındırılmalı-Yıkama İşlemlerden Geçirilmiş Cevherin Analizi

Aşındırılmalı-yıkama yöntemi de boyut küçültme ile silis uzaklaştırma yöntemi gibi uygulanabilirliği oldukça basit ön zenginleştirme yöntemidir. Bu yöntemde kırılmış orta irilikteki mineral tanelerin sulu ortamda birbirine sürtünerek yüzeylerinin aşındırılmasıyla yapılan basit bir işlemdir. Boksit cevherinin önce kırma işlemleriyle daha sonra aşındırılmalı yıkama yapılarak iri ve ince tanelerde meydana gelebilecek değişimini tespit etmektir. Elek analiz yöntemiyle belirlemiş olduğumuz tane boyut dağılımının, Al₂O₃, SiO₂ içerikleri ve silis modül değerlerine bakarak aşındırılmalı yıkama işlemiyle silis modül değerinde herhangi bir değişimin meydana gelip gelmediğini belirlemektir.

Çizelge 4.4. 60 dakika aşındırıldıktan sonra yaş eleme/yıkama işleminden geçirilmiş cevherin analizi

Tane Boyu (mm)	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Dağılım (%)		Modül (Al ₂ O ₃ /SiO ₂)
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
-2,360 +0,850	56,87	58,36	8,85	55,67	55,37	6,59
-0,850 +0,300	24,68	57,83	8,92	24,81	24,21	6,49
-0,300 +0,106	8,58	57,21	8,83	8,53	8,33	6,48
-0,106 +0,045	2,82	53,02	8,17	2,60	2,53	6,49
-0,045	7,06	51,83	12,35	6,36	9,59	4,20
Toplam	100	57,52	9,09	100	100	6,33

60 dakika Aşındırmalı yıkama ile yapılan boksit numunesinin kimyasal analizinin sonuçları Çizelge 4.4’de görüldüğü üzere iri boyut fraksiyonlarında Al₂O₃ tenöründe ve modül değerinde hafif bir iyileşmenin sağlandığı açıkça görülmektedir. Başlangıçta besleme tenör değerleri %57,52 Al₂O₃, %9,09 SiO₂ ve 6,33 silis modül değerine sahipken 2,360+0,850 mm tane boyutu incelendiğinde ise %58,36 Al₂O₃, %8,85 SiO₂ ve 6,59 silis modül değerine ulaşıldığı görülmektedir. Ayrıca, -0,045 fraksiyonu incelendiğinde ise %51,83 Al₂O₃, SiO₂ %12,35 ve 4,20 silis modül değişimlerini görülmektedir. İnce boyutlu fraksiyonlar dikkate alındığında, Al₂O₃ tenörü azalırken, SiO₂ tenöründe artışlar meydana gelmiştir. Ayrıca, ince tane boyut fraksiyonlarında silis içeriği arttıkça modül değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Örneğin, modül değerinin en düşük olduğu tane fraksiyonunda (-0,045 mm) 4,20’ye düşmüştür. 60 dakikalık aşındırmalı yıkama ile Bayer prosesine doğrudan beslenecek kritik modül değerine ulaşılmamıştır.

Çizelge 4.5. 120 dakika aşındırıldıktan sonra yaş eleme/yıkama işleminden geçirilmiş cevherin analizi

Tane Boyu (mm)	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Dağılım (%)		Modül (Al ₂ O ₃ /SiO ₂)
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
-2,360 +0,850	54,16	57,75	8,84	57,69	52,67	6,53
-0,850 +0,300	24,77	57,61	8,85	24,94	24,11	6,51
-0,300 +0,106	9,91	57,67	8,83	9,98	9,63	6,53
-0,106 +0,045	3,16	55,36	8,42	3,06	2,93	6,57
-0,045	8,00	52,58	12,31	7,35	10,83	4,27
Toplam	100	57,22	9,10	100	100	6,29

120 dakika aşındırılan boksit cevheri daha sonra yaş eleme/yıkama işleminden geçirilen cevher incelendiğinde; ince tane boylarına inildiğinde fraksiyonların Al_2O_3 oranının azaldığı, SiO_2 oranının ise arttığı açık bir şekilde Çizelge 4.5’de görülmektedir. En ince fraksiyonda (-0,045 mm) en düşük silis modül değeri 4,27’ye düşmüştür. En iri (-2,360 +0,850) fraksiyonunda en yüksek olduğu Al_2O_3 tenörünün %57,75’e ulaşırken en ince fraksiyona inildikçe (0,045 mm) Al_2O_3 tenör değerinde ise azalmanın ve SiO_2 tenöründe ise artış meydana gelmiş olduğu görülmekte artan SiO_2 tenör değerinin modül değerinin düşmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak aşındırılmalı yıkama ile yapılan deneyde Bayer prosesine doğrudan beslenecek silis modülüne ulaşılmamıştır.

Çizelge 4.6. 240 dakika aşındırıldıktan sonra yaş eleme/yıkama işleminden geçirilmiş cevherin analizi

Tane Boyu (mm)	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Dağılım (%)		Modül ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$)
		Al_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	% SiO_2	
-2,360 +0,850	55,91	57,48	8,77	56,16	53,94	6,55
-0,850 +0,300	22,27	57,73	8,82	22,46	21,60	6,54
-0,300 +0,106	9,18	57,58	8,72	9,24	8,81	6,60
-0,106 +0,045	2,79	58,28	8,61	2,84	2,64	6,77
-0,045	9,85	52,58	12,10	9,05	13,11	4,34
Toplam	100	57,08	9,10	100	100	6,27

Üç farklı zaman diliminde (60, 120, 240 dakika) aşındırılmalı yıkama yapılarak boksit cevheri bünyesinde bulunan silisleri eleme/yıkama yöntemiyle uzaklaştırma deneyleri yapılmıştır. Numunemiz 240 dakika aşındırıldıktan sonra yaş eleme/yıkama işleminden geçirilmiş cevherin analiz sonuçları incelendiğinde; başlangıçta %57,08 Al_2O_3 , %9,10 SiO_2 tenörüne ve 6,27 modül değerine sahip cevherdeki değişimlere (Çizelge 4.6) bakıldığında en iri fraksiyondan ince fraksiyona doğru genel olarak Al_2O_3 tenöründe azalmalarında meydana geldiği ve SiO_2 tenöründe ise artmanın olduğu görülmektedir. modül değerindeki değişimleri incelediğimizde çok az da olsa düşüşün olduğu görülmektedir. ince fraksiyondaki (-0,045 mm) bu modül değerindeki bu düşüşün SiO_2 miktarındaki artışından kaynaklandığı açık bir şekilde görülmektedir. Başlangıçta 6,27 olan modül değerinin kırma ile yapılan aşındırılmalı yıkama ile en iri fraksiyonda (-2,360 +0,850 mm) maksimum 6,55 olurken bu değer ince fraksiyonlara

doğru düşerek 4,34'e kadar düşmüştür. Genel olarak yapılan aşındırma yıkama ile yaş eleme/yıkama işleminden geçirilmiş cevherin doğrudan Bayer prosesine beslenecek modül değerine ulaşılmamıştır. Birinci vd. (2018b) nin aşındırma yıkama yöntemiyle silis uzaklaştırmaya yönelik boksit cevherini önce kırma işlemlerinden geçirildikten sonra bir karıştırıcı ortam içerisinde boksit cevherine aşındırma yıkama işlemi yapılarak iri ve ince tanelerde meydana gelebilecek silis modül değişimini tespit etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada tane boyut dağılımlarında bulunan Al_2O_3 , SiO_2 içerikleri ve silis modül değerlerine bakarak tane boyut dağılımının, aşındırma yıkama işlemiyle silis modüldeki herhangi bir değişimin meydana gelip gelmediğini belirlemek için bir takım çalışmalar yapmışlardır.

4.3. Farklı Tane Boylarında Yapılan Flotasyon Deney Sonuçları

Flotasyon çalışmalarında en önemli parametrelerden biri besleme tane boyutudur. Boksit flotasyonu besleme tane boyunun etkisi, bastırıcı miktarı, toplayıcı türü ve miktarı ayrıca hangi pH aralığında optimum koşulların sağlandığını belirlenmesi amacıyla -212 μm , -106 μm , -75 μm ve -53 μm olmak üzere dört farklı tane boyutunda hazırlanmış boksit cevherinin ters flotasyon yöntemi ile silikatli minarellerin uzaklaştırılıp konsantride en ideal verim ve özellikle modül değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

4.3.1. 212 μm tane boyutu altına öğütülmüş cevherin flotasyonu

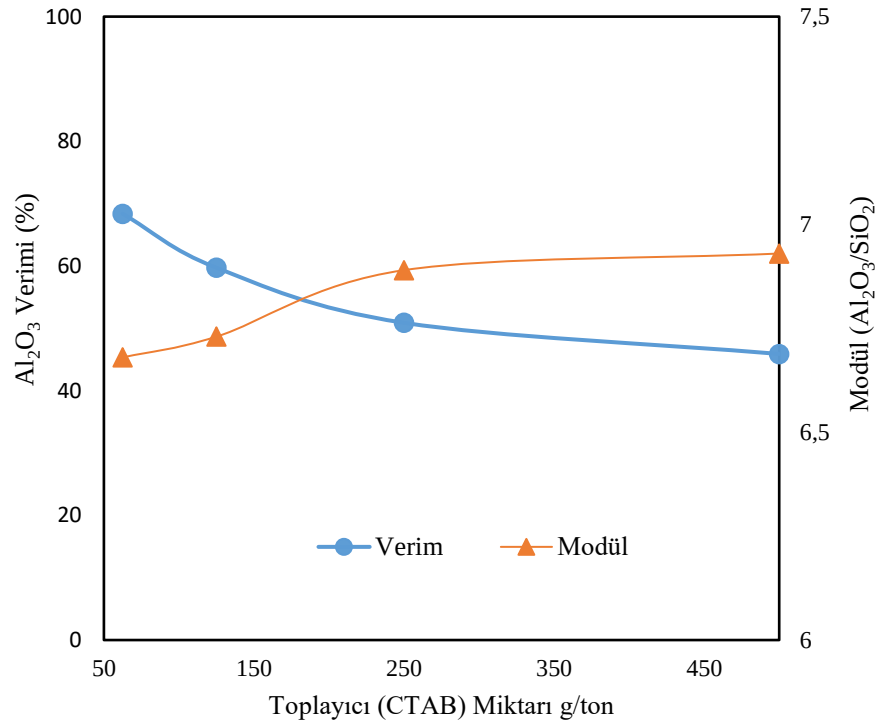
212 μm tane boyutu altına öğütülmüş boksit cevherin ters flotasyon ile en uygun koşullarını belirlemek amacıyla iki farklı toplayıcı (DDA ve CTAB) ve bastırıcı miktarlarının yanı sıra uygun pH ortamını belirlemektir. Böylelikle 212 μm tane boyutu altına öğütülmüş boksit cevherin Bayer prosesi için kabul görülen silis modüllüne hangi flotasyon şartlarında ulaşip ulaşmadığını belirlenecektir.

Toplayıcı miktarının etkisi: Yapılan bu deneysel çalışmanın amacı tane boyutu 212 μm altına öğütülmüş boksit cevheri içerisinde bulunan silikatli minarellerin yüzdürülerek uzaklaştırılması amacıyla en uygun toplayıcı miktarlarını tespit etmek ve kullanılan bu iki farklı katyonik toplayıcının (CTAB ve DDA) verimdeki Al_2O_3 ve SiO_2 değişimlerinin nasıl değiştiğini belirlemek ayrıca Bayer prosesine beslenecek boksit cevherinin kabul görülen silis modül değerinin (kabul görülen değer 7 dir) üzerine çıkıp çıkmadığını belirlemektir.

Toplayıcı (CTAB) miktarının belirlenmesi: Yapılan deneysel çalışmada bazı parametreler (köpürtücü miktarı 35 g/t, bastırıcı kullanılmadı, pH: 5,5) sabit tutularak toplayıcı miktarı katları şeklinde artırılarak uygun toplayıcı miktarı belirlenmeye çalışılmıştır.

Deney sonuçlarına bakıldığında Çizelge 4.7’de görüldüğü üzere toplayıcı miktarı sırasıyla 62,5, 125, 250 ve 500 g/t artırılması konsantre içerisinde bulunan Al_2O_3 tenöründe artış meydana gelirken SiO_2 tenöründe azalma olduğu görülmektedir. Toplayıcı miktarının artışıyla beraber konsantre mikarında azalmanın olduğu ve aynı şekilde verim değerinde de düşüşlerin meydana geldiği görülmektedir. Başlangıçta 6,36 olan silis modül değerinin toplayıcı miktarındaki artışıyla bu değerinde arttığı görülmüştür. Boksit cevheri içerisinde bulunan silikatli minarellerin yüzdürülmesinde toplayıcı miktar artışının olumlu etkisinin olduğu görülmekte fakat Bayer prosesine beslenecek modül değerinin altında kalmakta olduğunu görünmektedir. Toplayıcı miktarının modül ve verim arasındaki değişim Şekil 4.1’de açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 4.1. CTAB miktarının verim ve modül üzerindeki etkisi



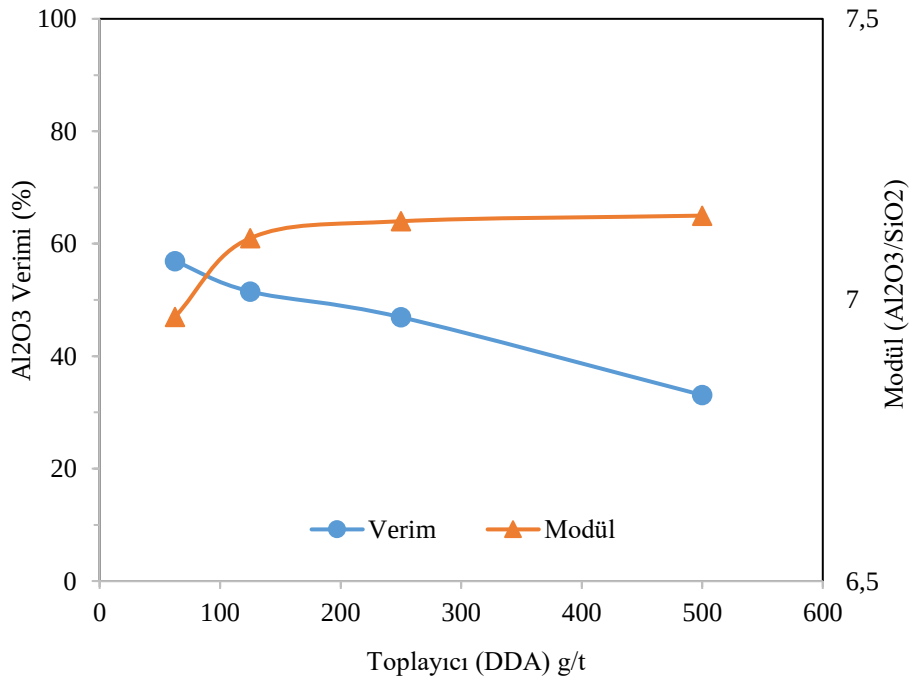
Çizelge 4.7. 212 µm altına öğütülmüş cevherin CTAB miktarının etkisi (pH: 5,5, 35 g/t MIBC, bastırıcı kullanılmadı)

CTAB MİKTARI (g/t)	Ürünler	Miktar (%)	Tenör (%)		Verim (%)		Modül (Al ₂ O ₃ /SiO ₂)
			Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
62,5	Konsantre	67,95	57,71	8,63	68,38	65,08	6,68
	Ara ürün	26,02	57,34	9,53	26,02	27,52	6,01
	Atık	6,03	53,11	11,01	5,57	7,36	4,82
125	Konsantre	59,19	57,85	8,59	59,72	56,43	6,73
	Ara ürün	30,00	57,42	9,48	30,04	31,56	6,05
	Atık	10,81	54,22	10,00	10,22	11,99	5,42
250	Konsantre	50,31	58,00	8,41	50,89	46,95	6,89
	Ara ürün	31,40	57,77	9,46	31,64	32,96	6,10
	Atık	18,29	54,73	9,88	17,46	20,02	5,53
500	Konsantre	45,25	58,15	8,39	45,89	42,13	6,93
	Ara ürün	32,32	57,75	9,40	32,55	33,71	6,14
	Atık	22,43	55,06	9,69	21,54	24,12	5,68
Besleme		100	57,33	9,01	100	100	6,36

Toplayıcı (DDA) miktarının etkisi: DDA miktarının etkisini görmek ve en uygun toplayıcı miktarını belirlemek amacıyla 62,5, 125, 250 ve 500 g/t DDA miktarları kullanılmış olup deney pH: 5,5’de bastırıcı ve köpürtücü kullanılmadan yapılmıştır. Bazı katyonik toplayıcıların toplayıcı özelliğinin yanı sıra köpürtücü özeliği taşıdığıda bilinmektedir. Çizelge 4.8’de bakıldığında toplayıcı miktarının artırılması ile konsantre içerisinde bulunan Al₂O₃ tenöründe artış meydana gelirken SiO₂ tenöründe azalma olduğu görülmektedir. Başlangıçta 62,5 g/t toplayıcı kullanılarak elde edilen konsantrede Al₂O₃ tenörü %58,01 iken bu değer 500 g/t toplayıcıda ise %58,27 olduğu modül değerinin ise 7,15’e çıktığı görülmektedir. Şekil 4.2’de toplayıcı miktarındaki değişimin modül ve verim üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Beslemede 6,36 olan silis modül değerinin 500 g/t DDA kullanılarak bu değer 7,15’e çıkartılmıştır. Bayer prosesinde kabul göre silis modül değeri üzerine çıkılmıştır.

Çizelge 4.8. 212 µm altına öğütülmüş cevherin DDA miktarının etkisi (pH: 5,5, bastırıcı kullanılmadı)

DDA MİKTARI (g/t)	Ürünler	Miktar (%)	Tenör (%)		Verim (%)		Modül (Al ₂ O ₃ /SiO ₂)
			Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
62,5	Konsantre	56,25	58,01	8,32	56,91	51,94	6,97
	Ara ürün	33,57	56,92	9,78	33,33	36,43	5,82
	Atık	10,18	54,92	10,27	9,75	11,60	5,34
125	Konsantre	50,34	58,66	8,25	51,50	46,09	7,11
	Ara ürün	35,26	56,33	9,64	34,65	37,72	5,84
	Atık	14,40	55,12	10,10	13,84	16,14	5,46
250	Konsantre	45,91	58,61	8,20	46,93	41,78	7,14
	Ara ürün	33,74	56,39	9,60	33,18	35,78	5,87
	Atık	20,35	56,00	9,86	19,87	22,27	5,68
500	Konsantre	32,55	58,27	8,15	33,08	29,44	7,15
	Ara ürün	36,50	57,28	9,52	36,46	38,56	6,02
	Atık	30,95	56,49	9,31	30,50	31,98	6,07
Besleme		100	57,33	9,01	100	100	6,36



Şekil 4.2. Toplayıcı miktarının verim ve modül oranına etkisi

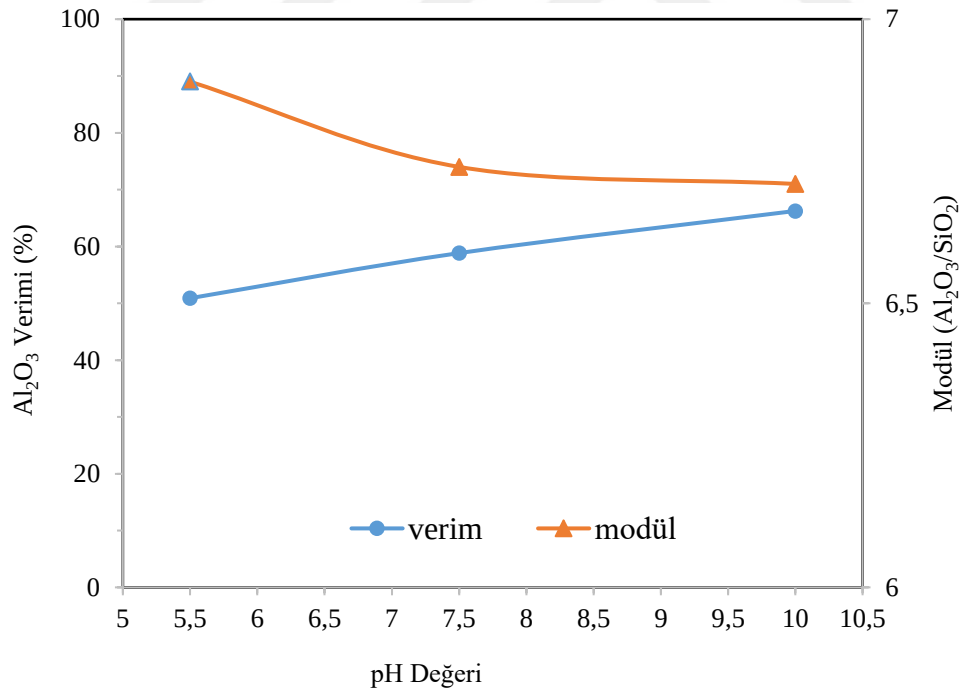
pH etkisinin incelenmesi: 212 µm altına öğütülmüş boksit cevheri ters flotasyon yöntemiyle uzaklaştırılmak istenilen silikatli minerallerin en uygun pH aralığında yüzdürüldüğünü belirlemek amacıyla farklı pH'larda, sabit miktarda toplayıcılar (CTAB ve DDA) kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Üzerinde çalışma yapılan boksit cevheri içerisindeki gang minarelleri genellikle silikatli (kaolinitin, illit, hallosit vb.) bileşiklerdir.

CTAB varlığında pH değişiminin etkisi: pH etkisinin belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmada 250 g/t CTAB, köpürtücü (35 g/t MIBC) ile bastırıcı kullanılmadan farklı pH (5,5-7,5 ve 10) ortamlarında yapılan çalışmada Al₂O₃ verim ve modül değerindeki değişimi incelenmiştir. Çizelge 4.9'de deneysel sonuçlar incelendiğinde pH artışı ile beraber verim değerinin yükseldiği görülmektedir. ayrıca pH artışıyla beraber konsantrede bulunan Al₂O₃ tenöründe azalmanın meydana geldiği SiO₂ tenöründe ise artışın meydana geldiği görülmektedir ayrıca pH artışının modül değerini düşürdüğünü göstermektedir. Örneğin pH 5,5'de konsantrede bulunan Al₂O₃ tenörü %58 iken bu oran pH 7,5 ve pH 10'da sırasıyla %57,91 ve %57,78'lere düştüğü görülmektedir. Ayrıca konsantredeki silis tenörünün yükseldiği görülmekte ve buna bağlı olarak modül oranında düşmenin olduğu görülmüştür. Görüldüğü gibi ortam pH'ının artması yüzdürülmek istenen silikatli bileşik miktarının düşmesine neden olmuştur. En yüksek Al₂O₃ verim değeri pH 10'de %66,25 iken aynı ortamda en düşük modül oranı 6,71 olduğunu görülmektedir. Sonuç olarak 212 µm altına öğütülmüş boksit cevherinin katyonik toplayıcı olan CTAB ile farklı pH ortamlarında yapılan deneysel çalışmada en iyi sonucun pH 5,5'te modül değerinin 6,89'da kaldığı görülmektedir ve Bayer prosesine beslenecek silis modül değeri olan 7'ye ulaşamadığı görülmektedir.

Şekil 4.3'te modül ve verim arasındaki fark açık bir şekilde verilmiştir. Verim oranındaki artış, içerisinde bulunan kaolinit gibi silikat minarellerinin artışına ve silis modül değerinin düşmesine neden olmuştur. pH değişiminin ortamda yüzdürülmek istenen ve/veya bastırılmak istenen minareller üzerinde oldukça etkili olduğu söylenebilir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde CTAB ile yapılan çalışmada en uygun pH'ın 5,5'te olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.9. CTAB varlığında pH etkisi (250 g/t CTAB, 35 g/t MIBC, bastırıcı kullanılmadı)

pH Değişimi	Ürünler	Miktar (%)	Tenör (%)		Verim (%)		Modül ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$)
			Al_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	SiO_2	
(Düşük) 5,5	Konsantre	50,31	58,00	8,41	50,89	46,95	6,89
	Ara ürün	31,40	57,77	9,46	31,64	32,95	6,10
	Atık	18,29	54,73	9,88	17,46	20,05	5,53
(Doğal) 7,5	Konsantre	58,25	57,91	8,59	58,83	55,53	6,74
	Ara ürün	25,78	57,84	9,24	26,00	26,43	6,25
	Atık	15,97	54,39	10,16	15,15	18,00	5,35
(Yüksek) 10	Konsantre	65,74	57,78	8,61	66,25	62,82	6,71
	Ara ürün	23,27	57,40	9,46	23,29	24,43	6,06
	Atık	10,99	54,48	10,44	10,44	12,73	5,21
Besleme		100	57,33	9,01	100	100	6,36



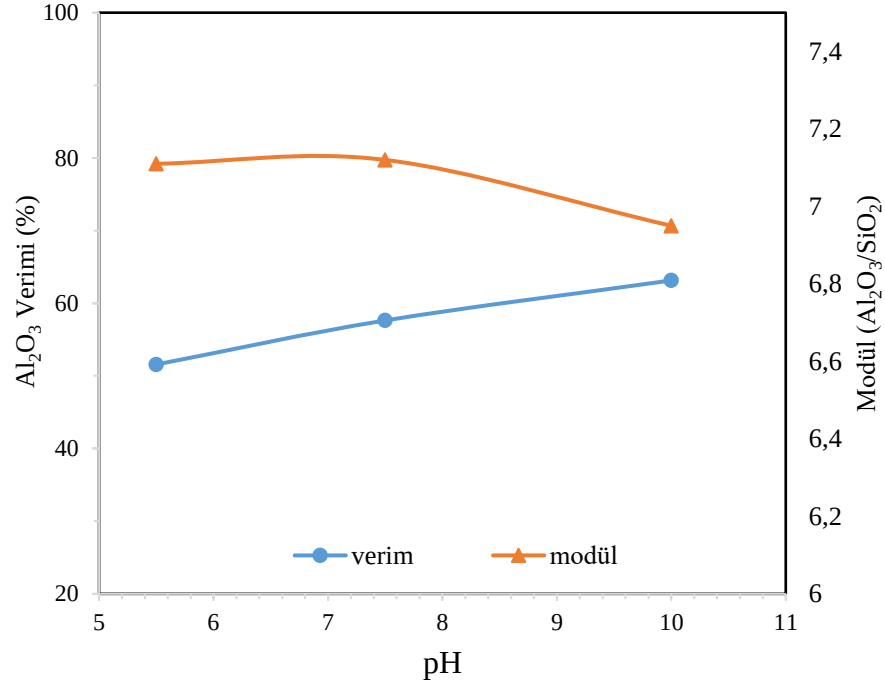
Şekil 4.3. pH değişiminin verim ve modül üzerindeki etkisi

DDA varlığında pH değişiminin etkisi: Bu çalışmadaki amaç üç farklı pH ortamında 212 µm altında öğütülmüş boksit cevheri içerisinde bulunan silikatli minarellerin DDA varlığında en uygun pH aralığını belirlemektir. Önceki çalışmada CTAB ile yapılan deneyde aynı koşullar altında çalışılarak 125 g/t DDA ile bastırıcı kullanılmadan en uygun pH aralığının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 4.10 incelendiğinde farklı pH ortamında (Düşük(5,5); Doğal(7,5); Yüksek(10,5)) konsantre tenörlerinde ve modül değerlerinde farklılıkların olduğu görülmektedir. pH 5,5’da Al₂O₃ tenör oranı %58,66 iken modül değeri 7,11 değerini bulmuştur. Ortamın pH değeri artırıldığında Al₂O₃ tenör oranlarında düşüşlerin meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca pH değerinde meydana gelen değişimlere bakıldığında konsantredeki verim değerinde artış olduğu Şekil 4.4’de görülmektedir. pH 5,5’den 7,5’e çıkarken 7,11 olan modül değerinin çok az bir farkla 7,12’ye yükselmiştir. pH 10’a bakıldığında konsantrede bulunan SiO₂ değerinde bir değişim olmazken Al₂O₃ tenör değerinde ise azalma meydana gelmekte ve modül değerinin 6,95’e düştüğü görülmektedir. Sonuç olarak DDA türü toplayıcı ile düşük pH 5,5 ve 7,5’te ortamında Bayer prosesine beslenebilecek sınır modül değerinde konsantre elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.10. Toplayıcı (DDA) varlığında pH etkisi (bastırıcı kullanılmadı)

pH Değişimi	Ürünler	Miktar (%)	Tenör (%)		Verim (%)		Modül (Al ₂ O ₃ /SiO ₂)
			Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
Düşük 5,5	Konsantre	50,34	58,66	8,25	51,50	46,09	7,11
	Ara ürün	35,26	56,33	9,65	34,64	37,76	5,83
	Atık	14,40	55,12	10,10	13,84	16,14	5,45
Doğal 7,5	Konsantre	57,00	57,96	8,14	57,63	51,19	7,12
	Ara ürün	31,95	56,70	9,87	31,60	35,00	5,74
	Atık	11,05	55,88	11,01	10,77	13,50	5,07
Yüksek 10	Konsantre	62,79	57,65	8,25	63,14	57,77	6,95
	Ara ürün	28,45	57,45	9,85	28,50	31,10	5,83
	Atık	8,76	54,62	11,45	8,34	11,13	4,77
Besleme		100	57,33	9,01	100	100	6,36



Şekil 4.4. pH ortamının verim ve modül oranına etkisi

Bastırıcı (Nişasta) etkisinin incelenmesi: Deneysel çalışmalarda önemli reaktiflerden biri olan bastırıcılar flotasyon deneylerinde oldukça önemlidir. Boksit cevherinin ters flotasyon çalışmasında amaç silikatli minarellerin yüzdürülmesini sağlamakken aynı zamanda boksit minarellerinde yüzmesini engellemektir. Bu çalışmada CTAB ve DDA gibi iki farklı toplayıcı varlığında en uygun bastırıcı miktarını belirlemektir. Yapılan araştırma ve ters flotasyon çalışmalarında, özellikle boksit cevherlerinin bastırılmasında farklı bastırıcılar kullanıldığı bilinmektedir. Özellikle nişasta kullanımı boksit cevherlerinde etkili bir bastırıcı olduğu bilinmektedir.

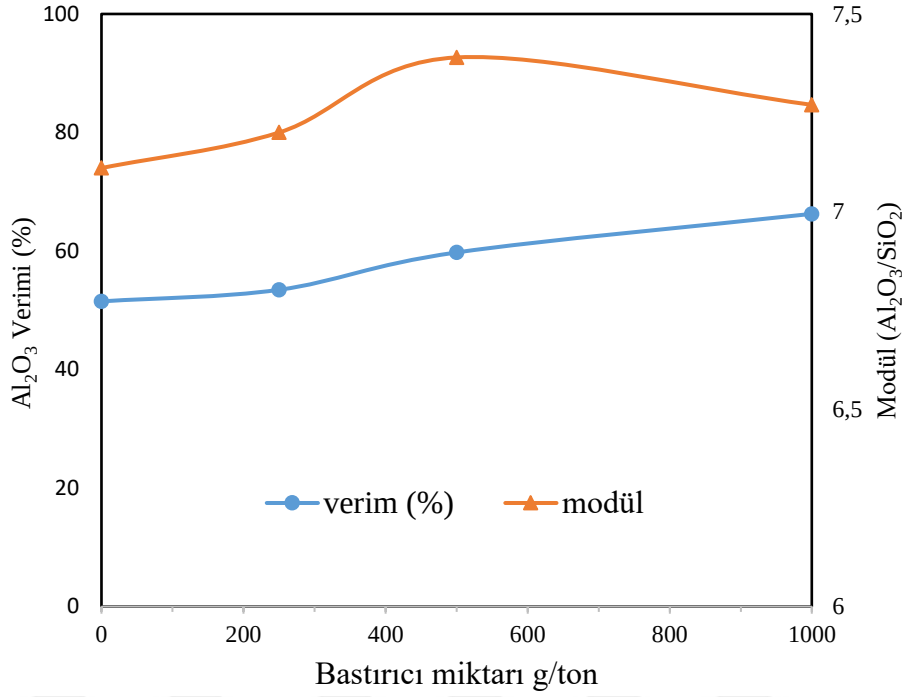
CTAB varlığında bastırıcı (Nişasta) miktarının etkisi: Farklı nişasta miktarı ile elde edilen flotasyon sonuçları Çizelge 4.11’de verilmiştir. pH 5,5’te 250 g/t CTAB ve 35 g/t MIBC kullanılarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde bastırıcı miktarının artması ile konsantrenin Al₂O₃ tenörlerinde ve modül değerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Bastırıcı kullanılmadan elde edilen konsantrenin Al₂O₃ %50,89 ve modül değeri 6,89 iken, 500 g/t bastırıcı kullanılarak elde edilen konsantrenin Al₂O₃ verimi %61,62 modül değeri 7,18 olarak en iyi sonucu vermiştir. Verim ve modül değerlerindeki bu iyileşme boksit minarellerinin bastırılmasında nişasta kullanımının

etkili olduğunu göstermektedir. Nitekin bu görüşü destekleyen benzer literatür çalışmaları da bulunmaktadır. (Xia vd., 2009; Xia vd., 2010; Marino, 2012; Rodrigues, 2016). Ayrıca yüksek miktarda bastırıcı kullanımı modül değerinde düşüşe neden olmaktadır. Örneğin 500 g/t bastırıcı kullanılarak konsantrede bulunan Al_2O_3 'nin tenör değeri %58,74 iken 1000 g/t bastırıcı kullanıldığında elde edilen konsantrenin Al_2O_3 'nin tenör değerinin %58,46'ya modül değerinin ise 7,17'ye düştüğü görülmektedir.

Sonuç olarak Bayer prosesine beslenecek boksit cevherimizin kritik silis modül değeri olan 7'nin üzerine ulaştığı görülmektedir. Modül ve verim oranının bastırıcı etkisi ile değişimi Şekil 4.5'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.11. 212 μm altına öğütülmüş cevherin CTAB varlığında bastırıcı miktarının etkisi (pH:5,5, CTAB 250 g/t, 35 g/t MIBC)

Nişasta Miktarı (g/t)	Ürünler	Miktar (%)	Tenör (%)		Verim (%)		Modül (Al_2O_3/SiO_2)
			Al_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	SiO_2	
0	Konsantre	50,31	58,00	8,41	50,89	46,95	6,89
	Ara ürün	31,40	57,77	9,46	31,64	32,96	6,10
	Atık	18,29	54,73	9,88	17,46	20,05	5,53
250	Konsantre	56,73	57,85	8,21	57,24	51,69	7,04
	Ara ürün	26,98	58,17	10,13	27,37	30,33	5,74
	Atık	16,29	54,12	9,93	15,37	17,95	5,45
500	Konsantre	60,15	58,74	8,17	61,62	54,54	7,18
	Ara ürün	24,79	55,93	10,34	24,18	28,44	5,40
	Atık	15,06	54,00	10,17	14,18	16,99	5,30
1000	Konsantre	63,08	58,46	8,15	64,32	57,05	7,17
	Ara ürün	23,63	56,23	10,63	23,17	27,87	5,28
	Atık	13,29	53,91	10,21	12,49	15,06	5,28
Besleme		100	57,33	9,01	100	100	6,36



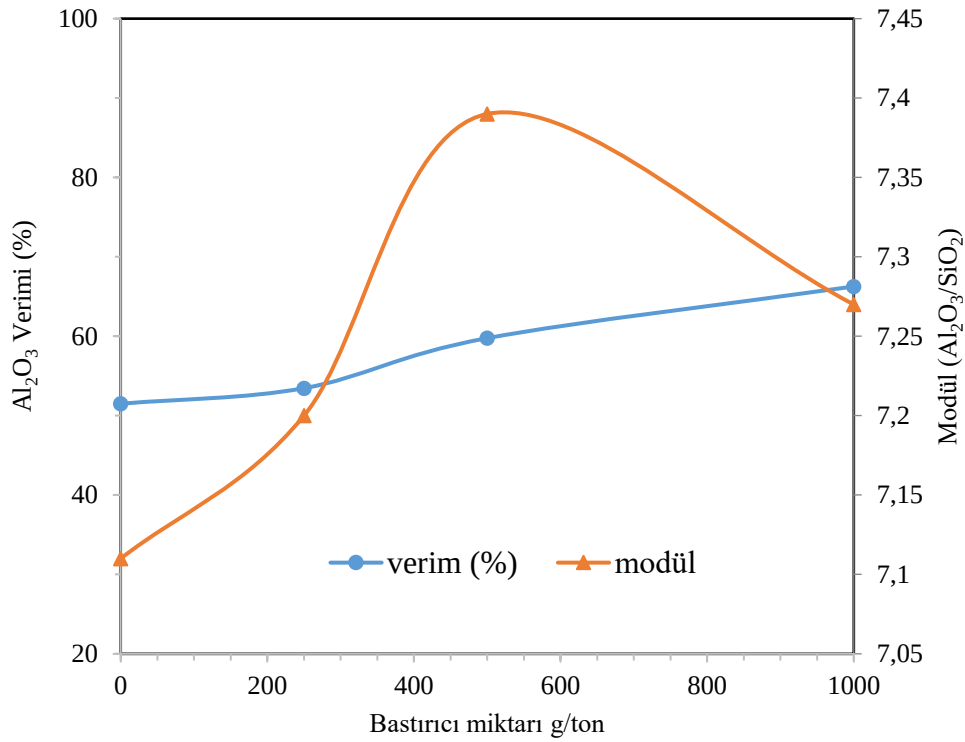
Şekil 4.5. Bastırıcı miktarının verim ve modül oranına etkisi

DDA varlığında bastırıcı (Nişasta) miktarının etkisi: Farklı miktarlarda nişasta'nın kullanılmasıyla elde edilen flotasyon sonuçlar Çizelge 4.12'de verilmiştir. Toplayıcı olarak kullanılan DDA varlığında bastırıcı miktarının belirlenmesi amacıyla sabit parametrelerde (pH 5,5, köpürtücü kullanılmadı) belirli miktarda bastırıcı ve bunların katları (0, 250, 500, 1000 g/t) kullanılarak en uygun bastırıcı mikarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde bastırıcı miktarının artması ile konsantrenin Al₂O₃ tenörlerinde çok farklı bir değişimin olmadığı ama SiO₂ tenöründe azalmanın olduğu görülmektedir. Başlangıçta konsantrenin tenöründe %58,66 Al₂O₃ ve %8,25 SiO₂ içerirken bu oran 500 g/t nişasta kullanıldığında tenör değerlerin sırasıyla %58,36 Al₂O₃ ve %7,90 SiO₂ olduğu görülmekte ve ayrıca bununla birlikte modül değerinin 7,39 seviyesine çıktığı görülmektedir. Bastırıcı miktarındaki artışın verim değerlerinde artışlar meydana geldiği Şekil 4.6'da açıkça görülmektedir. Ayrıca yüksek miktarda bastırıcı kullanımı bir önceki CTAB türü toplayıcı deneyinde olduğu gibi modül değerinde düşüşe neden olduğu görülmektedir. Modül değerlerindeki değişimler incelendiğinde modül değerinin 500 g/t bastırıcı kullanımında 7,39 seviyesindeyken 1000 g/t bastırıcı miktarı kullanıldığında modül değerinin 7,27 seviyesine düştüğü görülmektedir.

Çizelge 4.12. 212 µm altına öğütülmüş cevherin DDA varlığında bastırıcı miktarının etkisi (125 g/t DDA, pH: 5,5)

Nişasta Miktarı (g/t)	Ürünler	Miktar (%)	Tenör (%)		Verim (%)		Modül (Al ₂ O ₃ /SiO ₂)
			Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
0	Konsantre	50,34	58,66	8,25	51,50	46,09	7,11
	Ara ürün	35,26	56,33	9,65	34,65	37,76	5,84
	Atık	14,40	55,12	10,10	13,85	16,14	5,45
250	Konsantre	52,48	58,41	8,11	53,46	47,24	7,20
	Ara ürün	33,73	56,68	9,95	33,35	37,25	5,70
	Atık	13,79	54,82	10,14	13,19	15,52	5,40
500	Konsantre	58,71	58,36	7,90	59,76	51,48	7,39
	Ara ürün	31,27	56,22	10,56	30,66	27,42	5,32
	Atık	10,02	54,76	10,65	9,57	11,84	5,72
1000	Konsantre	65,25	58,23	8,01	66,27	58,00	7,27
	Ara ürün	26,24	55,89	10,85	25,58	31,60	5,15
	Atık	8,51	54,86	11,00	8,14	10,39	4,99
Besleme		100	57,33	9,01	100	100	6,36



Şekil 4.6. DDA varlığında, nişasta miktarının verim ve modül oranına etkisi

4.3.2. 106 µm tane boyutu altına öğütülmüş cevherin flotasyonu

106 µm tane boyutu altına öğütülmüş boksit cevherlerinin sabit koşullar (500 g/t nişasta, pH: 5,5) altında iki farklı toplayıcılar (CTAB ve DDA) kullanarak boksit cevherleri içerisinde bulunan silikatlı minarellerin (kaolinit, illit, halloysit vb.) uzaklaştırılması ve tane boyutunun silis modülüne etkisi incelenmek istenmiştir.

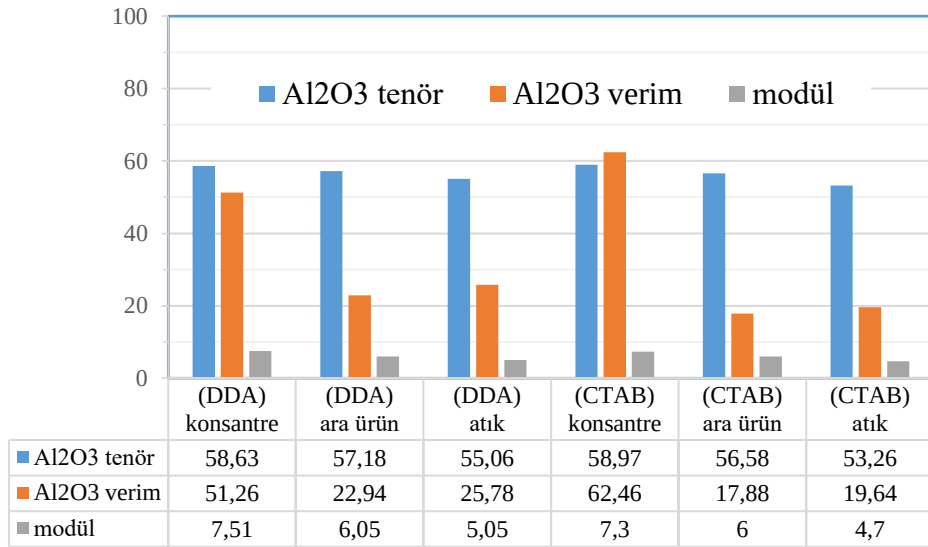
106 µm tane boyutu altına öğütülmüş boksit cevherin CTAB ve DDA etkisi: Tane boyut dağılımı flotasyon deneyleri için önemli parametlerden biridir. 106 µm altına öğütülmüş boksit cevheri pH: 5,5 ve 500 g/ton bastırıcı (nişasta) gibi parametreler sabit tutularak yapılan flotasyon sonuçları Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'te verilmiştir. Ayrıca CTAB ile yapılan çalışmada köpürtücü (35 g/t MIBC) kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. Her iki çalışmadaki konsantre tenörleri incelendiğinde CTAB ile yapılan çalışma konsantre tenörü %58,97 Al₂O₃ ve %8,08 SiO₂ içeriğine sahipken DDA ile yapılan çalışma konsantre tenörü ise %58,61 Al₂O₃ ve %7,80 SiO₂ içerdiğine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca beslemede 6,36 olan silis modül değerlerinin CTAB ile 7,30'lara çıkarken DDA ile bu oran 7,51'e ulaştığı görülmektedir. Ayrıca verim değerleri incelendiğinde ise CTAB ile yapılan çalışmadaki verim değerinin %62,46 iken DDA ile yapılan çalışmanın verim değerinin %51,26 olduğu görülmektedir. Deneysel çalışma sonucunda beslemede 6,36 olan silis modül değerinin her iki çalışmada da 7'nin üzerine çıktığı görülmektedir. 106 µm tane boyutu altına öğütülmüş boksit cevherin flotasyon sonuçlarındaki Al₂O₃ verim, tenör ve modül değişimlerindeki farklılıklar Şekil 4.7'de görülmektedir.

Çizelge 4.13. -106 µm tane boyutundaki cevherin CTAB varlığında flotasyonu (250 g/t CTAB, 500 g/t Nişasta, pH: 5,5, 35 g/t MIBC)

Ürünler	Miktar (%)	Tenör (%)		Verim (%)		Modül (Al ₂ O ₃ /SiO ₂)
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
Konsantre	60,73	58,97	8,08	62,46	54,46	7,30
Ara Ürün	18,12	56,58	9,43	17,88	18,96	6
Atık	21,15	53,26	11,32	19,64	26,57	4,70
Besleme	100	57,33	9,01	100	100	6,36

Çizelge 4.14. -106 μm tane boyutundaki cevherin DDA varlığında flotasyonu (125 g/t DDA, 500 g/t Nişasta, pH:5,5)

Ürünler	Miktar (%)	Tenör (%)		Verim (%)		Modül ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$)
		Al_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	SiO_2	
Konsantre	50,15	58,61	7,80	51,26	43,41	7,51
Ara Ürün	23,00	57,18	9,45	22,94	24,12	6,05
Atık	26,85	55,06	10,89	25,78	32,45	5,05
Besleme	100	57,33	9,01	100	100	6,36



Şekil 4.7. DDA ve CTAB ile -106 μm tane boyutundaki cevherin DDA ve CTAB varlığında flotasyon ile elde edilen ürünlerin Al_2O_3 tenör, verim ve modül değişimi

4.3.3. 75 μm tane boyutu altına öğütülmüş cevherin flotasyonu

Önceki çalışmalarda görüldüğü üzere 212 ve 106 μm tane boyut altına öğütülmüş flotasyon deney sonuçlarına bakıldığında tane boyutundaki değişim konsantrede bulunan Al_2O_3 ve SiO_2 içeriğinin yanı sıra modül değişimi üzerine önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu deneysel çalışmada 75 μm altına öğütülmüş boksit cevheri içerisinde bulunan silikatli minarellerin CTAB ve DDA türü toplayıcı türleri kullanılarak silikatli minarellerin yüzdürülerek uzaklaştırılması ve modül değerinin yükseltilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada tane boyut değişiminin modül üzerindeki değişimi gözlemlemek için önceki deneylerde olduğu gibi bazı parametreler (pH: 5,5

ve 500 g/t nişasta) sabit tutulmuş olup CTAB türü toplayıcı kullanılan çalışmada köpürtücü (35 g/t MIBC) kullanılmıştır.

75 µm tane boyutu altına öğütülmüş boksit cevherin CTAB ve DDA etkisi:
Yapılan çalışmada iki farklı toplayıcı kullanılarak 75 µm tane boyutu altına öğütülmüş boksit cevherinin CTAB ve DDA ile en uygun flotasyon koşulları belirlenmesi amaçlanmıştır. Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16’de analiz sonuçları incelendiğinde CTAB ile yapılan çalışmada konsantrede bulunan Al₂O₃ tenör değerinin %59,14’e çıktığı SiO₂ içeriğinin ise %7,91’e düştüğü görülmektedir. Ayrıca silis modül değerine bakıldığında 7,47’ye yükseldiği görülmektedir. DDA ile yapılan çalışmanın analiz sonucuna baktığımızda ise konsantredeki Al₂O₃ verim değerinin %58,78 olduğu SiO₂ içeriği ise %7,46 olduğu görülmektedir ve iki çalışmada da iyileşmenin olduğu görülmektedir. Silis modül değerlerine incelendiğinde CTAB ile yapılan çalışmanın modül değerinin 7,47’ye ulaştığı görülürken DDA ile yapılan çalışmadaki silis modülün 7,88’e çıktığı görülmektedir. Sonuç olarak tane boyut küçülmesinde silikatli minarellerin uzaklaştırılmasında olumlu bir etkisi olduğu ve Bayer prosesine beslenecek boksit modül değeri olan 7’nin üzerine çıktığı açık bir şekilde görülmüştür. Şekil 4.8’e incelendiğinde iki çalışmada bulunan konsantredeki Al₂O₃ verim, tenör ve modül değişimleri arasındaki farkları görülmektedir.

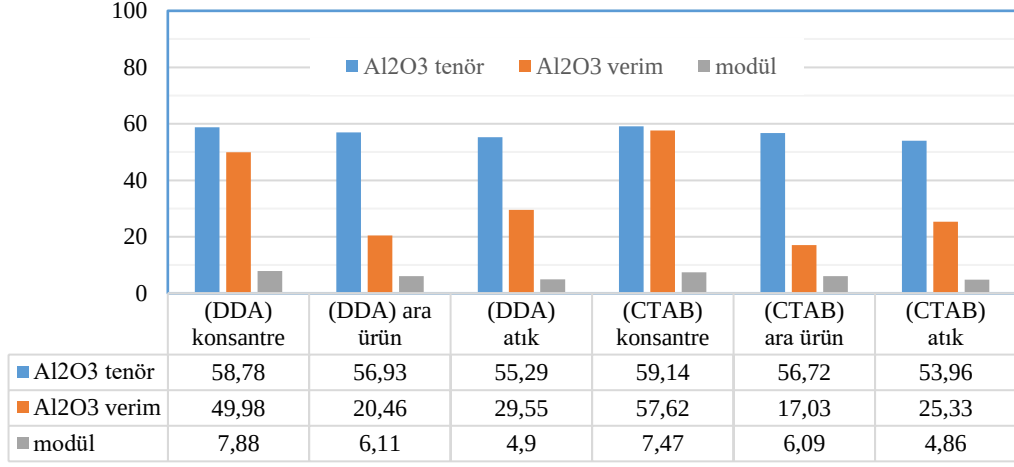
Çizelge 4.15. -75 µm tane boyutundaki cevherin CTAB varlığında flotasyonu (250 g/t CTAB, 500 g/t Nişasta, 35 g/t MIBC, pH:5,5)

Ürünler	Miktar (%)	Tenör %		Verim (%)		Modül (Al ₂ O ₃ /SiO ₂)
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
Konsantre	55,86	59,14	7,91	57,62	49,04	7,47
Ara Ürün	17,22	56,72	9,31	17,03	17,79	6,09
Atık	26,92	53,96	11,10	25,33	33,16	4,86
Besleme	100	57,33	9,01	100	100	6,36

Çizelge 4.16. -75 µm tane boyutundaki cevherin DDA varlığında flotasyonu (125 g/t DDA, 500 g/t Nişasta, pH:5,5)

Ürünler	Miktar (%)	Tenör (%)		Verim (%)		Modül Al ₂ O ₃ /SiO ₂
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
Konsantre	48,75	58,78	7,46	49,98	40,36	7,88
Ara Ürün	20,61	56,93	9,31	20,46	21,29	6,11

Atık	30,64	55,29	11,27	29,55	38,32	4,90
Besleme	100	57,33	9,01	100	100	6,36



Şekil 4.8. DDA ve CTAB ile -75 µm tane boyutundaki cevherin DDA ve CTAB varlığında flotasyon ile elde edilen ürünlerin Al₂O₃ tenör, verim ve modül değişimi

4.3.4. 53 µm tane boyutu altına öğütülmüş cevherin flotasyonu

Yapılan çalışmalarda kullanılan toplayıcı, bastırıcı, dağıtıcı gibi reaktiflerin önemi bilinmektedir. Ancak bunun yanı sıra flotasyon çalışmalarında önemli bir yere sahip olan diğer bir parametre ise tane boyut serbestleşmesidir. Tane boyut serbestleşmesinin konsantrede bulunan Al₂O₃ ve SiO₂ içeriğinin yanı sıra modül değeri, önceki deneysel çalışmalarda (212 µm, 106 µm ve 75 µm tane boyutları altında) açık bir şekilde görülmüştür. Özellikle kaolinit gibi silikatli minarellerin serbestleşme boyutunun çok ince fraksiyonlarda gerçekleştiği görülmüş ve silikatli minarellerin CTAB ve DDA türü köpürtücü ile uzaklaştırılması istenmektedir. Yapılan bu iki çalışmadaki flotasyon parametreleri sabit tutularak CTAB ile yapılan çalışmada köpürtücü (35 g/t MIBC) kullanılmıştır.

53 µm tane boyutu altına öğütülmüş boksit cevherin CTAB ve DDA etkisi: Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18’de yapılan çalışma analizleri görülmektedir. CTAB ile yapılan çalışmanın konsantre tenör değerlerine incelendiğinde %59,42 Al₂O₃ ve %7,25 SiO₂ içeriğine sahip olduğu ayrıca verim değerinin %51,88 olduğu görülmektedir. Modül oranındaki değişimi incelendiğinde ise 6,36 olan besleme silis

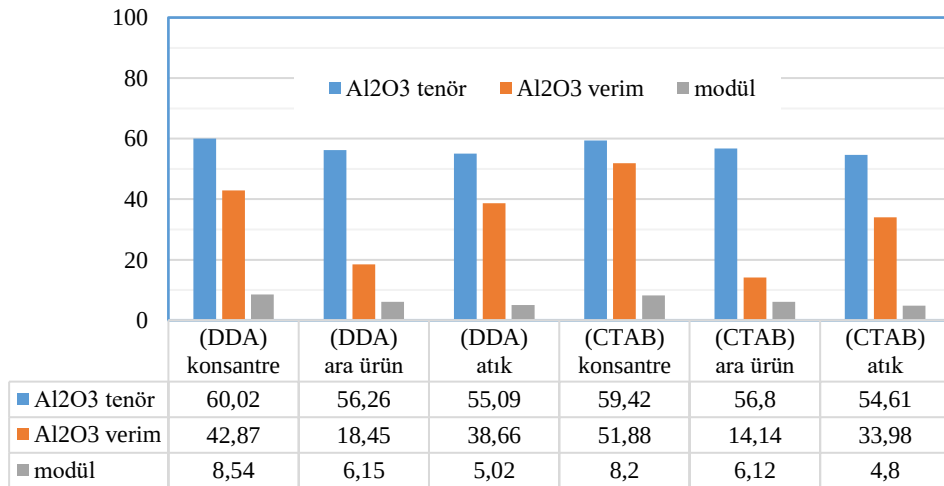
modül'ünün 8,20'ye çıktığı görülmektedir. DDA ile yapılan çalışmanın konsantre tenör değerleri incelendiğinde ise %60,02 Al_2O_3 ve %7,03 SiO_2 içeriğine sahip olduğu ve verim değerinin ise %42,87 olduğu görülmektedir. Ayrıca silis modül değerinin ise 8,54'e yükseldiği görülmektedir. Yapılan her iki çalışmada Bayer prosesi için kabul görülen silis modül değerine ulaşıldığı görülmüştür. CTAB ve DDA ile 53 μm tane boyutu altına öğütülmüş boksit cevheri konsantresindeki tenör verim ve silis modül değişimleri arasındaki değişim Şekil 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.17. -53 μm tane boyutundaki cevherin CTAB varlığında flotasyonu (250 g/t CTAB, 500 g/t Nişasta, 35 g/t MIBC, pH:5,5)

Ürünler	Miktar (%)	Tenör (%)		Verim (%)		Modül Al_2O_3/SiO_2
		Al_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	SiO_2	
Konsantre	50,06	59,42	7,25	51,88	40,28	8,20
Ara Ürün	14,27	56,80	9,28	14,14	14,70	6,12
Atık	35,67	54,61	11,37	33,98	45,01	4,80
Besleme	100	57,33	9,01	100	100	6,36

Çizelge 4.18. -53 μm tane boyutundaki cevherin DDA varlığında flotasyonu (125 g/t DDA, 500 g/t Nişasta, pH:5,5)

Ürünler	Miktar (%)	Tenör (%)		Verim (%)		Modül Al_2O_3/SiO_2
		Al_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	SiO_2	
Konsantre	40,95	60,02	7,03	42,87	31,95	8,54
Ara Ürün	18,81	56,26	9,15	18,45	19,10	6,15
Atık	40,24	55,09	10,96	38,66	48,95	5,02
Besleme	100	57,33	9,01	100	100	6,36



Şekil 4.9. DDA ve CTAB ile -53 µm tane boyutundaki cevherin DDA ve CTAB varlığında flotasyon ile elde edilen ürünlerin Al₂O₃ tenör, verim ve modül değişimi

4.4. Flotasyon Sonuçlarının Özeti

Boksit cevherlerinde bulunan safsızlıkların (kaolinit, illit, hallosit, vb.) uzaklaştırılmasında flotasyon tekniğinin yapılan çalışmalar da başarı sağlandığı açık bir şekilde görülmüştür. Bunun yanı sıra flotasyon deneylerinde kullanılan kimyasal reaktiflerin (bastırıcı, toplayıcı, pH, dağıtıcı vd.) etkileride incelenmiş olup, kullanılan katyonik türü toplayıcılar olan CTAB ve DDA toplayıcılarla yapılan çalışmalarla boksit cevherinin flotasyon çalışmaları üzerinde olumlu sonuçlar olduğu görülmüştür. Ayrıca flotasyon yöntemi yapılan tüm çalışmalarda başarı sağlandığı görünmüştür. Tüvenan cevherin 6,36 olan silis modül değerinin Bayer prosesine beslenmesi kabul görülen 7'nin üzerine çıkmıştır. Yapılan silis uzaklaştırma çalışmalarında özellikle ince fraksiyonlarda daha fazla başarı sağlandığı görülmektedir. CTAB ve DDA varlığında eşit koşullar altında yapılan tüm flotasyon sonuçlarını özetlersek;

CTAB varlığında 212 µm altında öğütülmüş cevher analiz sonuçlarına bakıldığında konsantride %50,89 Al₂O₃ verim ile 6,89 silis modül değerine ulaşmıştır.

DDA varlığında 212 µm altında öğütülmüş cevher analiz sonuçlarına bakıldığında konsantride %51,50 Al₂O₃ verim ile 7,11 silis modül değerine ulaşmıştır.

CTAB varlığında 106 µm altında öğütülmüş cevher analiz sonuçlarına bakıldığında konsantride %562,46 Al₂O₃ verim ile 7,30 silis modül değerine ulaşmıştır.

DDA varlığında 106 µm altında öğütülmüş cevher analiz sonuçlarına bakıldığında konsantride %51,26 Al₂O₃ verim ile 7,51 silis modül değerine ulaşmıştır.

CTAB varlığında 75 µm altında öğütülmüş cevher analiz sonuçlarına bakıldığında konsantride %57,62 Al₂O₃ verim ile 7,47 silis modül değerine ulaşmıştır.

DDA varlığında 75 µm altında öğütülmüş cevher analiz sonuçlarına bakıldığında konsantride %49,98 Al₂O₃ verim ile 7,88 silis modül değerine ulaşmıştır.

CTAB varlığında 53 µm altında öğütülmüş cevher analiz sonuçlarına bakıldığında konsantride %51,88 Al₂O₃ verim ile 8,20 silis modül değerine ulaşmıştır.

DDA varlığında 53 µm altında öğütülmüş cevher analiz sonuçlarına bakıldığında konsantride %42,87 Al₂O₃ verim ile 8,54 silis modül değerine çıkmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuç

Bu çalışmada yüksek silis içeriğinden dolayı Bayer prosesine doğrudan beslenemeyecek kalitedeki Doğankuzu-Mortaş (Seydişehir/Konya) boksit cevherinden flotasyonla silis uzaklaştırma olanakları araştırılmıştır. Çalışmadan çıkarılabilecek belli başlı genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir;

1. Yalnızca boyut küçültme ve sınıflandırma ile elde edilen farklı tane boyutundaki ürünlerin modül değerinde önemli bir iyileşme olmamıştır. İri tanelerden ince tanelere gidildiğinde modül değerinde düzenli bir azalmanın olduğu, ancak hiçbir tane boyunda modül değeri 7'nin üzerine çıkmamıştır.
 2. Aşındırma-yıkama yöntemi ile modül değerinde bir miktar iyileşme kaydedilmiştir. Bununla birlikte modül değeri 7'nin altında kalmıştır. Ancak en ince tanelerin Al_2O_3 ve SiO_2 içerikleri dikkate alındığında kil minerallerinin uzaklaştırılmasında etkili bir işlem olduğu tespit edilmiştir.
 3. 212 μm altına öğütülmüş cevherin DDA varlığında flotasyonu ile maksimum 7,11 modüllü bir boksit konsantresi %51,50 verimle kazanılmıştır.
 4. 106 μm altına öğütülmüş cevherin DDA varlığında flotasyonu ile maksimum 7,51 modüllü bir boksit konsantresi %51,26 verimle kazanılmıştır.
 5. 75 μm altına öğütülmüş cevherin DDA varlığında flotasyonu ile maksimum 7,88 modüllü bir boksit konsantresi %49,89 verimle kazanılmıştır.
 6. 53 μm altına öğütülmüş cevherin DDA varlığında flotasyonu ile maksimum 8,54 modüllü bir boksit konsantresi %42,87 verimle kazanılmıştır.
 7. Gerek DDA ve gerekse CTAB kullanılarak elde edilen konsantrelerin modül değeri artarken, Al_2O_3 veriminin ise genel olarak azaldığı tespit edilmiştir.
- Genel bir sonuç olarak, nispeten düşük kaliteli Doğankuzu-Mortaş bölgesi boksit cevheri flotasyonla zenginleştirilerek elde edilen boksit konsantresinin modül değeri 8,53'e çıkarılabilmektedir. Ancak Al_2O_3 verimi %42,87 oranında kalmıştır

5.2. Öneriler

1. Bayer prosesine beslenecek boksit cevherlerin liç işlemi öncesi; silisli safsızların uzaklaştırılarak Bayer prosesi sisteminde kabuk oluşumuna neden olan silikat çökmesi (kabuk oluşumu), buharlaştırma ünitelerinin iç yüzeyinde birikmesi,

bataryalardaki tıkanmalara, çözelti iletim borularının ve vanalarda kesit daralması gibi tıkanıklara yol açan sorunların önüne geçilecektir.

2. Boksit cevherlerinde bulunan safsızlıkların uzaklaştırılması durumunda Bayer prosesinde çıkacak olan kırmızı çamur miktarında önemli derecede azalmalara ve bu azalmanın ise ekstra nakliye, enerji gibi kayıpların önüne geçilebilecektir.
3. Boksit cevherleri içerisinde bulunan safsızlıkları uzaklaştırılarak hem alümina kalitesini yükseltmek (dolayısıyla alüminyum katitesini yükseltmek) hemde soda kayıplarının önüne önemli derecede geçilecektir.
4. Silikatlı minarellerin uzaklaştırılması hususundaki önemi gerek yapılan araştırmalar gereksede yapılan deneysel flotasyon çalışmaları gözler önüne sermiştir. Flotasyon çalışmalarında daha farklı reaktifler kullanılarak (özellikle toplayıcı etkisi ön plana çıkmaktadır) daha iyi sonuçların alınabilmesi hususunda çalışmalar devam ettirilmeli ve gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de bu çalışmaların en kısa zamanda hayata geçirilmesi gerekmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Anonim, (2019a). <http://web.itu.edu.tr/~gultekin/Kalinti.htm> (Erişim tarihi 6 şubat, 2019).
- (Anonim, 2019b). <https://www.britannica.com/science/gibbsite> (Erişim tarihi 15 Haziran, 2019).
- (Anonim, 2019c). <https://www.mindat.org/gm/707> (Erişim tarihi 31 Mart, 2019).
- (Anonim, 2019d). <https://www.definehediye.com/diyaspor--sultanit--dfdk53512> (Erişim tarihi 31 Mart, 2019).
- (Anonim, 2019e). <http://www.etialuminyum.com/> (Erişim tarihi 15 Haziran, 2019).
- Anonim (2019f).
http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgimerkezi/maden_potansiyel_2010/Mugla_Madenler.pdf (Erişim tarihi 22 Mart, 2019).
- Anonim (2019g).
http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgimerkezi/maden_potansiyel_2010/Adana_Madenler.pdf (Erişim tarihi 24 Ocak, 2019).
- Ahmad, I., Hartge, E. U., Werther, J., Wischnewski, R. (2014). Bauxite washing for the removal of clay. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, **21**(11), 1045-1051.
- Alan, S. (2008). *Alüminyum Raporu*. AR-GE şubesi Raportörü, Ankara.
- Alp, A. (1999). Zonguldak boksitinin termal özelliklerine tane boyutunun etkisi. *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **3**(2), 27-36.
- Alp, A., Yıldız K., Taşkın E., Cebeci A. (2008). *Diyasporitik boksitlerden alümina üretiminde mekanik aktivasyonun etkisinin araştırılması*. Proje no: 106M121, Tübitak, Ankara.
- Armstrong, J. A. (1999). *The investigation of scale formation in the Bayer process. Doctoral dissertation, Loughborough university, Britain.*
- Arslan, V.İ. (2008). *Biyoliç yöntemiyle endüstriyel hammaddelerden safsızlıkların uzaklaştırılmasının araştırılması*. Doktora tezi, şukurova Üniversitesi, Adana.
- Atabey, M. E. (1976). Mortaş boksit yatağının mineralojisi, kimyası ve kökeni. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, **19**, 9-14.
- Atak S. (1990). *Flotasyon ileri ve uygulaması*. İstanbul Teknik Üniversitesi vakfı, İstanbul, Türkiye, (1-97 s.).

- Ayhan, A., Karadağ, M.M. (1985). Şarkikaraağaç (Isparta) güneyinde bulunan boksitli demir ve demirli boksit yataklarının jeolojisi ve oluşumu. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, C. **28**, 137-146.
- Barani, K., Kalantari, M. (2017). Recovery of kaolinite from tailings of Zonouz kaolin-washing plant by flotation-flocculation method. *Journal of materials research and technology*, **7**(2), 142-148.
- Barbosa F.M., Bergerman M. G., Horta, D. G. (2016). Removal Of Iron-Bearing Minerals From Gibbsitic Bauxite By Direct Froth Flotation. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, **13**(1), 106-112.
- Birinci, M., Gök, R. (2018). Ön desilikasyon amaçlı boksit zenginleştirme işlemleri üzerine güncel bir değerlendirme. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, **57**(3), 197-218.
- Birinci, M., Gök, R., Gülaçan, H. (2018a). Possibility of silica removal from low grade metallurgical bauxite by size reduction and sieving. *Proceeding of International Congress on Engineering and Life Science (ICELIS 2018)*, 26-29 April 2018, Kastamonu/Turkey, 647-650.
- Birinci, M., Gök, R., Gülaçan, H. (2018b). Pre-beneficiation of high silica bauxite ore by attrition-scrubbing. *Proceeding of International Conference on Innovative Engineering Applications*, 20-22 September 2018, Sivas/Turkey, 565-569.
- Birinci, M., Gök, R., Özen, B. (2017). Metalurjik alümina üretiminde yüksek silis içerikli boksit cevherinden kaynaklı sorunlar ve silis uzaklaştırmaya yönelik önerilen bazı zenginleştirme yöntemleri. *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS 2017) Bildiriler Kitabı*, 11-13 Eylül 2017, Düzce, 344-351.
- Cablık, V. (2007). Characterization and applications of red mud from bauxite processing. *Gospodarka surowcami mineralnymi*, **23**(4), 27-38.
- Caner, G. (1971). Boksitin bileşimine giren kimyasal elementler ve bu elementlerin teşkil ettikleri mineraller. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, **10**(5), 13-20.
- Chaves, P., Bergerman, M., Abreu, C. A. V., Bigogno, N. (1999). Concentration of Bauxite Fines Via Gravity Concentration. *R. Escola de Minas*, **62**(3), 277-281.
- Çağatay, A., Arman, B. (1982). Boksit ve Türkiye'deki Boksit Yatakları. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, **6**(2), 23-33.
- Çilek, E.C. (2006). *Mineral flotasyon*. Süleyman Demirel Üniversitesi mühendislik-mimarlık fakültesi. Yayın no : 59, Isparta., Türkiye, 1 s.
- Deng, L., Wang, S., Zhong, H., Liu G. (2015). N-(6-(hydroxyamino)-6-oxohexyl) decanamide collector: Flotation performance and adsorption mechanism to diaspore. *Applied Surface Science*, **347**, 79-87.

- Dickson, R., saleem, M., Bhatti, M.A. (2017). The production of $\text{Al}(\text{OH})_3$ from indigenous high-silica bauxite. *Arab J Sci Eng* **42**: 1529–1535.
- DPT. (2001). *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Metal Madenler Alt Komisyonu, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Boksit Çalışma Grubu*. DPT: 2625-ÖİK: 636, Ankara.
- Ethem, M. Y. (1974) Reaktifler Üzerine Temel Bilgiler. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, **13**(4), 20-34.
- Gibson, B., Wonyen, D.G., Chelgani, S.C. (2017). A review of pretreatment of diasporic bauxite ores by flotation separation. *Minerals Engineering* **114**, 64–73.
- Groudeva, V.I., Groudev, S.N., 1983. Bauxite Dressing by Means of Bacillus Circulans. *Travaux (ICSOBA)*, **13** (18), 257-263.
- Günay, D. (2006). Alüminyum sektörü hakkında bir değerlendirme. Türkiye kalkınma bankası A.Ş. ekonomik ve sosyal araştırmalar müdürlüğü GA-06-07-08, Ankara.
- Habashi, F. (1999). *A textbook of hydrometallurgy*. Métallurgie Extractive Québec, Canada, 750 p.
- Hacıfazlıoğlu H. (2009). *İnce boyutlu kömürlerin flotasyonu için yeni bir flotasyon makinesinin (siklojet hücresinin) geliştirilmesi*. Doktora tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak.
- Hacıoğlu S. (2007). *Alümina üretiminde seydişehir boksitinin öğütme boyutunun ekstraksiyon verimine ve süresine etkisi*. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Hai-pu, L., Sha-sha, Z., Hao, J. Bin, L. (2010). Effect of modified starches on depression of diaspore. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **20**(8), 1494-1499.
- Hai-pu, L., Yue-hua, H., Dian-zuo, W., Jing, X. (2004). Effect of hydroxamic acid polymers on reverse flotation of bauxite. *Journal of Central South University of Technology*, **11**(3), 291-294.
- Hanilçi, N. (2013). Geological and geochemical evolution of the Bolkardağı bauxite deposits, Karaman, Turkey: Transformation from shale to bauxite. *Journal of Geochemical Exploration*, **133**, 118-137.
- Hanilçi, N., Alan, İ., Keskin, H., Şahin, Ş., Saçlı, L. (2006). Bolkardağı bölgesi (ayrancı-karaman) boksit yatakları: jeolojisi oluşumuna ait ilk bulgular. *Türkiye Jeoloji Sempozyumu Bildiri Özleri Kitabı*, **59**, 157-159.
- Huang, Z.Q., Zhong, H., Wang, S., Xia, L.Y., Liu, G.Y. (2013). Comparative studies on flotation of aluminosilicate minerals with Gemini cationic surfactants BDDA and EDDA. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **23**, 3055–3062.

- Ireland, M., Wang, X., Radomirovic, T., Smith, P., Jones, F. (2014). Investigating the impact of anatase on the dissolution of boehmite. *Hydrometallurgy*, **147-148**, 246-254.
- Jiang, H., Sun, Z., Xu, L., Hu, Y., Huang, K., Zhu, S. (2014). A comparison study of the flotation and adsorption behaviors of diaspore and kaolinite with quaternary ammonium collectors. *Minerals Engineering*, **65**, 124-129.
- Jiang, T., Pan, X. L., Wu, Yan. U., Yu, H. Y., Tu, G. F. (2018). Mineral transition of desilication products precipitated in synthetic sodium aluminate solution under atmospheric pressure. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **28**(2), 367-375.
- Kansun, G., Yalcin, M. G., Copuroglu, I. (2010). Bolkardagi bauxite deposits at Ayranci, Karaman, central Turkey. Part 2. *Mineralogical and petrographical studies*. **39**(1/2), 177.
- Karadağ, M. M., Küpeli, Ş., Arik, F., Ayhan, A., Zedef, V., Döyen, A. (2009). Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortaş bauxite deposit (Seydişehir/Konya–Southern Turkey). *Chemie der Erde-Geochemistry*, **69**(2), 143-159.
- Kaymaz, Y. (1990). *Cevher Hazırlama*, İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi sayı:1424, İstanbul, Türkiye, 113 s.
- Kılıç, Y. (2013). *Kalsine Kırmızı çamurun puzolanik aktivite ve betonun renklendirme, mineraloji ve fiziksel özelliklerine etkisinin incelenmesi*. Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Koç, Ş., Değer, M. A. (1992). Karstik Payas (Hatay) cevherleşmelerinin kaynağına yönelik jeokimyasal veriler. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, **114**, 95-110.
- Kumar, M., Senapati, B., Kumar, C. S. (2016). Beneficiation of high silica bauxite ores of India an innovative approach. In *Light Metals 2013* (pp. 187-190).
- Li, H., Zhang S., Jiang, H., Hu, Y., Wangb, D. (2010). Selective depression of diaspore with waxy maize starch. *Minerals Engineering*, **23**(15), 1192-1197.
- Liu, C., Feng, A., Guo, Z., (2016). Investigation and Optimization of Use of Anionic Collectors in Direct Flotation of Bauxite Ores. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, **52**(2), 932-942.
- Liu, J., Wang, X., Lin, C. L., Miller, J. D. (2015). Significance of particle aggregation in the reverse flotation of kaolinite from bauxite ore. *Minerals Engineering*, **78**, 58-65.
- Ma, X., Bruckard, W. J., Holmes, R. (2009). Effect of collector, pH and ionic strength on the cationic flotation of kaolinite. *International Journal of Mineral Processing*, **93**(1), 54-58.

- Marino, L.S.H (2012). *The flotation of marginal gibbsitic bauxite ores from paragominas*. Master of Science, The University of Utah Graduate School, Bursa.
- Martin, M. A., Forte, G., Ostap, S., See, J. (2001). The mineralogy of bauxite for producing smelter-grade alumina. *JOM* **53**(12), 36–40.
- Massola, C.P., Chaves, A.P., Lima, J.R.B., Andrade, C.F. (2009). Separation of Silica From Bauxite Via Froth Flotation. *Minerals Engineering*, **22**(4), 315-318.
- Onüçyıldız, M., Demiröz, A., büyükkaracığan, N., Saylam, İ. K. (2013). Seydişehir Kırmızı Çamur Atık Barajı İyileştirme Planı. *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, **1**(5), 23-41.
- Önal, G., Ateşok, G., Perek, T. (2014). *Cevher hazırlama el kitabı*. Yurt madencilik geliştirme vakfı. Türkiye, 222-223 s.
- Öncel, M. S., Söğüt, A. R. (2008). Kaletpe lateritik boksit zuhurunun mineralojik ve jeokimyasal incelemesi. *S.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi.*, c.23, 4 s.
- Öncel, S.M. (1995). Şarkıaağaç-Yalvaç (Isparta) arasının jeolojisi ve boksit zuhurlarının mineralojik, petrografik, jeokimyasal incelenmesi. Doktora tezi, Selçuk üniversitesi, Konya.
- Özen B. (2015). *Seydişehir boksit maden ocağının seçimli madencilik yöntemi ile üretilmesi prosese ve maliyete etkisi*. Yüksek lisans tezi, Selçuk üniversitesi, Konya.
- Öztürk H., Hanlıçi N. (1999). Doğankuzu ve Mortaş Boksit Yatağının Jeolojisi ve Sülfürlü Zonların Özellikleri, Orta Toroslar, Türkiye. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi* **121**, 185-197.
- Öztürk, H., Hein, J. R., Hanlıçi, N. (2002). Genesis of the Dogankuzu and Mortas Bauxite deposits, Taurides, Turkey: separation of Al, Fe, and Mn and implications for passive margin metallogeny. *Economic Geology*, **97**(5), 1063-1077.
- Papoutes, A., (1999). Beneficiation Plant For the Bauxite of Silver & Baryte Ores Mining Co. S. A., *Travaux de l'ICSOBA*, **30**, pp. 85-88.
- Popli, K., Sekhvat, M., Afacan, A., Dubljevic, S., Liu, Q., Prasad, V. (2015). Dynamic modeling and real-time monitoring of froth flotation. *Minerals*, **5**(3), 570-591.
- Rahimi, S., Irannajad, M., Mehdilo, A. (2017). Comparative studies of two cationic collectors in the flotation of pyrolusite and calcite. *International journal of mineral processing*, **167**, 103-112.
- Rao, M. B. S., Das, B., Mohapatra, B. K., Paul, A. K. (1996). Beneficiation of Titanium Minerals From Sand Rejects of an Alumina Refinery Plant by Gravity Separation. *Powder Handling and Pro*, **8**(4), 351-353.

- Rodrigues, O. M. S., Peres, A. E. C., Henriques, A. B., Amorim, B. G. (2016). Kaolinite removal from bauxite by flotation. *REM-International Engineering Journal*, **69**(3), 349-353.
- Saatçioğlu, H. A., AŞ, E. H. (2004). Kaybolmak üzere olan değerlerden diyaspor kristalleri. *Madencilik Bülteni (Turkey)*, **64**, 25-28.
- Sadler, L.Y., Venkataraman, C., 1991. A Process For Enhanced Removal of Iron From Bauxite Ores. *Int. Journal of Mineral Processing*, **31**(3-4), 233-246.
- Sheng-gui, Z., Hong, Z., Guang-yi, L. (2007). Effect of quaternary ammonium salts on flotation behavior of aluminosilicate minerals. *Journal of Central South University of Technology*, **14**(4), 500-503.
- Shrimali, K., Miller, J. D. (2016). Polysaccharide depressants for the reverse flotation of iron ore. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **69**(1), 83-95.
- Smith, P. (2009). The processing of high silica bauxites-Review of existing and potential processes. *ScienceDirect* **98**, 162–176.
- Stamboliadis, E.Th., Kailis, G. (2004). Removal of Limestone From Bauxite by Magnetic Separation. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*, **4**(2), 84-90.
- Şahin, S. (2011). Böhmitik boksitin yapısında bulunan alüminyum hidroksitin alkali çözeltilerindeki çözünürlüğü. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **5**(1), 987-992.
- T.C. Ekonomi Bakanlığı, (2015). Metaller ve Mineraller/Kıymetli Metaller EMTİA Raporu. Hammadde ve Temel Girdiler Analiz Dairesi.
- Uyanik, C., Kocak, K., Doyen, A. (2016). The bauxite deposits of seydisehir region (mortas and dogankuzu deposits); their geological, mineralogical and geochemical characteristics. *Acta Geobalcanica Volume 2*(1) pp. 21-26.
- Vassiliadou, V. (2014). Bauxite- Alumina-Aluminium. *Raw materials university day*. Megaron Athens International Conference Center, June 19, 2014, Greece.
- Vural, A. (1971). Bayer prosesi ile alümina üretiminde boksit komponentlerinin etkileri. *Türkiye madencilik bilimsel teknik 5. Kongresi 14-18/2/1977. Ankara DSI salonu*, Ankara.
- Whittington, B. I. (1996). The chemistry of CaO and Ca(OH)₂ relating to the Bayer process. *Hydrometallurgy*, **43**(1-3), 13-35.
- Whittington, B. I., Fletcher, B. L., Talbot, C. (1998). The effect of reaction conditions on the composition of desilication product (DSP) formed under simulated Bayer conditions. *Hydrometallurgy*, **49**, 1-22.

- Whittington, B., Fallows, T. (1997). Formation of lime-containing desilication product (DSP) in the Bayer process: factors influencing the laboratory modelling of DSP formation. *Hydrometallurgy* **45**(3), 289–303.
- Wipperf, J. (1964). Türkiye'nin alüminyum hammaddeleri. *Dergi Park Akademik*, Ankara, **62**(62), 80-86 s.
- World Aluminium (2017). <http://www.world-aluminium.org/statistics/alumina-production>. (Erişim tarihi 16 Mart, 2017).
- Xia, L. Y., Zhong, H., Liu, G. Y. (2010). Flotation techniques for separation of diaspore from bauxite using Gemini collector and starch depressant. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **20**(3), 495-501.
- Xia, L., Zhong H., Liu, G., Huang, Z., Chang, Q. (2009). Flotation separation of the aluminosilicates from diaspore by a Gemini cationic collector. *International Journal of Mineral Processing*, **92**(1-2), 74-83.
- Xu, L., Hu, Y., Dong, F., Gao, Z., Wu, H., Wang, Z. (2014). Anisotropic adsorption of oleate on diaspore and kaolinite crystals: Implications for their flotation separation. *Applied Surface Science*, **321**, 331-338.
- Xu, Z., Plitt, V., Liu, Q. (2004). Recent Advances in Reverse Flotation of Diasporic Ores-A Chinese Experience. *Minerals Engineering*, **17**, 1007- 1015.
- Yang, S., Huang, Y., Wang, Q., Deng, J., Liu, X., Wang, J. (2019). Mineralogical and geochemical features of karst bauxites from Poci (western Henan, China), implications for parental affinity and bauxitization. *Ore Geology Reviews*, **105**, 295-309.
- Yılmaz, K., Birol, B., Sarıdede, M.N., Yiğit, E. (2015). Pre-Beneficiation of Low Grade Diasporic Bauxite Ore By Reduction Roasting. World Academy of Science, Engineering and Technology, Int. Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, *Materials and Metallurgical Engineering*, **9**(9), 1075-1078.
- Yi-ping, L., Guo-fan, Z., Qi-ming, F., Le-min, O. (2002). A novel collector RL for flotation of bauxite. *Journal of Central South University of Technology*, **9**(1), 21-24.
- Yu, X. Y, Wang, H.L, Wang, Q.Q., Feng, B., Zhong, H. (2016). Flotation of low-grade bauxite using organosilicon cationic collector and starch depressant. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **26**, 1112–1117.
- Yuehua, H. T, Wei S., Hao, J., Miller, J. D., Fa, K. (2005). The anomalous behavior of kaolinite flotation with dodecyl amine collector as explained from crystal structure considerations. *Int. J. Miner. Process*, **76**, 163–172.
- Yuehua, H., Wei, S., Haipu, L., Xu, Z. (2004). Role of macromolecules in kaolinite flotation. *Minerals Engineering*, **17**, 1017–1022.

- Yu-hua, W., Chuan-bing, H., Yue-hua, H., Ye-min, H., Ye, L. (2008). Beneficiation of Diasporic-Bauxite Ore By Selective Flocculation With A Polyacrylate Flocculant. *Minerals Engineering*, **21**, 664-672.
- Yu-hua, W., Yue-hua, H., Xiao-wen, L. (2003). Flotation de-silicating from diasporic-bauxite with cetyl trimethylammonium bromide. *Journal of Central South University of Technology*, **10**(4), 324-328.
- Yu-ren, J., Yu-lan, X., Xue-feng, C., Zhong, X. (2001). Distribution behavior of collector in the desilication system of bauxite flotation. *Journal of Central South University of Technology*, **8**(2), 125-129.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ramazan GÖK
Doğum Yeri ve Tarihi : Şanlıurfa 01.01.1981
Adres : Samanlı mah. İsmet paşa cad. 190/C
Yeşilyurt/Malatya
E-Posta : ramazangok3434@gmail.com
Ön lisans : İnönü Üniversitesi Jeoteknik-Teknikerliği
Lisans : İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği
İş deneyimleri (2016-2017) Arapgir İnşaat Madencilik Beton Petrol Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş Arapgir/Malatya.
(2017-) Serdaroğulları İnşaat Taahhüt Nakliye Madencilik Sanayi Ticaret A.Ş Kemaliye/Erzincan.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

1. Birinci, M., **Gök, R.**, Özen, B. (2017). Metalurjik alümina üretiminde yüksek silis içerikli boksit cevherinden kaynaklı sorunlar ve silis uzaklaştırmaya yönelik önerilen bazı zenginleştirme yöntemleri. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS 2017) Bildiriler Kitabı, 11-13 Eylül 2017, Düzce, 344-351.
2. Birinci, M., **Gök, R.** (2018). Ön desilikasyon amaçlı boksit zenginleştirme işlemleri üzerine güncel bir değerlendirme. Madencilik, 57(3), 197-218.
3. Birinci, M., **Gök, R.**, Gülaçan, H. (2018a). Possibility of silica removal from low grade metallurgical bauxite by size reduction and sieving. Proceeding of International Congress on Engineering and Life Science (ICELIS 2018), 26-29 April 2018, Kastamonu/Turkey, 647-650.
4. Birinci, M., **Gök, R.**, Gülaçan, H. (2018b). Pre-beneficiation of high silica bauxite ore by attrition-scrubbing. Proceeding of International Conference on Innovative Engineering Applications, 20-22 September 2018, Sivas/Turkey, 565-569.