

**EMET ESPEY BOR TESİSİ İNCE GÖLET  
ATIKLARININ KOLON FLOTASYONU İLE  
ZENGİNLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN**

**ARAŞTIRILMASI**

Osman Öner TAŞ

Yüksek Lisans Tezi

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Subat - 2010

**EMET ESPEY BOR TESİSİ İNCE GÖLET ATIKLARININ KOLON FLOTASYONU  
İLE ZENGİNLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Osman Öner TAŞ

Dumlupınar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Maden Mühendisliği Anabilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ali UÇAR

Şubat - 2010

## KABUL ve ONAY SAYFASI

Osman Öner TAŞ'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "EMET ESPEY BOR TESİSİ İNCE GÖLET ATIKLARININ KOLON FLOTASYONU İLE ZENGİNLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

12/02/2010

- Üye : Prof. Dr. Bahri ÖTEYAKA  
Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali UÇAR  
Üye : Yrd. Doç. Dr. Bülent YILMAZ

Fen Bilimleri Enstitüsün Yönetim Kurulu'nun ...../...../..... gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Atalay KÜÇÜKBURSA  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## EMET ESPEY BOR TESİSİ İNCE GÖLET ATIKLARININ KOLON FLOTASYONU İLE ZENGİNLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Osman Öner TAŞ

Maden Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 2010

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ali UÇAR

### ÖZET

Eti Bor A.Ş. Emet Bor İşletmesi Espey konsantratör tesisi ince bor artıkları (-3 mm) artık barajında depolanmaktadır. Her geçen gün dolmakta olan baraj, çevre görüntüsü ve kirliliği açısından sorun olmakta, ayrıca işletme giderlerine olumsuz etki yaratmaktadır. Barajdaki artığın  $B_2O_3$  içeriği oldukça yüksek olup, yaklaşık %26,33'tür. Bu kaybın yeniden ekonomiye kazandırılması için uygun zenginleştirme yönteminin veya yöntemlerinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bu artıkların kazanılması ile yukarıda belirtilen olumsuz etkileri de en aza inecektir. Bu çalışmada; Artık barajında bulunan bor minerallerini kazanabilmek amacıyla kolon flotasyon yöntemi deneysel olarak araştırılmıştır.

Çalışmada ilk önce yapılan mekanik + kimyasal dağıtma + sınıflandırma çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre +150  $\mu m$  boyut grubunda %42,2  $B_2O_3$  tenörlü konsantre %68,68 verim ile elde edilmiştir. Bu boyut grubunun altında ise istenilen verim ve tenör değerlerine ulaşılamadığından dolayı ikinci aşamada, -150  $\mu m$  boyut altı grubuna ince tanelerin flotasyonunda uygulama alanı olan klasik flotasyon kolonu kullanılmıştır. Deneylerde 38  $\mu m$  boyutunun altı şlamın olumsuz etkisi nedeniyle uzaklaştırılmıştır. Uygun flotasyon koşullarını belirleyebilmek amacıyla; toplayıcı ve köpürtücü dozajı, yüzeysel artık hızı, yüzeysel hava hızı, yüzeysel yıkama suyu hızı, yüzeysel besleme hızı, bias faktörü, katı oranı ve şlam etkisi gibi faktörlerin verim ve tenöre etkileri araştırılmıştır. Belirlenen uygun flotasyon şartları sonucunda flotasyona beslemeye göre %99,86 verimle %45,9  $B_2O_3$  tenörlü konsantre elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bor, Bor flotasyonu, Flotasyon, Kolemanit, Kolemanit Flotasyonu, Kolon Flotasyonu

## **RESEARCH ABOUT ENRICHMENT OF FINE TAILINGS WITH FLOTATION COLUMN IN EMET ESPEY BORON PLANT**

Osman Öner TAŞ

Master of Science Thesis, 2010

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ali Uçar

### **SUMMARY**

Fine boron tailings (-3mm) has been stored in waste pool in the Eti Bor A.Ş. Emet Bor Espey Concentrator. This waste pool , being filled day by day, creates problems consisted with environmental view and pollution and they also have a negative impact on operational costs. In this waste pool, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content has a high percentage like 26,33 %. For the aim of minimizing this loss and gain it from the econmical aspects, an appropriate enrichment method is needed to be determined. Consequently, these negative impacts will be reduced by gaining this tailings. In this study, for solving boron enrichment problem in waste pools, two gradual enrichment methods have been designed and experimentally studied.

According to results of the study which involves mechanical admixture, chemical dispensation, classifacation in the fraction of +150 µm, a concentration with the grade of 42,2 % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> has been achieved with 68,68 % efficiency. Column flotation experiments have been applied to -150µm size because of the failure in the expreriments under these fractions and there could not get any appropriate economical enrichment value in the concentration grades. Consequently, in the second stage, flotation method has been applied to -150µm size fraction and in flotation experiments, Flotation Column, which has high performance on fine boron residues, has been used. In the experiments, fractions of -38 µm size are removed because of the negative effects of the shudge. For finding appropriate flotation conditions, collector and frothing material dosage, superficial tailing rate, superficial air rate, superficial wash water rate, bias factor, solid ratio and shudge effect factors' effects on efficiency and grade have been searched. In appropriate flotation conditions, the concentration with the grade of 45,9 % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> has been procured with of efficiency of 99,86 % .

**Keywords:** Boron, Boron Flotation, Colemanite, Flotation Colemanite, Flotation Column

## TEŞEKKÜR

Öncelikle, yoğun uğraşlar sonucunda ortaya çıkan bu tez çalışması boyunca maddi ve manevi her türlü desteği benden esirgemeyen, üstün bilgi ve birikimiyle yol göstererek, çalışmanın başarıyla sonuçlanmasını sağlayan değerli tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Ali UÇAR'a, şükranlarımı sunarım.

Deneyisel çalışmalarım boyunca bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan sayın hocalarım Prof. Dr. Bahri ÖTEYAKA, Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÇINAR, Yrd. Doç. Dr. Cengiz KARAGÜZEL, Arş. Gör. Oktay ŞAHBAZ ve Arş. Gör. Uğur DEMİR'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Deneyisel çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen Serdar SUALP, Alper ÖCAL ve Ümit HORASAN'a teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Kolemanit atık numunelerinin analizini öğrenmeme yardımcı olan Balıkesir Üniversitesi Sındırgı Meslek Yüksek Okulu Öğr. Gör. Nebahattin UÇAR'a teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Son olarak, bu günlere gelmemi sağlayan, en kötü günlerimde dahi benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, hayatımın her aşamasında yanımda olan sevgili annem Zeynep TAŞ'a, babam Cihat TAŞ'a, ağabey'im Cahit Özer TAŞ'a, eniştem Sami Yalçın'a ve teyzem Ayşe Yalçın'a minnettarım...

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
1.GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER .....	3
2.1. Borun Tanımı .....	3
2.2. Türkiye Yatakları Açısından Önemli Bor Mineralleri ve Kullanım Alanları .....	4
2.2.1. Boraks (Tinkal) ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) .....	4
2.2.2. Kernit (Razorit) ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) .....	5
2.2.3. Üleksit ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) .....	5
2.2.4. Probertit ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) .....	5
2.2.5. Kolemanit ( $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) .....	5
2.2.6. Pandermit ( $\text{Ca}_4\text{B}_{10}\text{O}_{19} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) .....	5
2.2.7. Hidroborasit ( $\text{CaMgB}_6\text{O}_{11} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) .....	6
2.3. Borun Kullanım Alanları .....	6
2.4. Türkiye ve Dünya'daki Durumu .....	9
2.5. Türkiye Bor Yatakları ve Zenginleştirme Tesisleri .....	11
2.5.1. Kırka borat yatakları ve zenginleştirme tesisleri .....	11
2.5.2. Emet borat yatakları ve zenginleştirme tesisleri .....	13
2.5.3. Bigadiç borat yatakları ve zenginleştirme tesisleri .....	16
2.5.4. Kestelek kolemanit yatakları ve zenginleştirme tesisleri .....	17
3. BOR ARTIKLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ .....	19
3.1. Bor Atıklarının Uygun Bir Şekilde Değerlendirilmesinden Elde Edilecek Avantajlar .....	19
3.2. Bor Atıklarının Değerlendirme Yöntemleri .....	19
3.3. Atıklardan Borun Tekrar Kazanılması .....	19
3.4. Atıkların Uygun Sektörde Kullanılması .....	20
3.5. Atıkların Uygun Bir Şekilde Depolanması .....	20

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. BOR CEVHERLERİNİN ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ .....	21
4.1. Mekanik Aşındırma (Yıkama) ve Boyuta Göre Sınıflandırma ile Zenginleştirme ....	22
4.2. Gravite Yöntemi ile Zenginleştirme .....	26
4.3. Manyetik Zenginleştirme .....	28
4.4. Isıl İşlem ile Zenginleştirme .....	28
4.5. Elektrostatik Ayırma ile Zenginleştirme .....	30
4.6. Ses Ötesi Dalgalar ile Zenginleştirme .....	30
4.7. Flotasyon Yöntemi İle Zenginleştirme .....	31
5. KOLON FLOTASYONU .....	41
5.1 Flotasyon Kolonunu Oluşturan Zonların Tanıtımı .....	44
5.1.1 Zenginleştirme zonu .....	44
5.1.2. Köpük (Yıkama) zonu .....	48
5.2. Flotasyon Kolonu Tasarımı .....	48
5.3. Flotasyon Kolonunun Avantajları .....	49
5.4. Flotasyon Kolonunun Dezavantajları .....	49
5.5. Kolon Flotasyonunda Zenginleştirmeye ve Performansı Etkileyen Parametreler.....	49
5.5.1. Hold-up (Hacimsel hava miktarı- $\epsilon$ g).....	50
5.5.2. Akış hızları.....	51
5.5.3. Taşıma kapasitesi (Ca).....	51
5.5.4. Sabit Tasarım Parametreleri.....	52
5.5.5. Sistemin içinde değerleri bağımsız olarak değiştirilemeyen diğer parametreler.	54
5.5.6. İşletme Parametreleri .....	55
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI.....	59
6.1. Malzeme ve Yöntem .....	59
6.2. Kolon Flotasyonu Deneyleri .....	65
6.2.1. Köpürtücü miktarının belirlenmesi.....	66
6.2.2. Toplayıcı miktarının belirlenmesi .....	68
6.2.3. Bastırıcı miktarının belirlenmesi .....	70
6.2.4. Bias faktörü .....	71
6.2.5. Yüzeysel hava hızı.....	72
6.2.6. Katı oranı .....	75
6.2.7. Yıkama suyu hızı.....	76



## İÇİNDEKİLER (devam)

	<b><u>Sayfa</u></b>
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	82
EKLER.....	87
1. B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Analizi .....	90
2. Deney Sonuçlarının Tabloları.....	91
3. Flotasyon Deney Şekilleri .....	98

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Dünya bor tüketiminin sektörel dağılımı .....	6
2.2. Kırka bor zenginleştirme tesisi akım şeması .....	12
2.3. Emet Espey bor zenginleştirme tesisi akım şeması .....	14
2.4. Hisarcık bor zenginleştirme tesisi akım şeması .....	15
2.5 Bigadiç bor zenginleştirme tesisi akım şeması .....	17
2.6. Kestelek bor zenginleştirme tesisi akım şeması.....	18
4.1. Doygun çözeltilerde gri kilin reaktif konsantrasyonuna göre verim değişimi .....	33
4.2. Gri kil ilavesinin boraksın yüzülebilirliğine etkisi .....	33
4.3. Kolemanit ve realgerin değişik pH'larda zeta potansiyeli .....	34
4.4. Kolemanit, üleksit inderit ve tünelitin değişik pH'larda zeta potansiyeli.....	34
4.5. Kolemanit ve kilin değişik pH'larda zeta potansiyeli .....	35
4.6. Kilin değişik oranlarda kolemanite eklenmesi ile ortam pH'larında zeta potansiyeli.....	35
4.7. Ca <sup>2+</sup> iyon konsantrasyonunun flotasyon verimine etkisi.....	36
4.8. Eklenen kil miktarına göre flotasyon verimi .....	36
4.9. Reaktiflerin kolemanitin zeta potansiyelinde etkisi .....	37
4.10. Reaktiflerin kilin zeta potansiyelinde etkisi.....	38
5.1. Flotasyon kolonu .....	43
5.2. Hava hızı ile kolondaki hacimsel hava miktarı arasındaki ilişki.....	50
5.3. İkili faz sisteminde hava tutunumunun, farklı yüzeyel hava miktarında köpürtücü miktarına bağlı değişimi.....	56
6.1. -0,150+0,038 mm boyutlu flotasyona giriş numunesinin XRD sonuçları.....	59
6.2. -0,038 mm boyutlu (şlam) numunenin XRD sonuçları .....	60
6.3. Numunenin mekanik+kimyasal dağıtma+yaş elek analizine göre tane boyutuna bağlı kümülatif B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ve elek altı değişimi.....	61
6.4. Mekanik+kimyasal dağıtmadan sonra -0,150 mm'lik elek beslemesine göre numunenin tane boyutuna bağlı kümülatif B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ve elek altı değişimi.....	61
6.5. Deneylerde kullanılan kolon flotasyonu .....	63
6.6. Deneysel akım şeması .....	64
6.7. Köpürtücüye bağlı olarak tenör-verim değişimi .....	67
6.8. Köpürtücü miktarına bağlı olarak hold-up ve hava kabarcığı değişimi.....	68

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
6.9. Köpürtücü miktarına bağlı olarak hold-up ve köpük kalınlığı değişimi.....	68
6.10. Toplayıcıya bağlı olarak tenör-verim değişimi .....	69
6.11. Bastırıcıya bağlı olarak tenör-verim değişimi.....	71
6.12. Bias faktörüne bağlı olarak tenör-verim değişimi .....	72
6.13. Hava hızına bağlı olarak tenör-verim değişimi.....	73
6.14. Hava hızına bağlı köpük kalınlığı ve hold-up değişimi.....	74
6.15. Hava hızına bağlı kabarcık çapı ve hold-up değişimi.....	75
6.16. Katı oranına bağlı olarak tenör-verim değişimi .....	76
6.17. Yüzeysel yıkama suyu hızına bağlı olarak tenör-verim değişimi .....	77
7.1. Madde balansı .....	80
7.2. Optimum flotasyon şartlarında kolon flotasyonu konsantresinin XRD sonuçları.....	81
7.3. Optimum flotasyon şartlarında kolon flotasyonu artığının XRD sonuçları.....	81
<b><u>Ek Şekil</u></b>	
1. DPÜ fotasyon kolonu .....	98
2. Flotasyon kolonunda kolemaniti zenginleştirme deneyleri .....	99
3. Flotasyon kolonunda kolemaniti zenginleştirme deneyleri	100
4. Flotasyon kolonunda kolemaniti zenginleştirme deneyleri .....	101
5. Flotasyon beslemesi, konsantre, artık .....	102

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b><u>Çizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1. Bor elementinin fiziksel özellikler .....	3
2.2. Bor ürünlerinin kullanım alanları .....	7
2.3. Borun kullanım alanları .....	8
2.4. Türkiye'deki rezerv miktarları .....	10
2.5. Dünya bor rezervleri.....	10
4.1. Mekanik aşındırma (Yıkama) ve boyuta göre sınıflandırma ile yapılan zenginleştirme çalışmaları .....	24
4.2. Mekanik aşındırma (Yıkama) ve boyuta göre sınıflandırma ile yapılan zenginleştirme çalışmaları .....	25
4.3 Gravite yöntemi ile yapılan zenginleştirme çalışmaları .....	27
4.4. Isıl işlem ile yapılan zenginleştirme çalışmaları .....	29
4.5. Kolemanit atıklarında yapılan flotasyon çalışmaları.....	39
4.6. Bor minerallerinde yapılan flotasyon çalışmaları .....	40
5.1. Flotasyon kolonları ile mekanik flotasyon hücreleri arasındaki farklılıklar .....	42
6.1. Numunenin kimyasal analizi .....	60
<b><u>Ek Çizelge</u></b>	
1. Numunenin mekanik+kimyasal dağıtma+yaş elemeye göre elek analizi.....	90
2. Numunenin elek analizi.....	91
3. Mekanik+kimyasal dağıtmadan sonra -0,150 mm'lik elek beslemesine göre numunenin tane boyutuna bağlı kümülatif B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ve elek altı değişimi.....	91
4. Köpürtücüye bağlı olarak tenör-verim değişimi .....	92
5. Köpürtücü miktarına bağlı olarak hold-up, kabarcık çapı ve köpük kalınlığı .....	92
6. Toplayıcıya bağlı olarak tenör-verim değişimi .....	93
7. Bastırıcıya bağlı olarak tenör-verim değişimi.....	94
8. Bias faktörüne bağlı olarak tenör-verim değişimi.....	95
9. Hava hızına bağlı olarak tenör-verim değişimi.....	96
10. Hava hızı artışına göre köpük kalınlığı, hold-up ve kabarcık çapı değişimi.....	96
11. Katı oranına bağlı olarak tenör-verim değişimi .....	97
12. Yıkama suyu hızına bağlı tenör verim değişimi .....	97

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ****Simgeler**

Å

°C

 $\lambda$ **Açıklama** $10^{-8}$ m

Santigrad derece

Lambda, XRD dalga boyu

**Kısaltmalar**

DAH

SDS

Armac-T

R801

R825

KAX

KEX

AP825

AF70

AP801

MIBC

DPÜ

XRD

SEM

**Açıklama**

Dodesil amonyum hidrokloritir

Sodyum dodesil sülfat

Tallow amin asetat

Sülfanat tipi cyanamid (ticari marka)

Sülfanat tipi cyanamid (ticari marka)

Potassium amyl xanthate (ticari marka)

Potassium ethyl xanthate (ticari marka)

Aero Prometer (ticari marka)

Aerofrother Cytec (ticari marka)

Petrolyum sülfonat (ticari marka)

Methyl iso butyl carbinol

Dumlupınar Üniversitesi

X-Işım Difraksiyonu

Taramalı Elektron Mikroskop

## 1.GİRİŞ

Bor mineralleri, yapılarında farklı oranlarda bor oksit ( $B_2O_3$ ) içeren doğal bileşiklerdir [1,4]. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor mineralinden ticari değere sahip olanları özellikle; tinkal, kolemanit, üleksit, probertit, borasit, pandemit, szyabelit, hidroborasit ve kernit'tir. Dünyadaki önemli bor yataklarının Türkiye'den sonra Rusya ve ABD'de olduğu bilinmektedir. Türkiye'de bilinen bor yatakları özellikle Kırka/Eskişehir, Bigadiç/Balıkesir, Kestelek/Bursa ve Emet/Kütahya'da bulunmaktadır [1,2,3,12,53]. Ülkemizde bor madenleri, 2172 Sayılı Kanunla Devlet eliyle işletilecek madenler kapsamına alınmış olup 2840 Sayılı Kanun ve 3213 sayılı Maden Kanununa ek ve değişiklik getiren 5177 sayılı Kanunun 49. maddesine istinaden Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından işletilmekte, üretilmekte ve pazarlanmaktadır [53].

Bor konsantratör tesislerinden çıkan kil içerikli atıklar önemli bir potansiyel kaynak oluşturmaktadır. Şimdiye kadar bor atıkları ile yapılan çalışmalar üç ana grupta toplanabilir. Bunlardan birincisi atıklardaki borun tekrar kazanılması, ikincisi atıkların çevreye zarar vermeden depolanması, üçüncüsü ise atıkların çeşitli sektörlerde kullanılmasıdır [5]. Bunların değerlendirilmesi doğal kaynakların maksimum düzeyde kullanılması, hem stoklanması hem de çevre açısından zemin arz etmektedir. Bor atıklarının geri kazanılması ile atık durumunda bulunan bu potansiyel kaynaklar ülke ekonomisine kazandırılmış olacak ve çevre kirliliği önlenmiş olacaktır [5,6,7].

Çalışmanın yapıldığı Emet bölgesi kolemanit yataklarının  $B_2O_3$  bazlı rezervi 225 milyon tondur. Espey konsantratörü cevher işleme kapasitesi 300.000 ton/yıl ve konsantre kolemanit elde etme kapasitesi ise 120.000 ton/yıl'dır. 150.000 ton atık her yıl Espey atık havuzunda birirmektedir [7]. Kolemanit, kırılğan bir yapıya sahip olduğu için, konsantratörde ufalama devresinde ve aşındırılmalı yıkayıcılarda oluşan ince kolemanit taneleri (-3 mm) gang mineralleri ile atık havuzunda toplanmaktadır. Atık barajının ortalama  $B_2O_3$  içeriği %26,33 olarak tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, kırma-yıkama-sınıflandırma yöntemi ile zenginleştirilen Emet Espey bor tesisi ince artık olarak isimlendirilen ve yüksek değerde  $B_2O_3$  içeren artıkları kazanmak ve çevresel problemleri ortadan kaldırıp ekonomiye kazanç sağlamaktır. Böylece artık barajına daha az miktarda malzeme gideceği için ilave artık barajı yapımına gerek

kalmayacaktır ya da daha az bor içerecek olan artığın çeşitli sektörlerde kullanım olanakları ortaya çıkarsa sorun kökten çözülmüş olacaktır.

Çalışmalarda ince artık (-3 mm) numunesine mekanik+kimyasal dağıtma işlemi uygulanmış olup -150 µm +38 µm boyut grubuna getirilmek üzere sulu eleme işlemi uygulanmıştır. Zenginleştirilmesi sorunlu olan ince tanelerin zenginleştirilmesinde kullanılan ve ülkemizde sadece Çayeli Bakır İşletmeleri A.Ş.'de endüstriyel boyutta uygulaması bulunan klasik flotasyon kolonu ile ince taneler laboratuvar çapta zenginleştirmeye çalışılmıştır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Borun Tanımı

Simgesi (B) olan Bor'un atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81; ergime noktası  $2190\pm 20$  °C ve kaynama noktası 3360 °C olan, metalle ametal arası yarı iletken özelliklere sahip, özgül ağırlığı  $2,30-2,46 \text{ g/cm}^3$  olan, kütle numaraları 10 ve 11 olan iki kararlı izotopundan oluşan, periyodik sistemin üçüncü grubunun başında yer alan bir elementtir [2,8,9,10,11,13,53].

**Çizelge 2.1.** Bor elementinin fiziksel özellikleri [2,8,9,10,11,13,53]

Özellik	Değeri
Atom ağırlığı	10,811±0,003
Ergime noktası	2190±20 °C
Kaynama noktası	3660 °C
Isıl genişleme katsayısı (25-1050 °C arası, 1 °C için)	$5 \times 10^{-7} \times 10^6$
Knoop sertliği	2100-2580 HK
Mohs sertliği (elmas : 15)	11
Vickers sertliği	5000 HV

HK: Knoop sertliği değeri

Bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Toprağın bor içeriği genelde ortalama 10-20 ppm, deniz suyunda 0,5-9,6 ppm, tatlı sularda ise 0,001-1,5 ppm aralığındadır [2,11,12,53]. Bor elementinin amorf bir toz halindeki rengi koyu kahverengi ve çok gevrek, sert yapıli monoklinik kristal halinin rengi ise sarımsı kahverengidir [10]. Bor suda çözülen, renksiz ve billursuz bir maden olan, ısı etkisiyle önce ısı kaybetmekte, sonra emme özelliğine sahip bir elementtir [11,53].

Bor, biri amorf ve altısı kristalin polimorf olmak üzere, çeşitli allotropik formlarda bulunur [2,13]. Bor elementinin kimyasal özellikleri morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron ebadındaki amorf bor kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken, kristalin bor kolay reaksiyona girmez. Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve diğere ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş yavaş veya patlama şeklinde olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur [2,13,53].

Kimyasal olarak ametal bir element olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve HCl/HF asitler ile soy davranış göstermektedir. Öte yandan yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile



reaksiyona girerek, boroksit ( $B_2O_3$ ), aynı koşullarda nitrojen ile bornitrit (BN), bazı metaller ile magnezyum borit ( $Mg_3B_2$ ) ve titanyum diborit ( $TiB_2$ ) gibi endüstride kullanılan bileşikler oluşturabilmektedir.

Bor, doğada serbest olarak bulunmaz. Bor elementi, değişik oranlarda boroksit ( $B_2O_3$ ) ile 150'den fazla mineralin yapısı içinde yer almasına rağmen; ekonomik anlamda bor mineralleri kalsiyum, sodyum ve magnezyum elementleri ile hidrat bileşikleri halinde bulunur [8,9,13]. Yapılarında bulunan Ca, Na ve Mg elementlerine göre sınıflandırılırlar. Na kökenli olanlara tinkal, Ca kökenli olanlara kolemanit ve Na-Ca kökenli olanlara üleksit denir [12,13]. Bor kristal iken siyah renkli, gevrek, sert ve katı haldedir. Amorf durumda ise toz halde, siyah ve kahverengidir. Bor atomlarının yer kabuğunda çok fazla bulunmamasının yararı özellikle canlı hayatı için çok önemli elementler olan karbon, azot ve oksijenin bolluk oranlarından daha az olması çok faydalı olmaktadır. Şöyle ki nükleon başına bağlama enerjisi düşük olan atomlar hidrojen ve helyumla daha kolay birleşme reaksiyonlarına girerler. Bor atom çekirdekleri yıldız kütleleri içinde bu tür reaksiyonlarla C, N ve oksijenin sentezlerine yol açarlar [11].

Bor madenlerinin değeri genellikle içindeki  $B_2O_3$  oranına göre ölçülmektedir.  $B_2O_3$  oranı yüksek olan bor madenleri daha değerli olarak kabul edilmektedir [4].

## 2.2. Türkiye Yatakları Açısından Önemli Bor Mineralleri ve Kullanım Alanları

Türkiye'de rezerv açısından en çok bulunan bor cevherleri tinkal ve kolemanit'tir. Türkiye'de önemli tinkal yatakları Kırka'da, kolemanit yatakları ise Emet ve Bigadiç civarında bulunmaktadır. Bunlara ilaveten, Bigadiç'te az miktarda üleksit rezervi mevcut olup Kestelekte zaman zaman üleksit yan ürün olarak elde edilmektedir [1,12].

### 2.2.1. Boraks (Tinkal) ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ )

Tabiatta genellikle renksiz ve saydam olarak bulunur. Ancak içindeki bazı maddeler nedeniyle pembe, sarımsı, gri renklerde de bulunabilir. Sertliği 2-2,5; özgül ağırlığı  $1,7 \text{ gr/cm}^3$   $B_2O_3$  içeriği %36,6'dır. Tinkal suyunu kaybederek kolaylıkla tinkalkonite dönüşebilir. Kille ara katkılı tinkalkonit ve üleksit ile birlikte bulunur. Ülkemizde Eskişehir-Kırka yataklarından üretilmektedir [2,14,16,53]. Monoklinaldır ve kristal yapısı kısa prizma şeklindedir. Dilinimi nadiren iyi, gevrek ve konkodial kırılarak ezilir. Yeni kesilmiş saf boraks temizdir ve cam gibidir. Fakat birçok numuneler tebeşir beyazıdır [15].

### 2.2.2. Kernit (Razorit) ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )

Tabiatta renksiz, saydam uzunlamasına iğne şeklinde küme kristaller şeklinde bulunur. Sertliği 3, özgül ağırlığı  $1,95 \text{ gr/cm}^3$  ve  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriği %51'dir. Soğuk suda az çözünür. Atmosferik koşullarda tinkalkonite dönüşür. Kırka'da Na-borat kütesinin alt seviyelerinde yer alır. Dünyada ise Arjantin ve ABD'de bulunur [2,14,16,53]. Monoklinaldır, fakat kristal şekli genellikle yarılma ile kapanır. Yarılma iki yönde mükemmeldir. Diğer yönlerde bu kadar mükemmel değildir ve mineral dağınmık, kıymık lifler halinde kolayca ezilir [15].

### 2.2.3. Üleksit ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ )

Doğada, yüzey veya yüzeye yakın bataklık kesimlerde masif, karnabahar, lifsi ve sütun şeklinde bulunur. Saf olanı beyaz olup gri renk tonlarında da bulunabilir, ipek parlaklığında olanları da vardır. Genellikle, kolemanit, hidroboraksit ve probertit ile birlikte; sert, yoğun ve iyi tabakalaşmış halde görülmektedir.  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriği %43'tür [2,14,16,53]. Tek tek büyük kristallerden ziyade ipek gibi lif demetleri teşkil ederler. Beyaza çalan şeffaf bir mineral olup, görünüşüne de uygun olarak "pamuk gülü" diye adlandırılmaktadır. Üleksit soğuk suda az, sıcak suda daha fazla, asit içinde kolayca erir [15].

### 2.2.4. Probertit ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )

Kirli beyaz, açık sarımsı renklerde olup ışınal ve lifsi şekilli kristaller şeklinde bulunur. Kristal boyutları 5 mm ile 5 cm arasında değişir.  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriği %49,6'dır. Kestelek yataklarında üleksitin yanında ikincil mineral olarak gözlenir. Ancak Emet'te uniform tabakalı birincil olarak, Doğanlar-İğdeköy bölgesinde kalın tabakalı olarak bulunur [2,14,16,53].

### 2.2.5. Kolemanit ( $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )

Monoklinik sistemde kristalleşir, sertliği 4-4,5 özgül ağırlığı 2,42'dir.  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriği %50,8'dir. Suda yavaş, HCl'de hızlı çözünür. Bor bileşiklerinde en yaygın olanıdır. Killer içinde cevher boşluklarında iri, parlak, saydam kristaller halinde bulunur [2,14,15,16,53]. Beyaz-gri ve yeşilimsi-gri gibi tipik renkleri vardır. Su içinde çok ağır erir fakat asitte çok kolayca eriyebilir. Isıtıldığı zaman kolemanit çatırdayarak pudra halinde kavrulur [15].

### 2.2.6. Pandermit ( $\text{Ca}_4\text{B}_{10}\text{O}_{19} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )

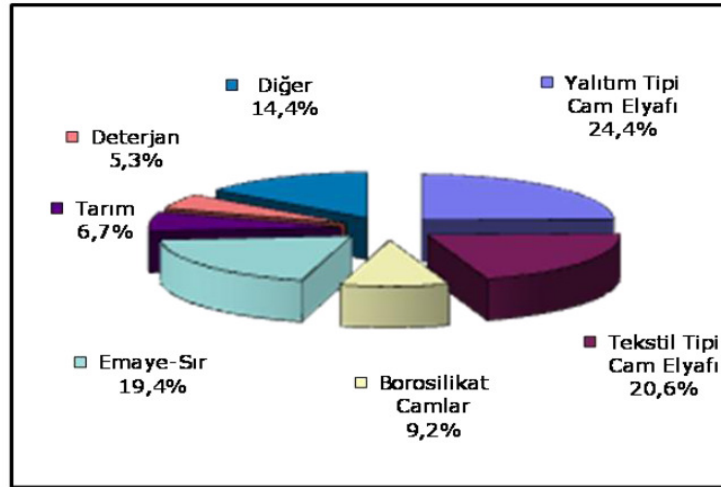
Beyaz renkte ve yekpare olarak gözükmemektedir. Sultançayırı ve Bigadiç yataklarında gözlenmektedir. Kolemanit ve kalsite dönüşmektedir.  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriği %49,8'dir [2,14,16,53].

### 2.2.7. Hidroborasit ( $\text{CaMgB}_6\text{O}_{11}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )

Bir merkezden ışımsal ve iğne şeklindeki kristallerin rastgele yönlendirilmiş ve birbirini kesen kümeleri halinde bulunur. Lifsi bir dokuya sahiptir.  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriği %50,5'dir. Beyaz renkte, bazen içerisindeki safsızlıklara bağlı olarak sarı veya kırmızımsı renklerde (arsenik içeriğine göre) ve kolemanit, üleksit, probertit, tünelit ile birlikte bulunur. Türkiye'de en çok Emet-Doğanlar-İğdeköy sahasında ve Kestelek'te rastlanır [2,14,16,53].

### 2.3. Borun Kullanım Alanları

Bor ürünleri; uzay ve hava araçları, nükleer uygulamalar, askeri araçlar, yakıtlar, elektronik ve iletişim sektörü, tarım, cam sanayi, kimya ve deterjan sektörü, seramik ve polimerik malzemeler, nanoteknolojiler, otomotiv ve enerji sektörü, metalurji ve inşaat gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Ancak tüketilen bor ürünlerinin %85'e yakını cam, seramik-frit, tarım ve deterjan sektörlerinde yoğunlaşmıştır [1,2,8,9,14,17,53].



Şekil 2.1. Dünya bor tüketiminin sektörel dağılımı [11]

**Çizelge 2.2.** Bor ürünlerinin kullanım alanları [1,2,8,9,14,17,53]

<b>ÜRÜN</b>	<b>KULLANIM ALANLARI</b>
<b>Amorf ve Kristal Bor</b>	Askeri Piroteknik, Nükleer Silahlar ve Nükleer Güç Reaktörlerinde Muhafaza, Metallerde Alaşım Elemanı ve Deoksidan, Bakır ve Alaşımalarında Gaz Giderici, Alüminyum Dökümlerinde Tane Rafinasyonu, Yarı İletkenlerde vb.
<b>Bor Esterleri</b>	Polimerizasyon Reaksiyonları için Katalist, Polimer Stabilizatörleri, Yangın Geciktiricileri
<b>Bor Flamentleri</b>	Havacılık ve Spor malzemeleri için Kompozitler
<b>Bor Halidleri</b>	İlaç Sanayii, Katalistler, Elektronik Parçalar, Bor Flamentleri ve Fiber Optikler
<b>Bor Karbid</b>	Kesme Ekipman Bileycileri, Endüstriyel Yataklar, Çok Yüksek Sıcaklıklarda Korozyon ve Oksitlenme Direnci Gerektiren ekipmanlar.
<b>Bor Karbür</b>	Askeri Araçlarda Zırh Plakaları, Uzay Mekiklerinde Dış Yüzey Koruyucu, Aşındırıcılar, Tesviye Aksamları, Yüzey Parlaticılar, Yüksek Aşınma Direnci ve Esnemezlik Gerektiren Diğer Alanlar.
<b>Borazon</b>	Yüksek Hızlı Kesiciler
<b>Borik Asit</b>	Antiseptikler, Göz Damlaları, Bor Alaşımaları, Nükleer, Yangın Geciktirici, Naylon, Fotoğrafçılık, Tekstil, Dericilik, Gübre, Nikel Kaplama, kimyasal Katalist, Cam, Cam Elyafı, Emaye, Sır, vb.
<b>Fluoborik Asit</b>	Kaplama Solüsyonları, Fluoborat Tuzlar, Sodyum Bor Hidrürler
<b>Kalsiyum Bor Cevheri (Kolemanit)</b>	Tekstil Kalite Cam Elyafı, Bor Alaşımaları, Cüruf Yapıcı, nükleer atık muhafazası
<b>Özel Sodyum Boratlar</b>	Fotoğrafçılık Kimyasalları, Yapıştırıcılar, Tekstil, "Finishing" Bileşikleri, Deterjan ve Temizlik Malzemeleri, Yangın Geciktiricileri, Gübreler ve Zirai Araçlar
<b>Sodyum Bor Cevheri (Üleksit ve Probertit)</b>	Yalıtım Cam Elyafı, Borosilikat Cam
<b>Sodyum Bor Hidrürler</b>	Özel Kimyasalları Saflaştırma, Kağıt Hamurunu Beyazlaştırma, Metal Yüzeylerin Temizlenmesi
<b>Sodyum Metaborat</b>	Yapıştırıcı, Deterjan, Zirai İlaçlama, Fotoğrafçılık, Tekstil
<b>Sodyum Pentaborat</b>	Yangın Geciktirici, Gübre
<b>Sodyum Perborat</b>	Deterjan ve Beyazlatıcı, Tekstil
<b>Sodyum Tetraborat(Boraks)</b>	Lehim ve Kaynak İşlemlerinde, Metal Yüzeylerinin Temizlenmesi, Seramikler, Sırlama, Yüksek Mukavemetli Camlar vb.
<b>Susuz Boraks</b>	Gübre, Cam, Cam Elyafı, Metalurjik Cüruf Yapıcı, Emaye, Sır, Yangın Geciktirici
<b>Trimetil Borat</b>	Kaplama Solüsyonları, Fluoborat Tuzlar, Sodyum Bor Hidrürler

**Çizelge 2.3.** Borun kullanım alanları [1,2,8,9,14,17,53]

KULLANIM ALANI	KULLANIM YERLERİ
<b>Askeri &amp; Zırhlı Araçlar</b>	Zırh Plakalar, Seramik Plakalar, Ateşli Silah Namluları vb.
<b>Cam Sanayi</b>	Borosilikat Camlar, Laboratuvar Camları, Uçak Camları, Borcam, Pyrex, İzole Cam Elyafı, Tekstil Cam Elyafı, Optik Lifler, Cam Seramikleri, Şişe, diğer Düz Camlar, Otomotiv Camları vb.
<b>Elektronik ve Bilgisayar Sanayi</b>	Mikro Chipler, LCD Ekranları, Akım Levhaları, Bilgisayar Ağlarında; Isıya-Aşınmaya Dayanıklı Fiber Optik Kablolar, Yarı İletkenler, Vakum Tüpler, Dielektrik Malzemeler, Elektrik Kondansatörleri, Kapasitörler, Gecikmeli Sigortalar, Bataryalar, Laser Printer tonerleri vb.
<b>Enerji Sektörü</b>	Güneş Enerjisinin Depolanması, Güneş Pillerinde Koruyucu olarak, Hücre Yakıtları vb.
<b>Fotoğrafçılık ve Görüş Sistemleri</b>	Kamera ve Mercek Camları, Fotoğraf Makinaları, Dürbünler, Banyo ve Film İmalatları
<b>İlaç ve Kozmetik Sanayi</b>	Dezenfekte Ediciler, Antiseptikler, Diş Macunları, Lens Solüsyonları, Kolonya, Parfüm, Şampuan vb.
<b>İletişim Araçlarında</b>	Cep Telefonları, Modemler, Televizyonlar vb.
<b>İnşaat Sektöründe</b>	Çimentoya Mukavemet Artırıcı ve İzolasyon Amaçlı olarak
<b>Kağıt Sanayi</b>	Beyazlatıcı olarak
<b>Kauçuk ve Plastik Sanayi</b>	Naylon vb Plastik Malzemeler vb.
<b>Kimya Sanayi</b>	Bazı Kimyasalların İndirgenmesi, Elektrolitik İşlemler, Flotasyon İlaçları, Banyo Çözeltileri, Katalistler, Atık Temizleme Amaçlı olarak, Petrol Boyaları, Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları, Yapıştırıcılar, Soğutucu Kimyasallar, Korozyon Önleyiciler, Mürekkep, Pasta ve Cilalar, Kibrit, Kireçlenme Önleyicileri, Dezenfektan Sıvılar, Sabun, Toz Deterjanlar, Toz Beyazlatıcılar, Parlatıcılar, Mumyalama vb
<b>Koruyucu</b>	Ahşap Malzemeler ve Ağaçlarda Koruyucu olarak, Boya ve Vernik Kurutucularında vb.
<b>Makine Sanayii</b>	Manyetik Cihazlar, Zımpara ve Aşındırıcılar Kompozit Malzemeler, vb.
<b>Metalürji</b>	Kaplama Sanayiinde Elektrolit olarak, Paslanmaz ve Alaşımli Çelik, Sürtünmeye-Aşınmaya Karşı Dayanıklı Malzemeler, Kaynak Elektrotları, Metalurjik Flaks, Refrakterler, Briket Malzemeleri, Lehimleme, Döküm Malzemelerinde Katkı Maddesi olarak, Kesiciler Kompozit Malzemeler, Zımpara ve Aşındırıcılar vb.
<b>Nükleer Sanayi</b>	Reaktör Aksamları, Nötron Emiciler, Reaktör Kontrol Çubukları, Nükleer Kazalarda Güvenlik Amaçlı ve Nükleer Atık Depolayıcı olarak,
<b>Otomobil Sanayi</b>	Hava Yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik Aksamda, Yağlarda ve Metal Aksamlarda, Isı ve Ses Yalıtımı Sağlamak Amacıyla, Antifrizler vb.
<b>Patlayıcı Maddeler</b>	Fişek vb.
<b>Seramik Sanayi</b>	Emaye, Sır, Fayans, Porselen Boyaları vb.
<b>Spor Malzemeleri</b>	Kayak Aksamları, Tenis Raketleri, Balık Oltaları, Golf Sopaları, Darbe Koruyucular vb.
<b>Tarım Sektörü</b>	Biyolojik Gelişim ve Kontrol Kimyasalları, Gübreler, Böcek-Bitki Öldürücüler, Yabani Otlar vb.
<b>Tekstil Sektörü</b>	Isıya Dayanıklı Kumaşlar, Yanmayı Geciktirici ve Önleyici Selülozik Malzemeler, İzolasyon Malzemeleri, Tekstil Boyaları Deri Renklendiricileri, Suni İpek Parlatma Malzemeleri, vb.
<b>Tıp</b>	Ostreopoz Tedavilerinde, Alerjik Hastalıklarda, Psikiyatride, Kemik Gelişiminde ve Artiritte, Menopoz Tedavisinde BNTC Terapi Yöntemiyle Beyin Kanserlerinin Tedavisinde, Manyetik Rezonans Görüntüleme Cihazlarında vb.
<b>Uzay ve Havacılık Sanayii</b>	Sürtünmeye-Aşınmaya ve Isıya Dayanıklı Malzemeler, Roket Yakıtı, Uydular, Uçaklar, Helikopterler, Zeplinler, Balonlar vb.

## 2.4. Türkiye ve Dünya'daki Durumu

Dünyadaki önemli bor yatakları Türkiye, Rusya ve ABD'de olup dünya ticari bor rezervleri 3 bölgede toplanmaktadır. Dünya toplam bor rezervi (görünür+muhtemel+mümkün) 1,2 milyar ton olup; bu rezervin yaklaşık %72'si Türkiye'de, %8,5'i Rusya'da ve %6,8'i ABD'de bulunmaktadır [1,53].

- Amerika Birleşik Devletleri Kaliforniya Eyaletinin güneyinde yer alan **“Mojave Çölü”**
- Güney Amerika da yer alan **“And Kemerı”**
- Türkiye'nin de yer aldığı **“Güney-Orta Asya Orojenik Kemerı”**

Rio Tinto firmasının 2008 yılı faaliyet raporunda ifade edildiğine göre, Kuzey Amerika'da US Borax tarafından açık ocak işletmeciliği yöntemi ile işletilen Boron (Kramer) yataklarında toplam rezerv  $B_2O_3$  bazında 21,3 milyon ton olarak verilmektedir. Tinkal tenörü %25  $B_2O_3$ , kernit tenörü ise %50-51  $B_2O_3$ 'tür. Fort Cady tarafından çözelti madenciliği yöntemi ile işletilen Fort Cady bor yatağı Mojave çölünde yer almakta olup %6  $B_2O_3$  tenörlü 150 milyon ton kolemanit cevheri içermektedir. Düşük tenörlü ve derinde olması nedeniyle (410 m) çıkarılması, işlenmesi zor ve maliyeti de yüksektir. 2006 yılı başındaki toplam rezerv  $B_2O_3$  bazında 9,5 milyon ton olarak verilmektedir.

ABC şirketi tarafından yeraltı ocak işletmeciliği yöntemi ile işletilen Death Valley Bor yatakları kolemanit, üleksit ve probertit içerir. Ortalama %18-24  $B_2O_3$  tenörlü 18 milyon ton tüvenan bor cevheri rezervi olup 2006 yılı başındaki toplam rezerv  $B_2O_3$  bazında 3,5 milyon ton olarak verilmektedir. Bu yatakta üretim yapılmamaktadır. Güney Amerika ülkelerindeki bor yataklarının en önemli özelliği genelde çok geniş alanlara küçük rezervler halinde yayılmasıdır. Diğer önemli bir özellik ise bu yatakların And dağlarının ortalama 4.000 m üzerindeki yüksek bölgelerinde yer alması ve çalışma mevsiminin kısa olmasıdır. Ayrıca bu madenlerin genelde tenörleri düşüktür. Bölgede bor rezervlerinin büyük bir kısmını üleksit oluşturmaktadır. Şili'de 4.250 m yükseklikte bulunan Salar de Surire bor cevheri yatağı 1,5 milyar ton tüvenan ( $B_2O_3$  bazında 30 milyon ton) rezervi ile dünyanın en büyük üleksit yatağıdır. Salar de Carcote ve Salar de Ascotan (Kuzey Şili) 7 milyon ton, Laguna Salinas (Peru) 2,5 milyon ton ve Salar de Uyuni (Bolivya) 5,5 milyon ton  $B_2O_3$  bazında üleksit rezervine sahiptir. Tincalayu (Arjantin) 284 bin ton  $B_2O_3$  bazında tinkal ve kernit rezervine, Loma Blanca (Arjantin) 3 milyon ton  $B_2O_3$  bazında tinkal, kernit ve inyonit rezervine sahiptir. Asya ülkelerindeki bor rezervleri genelde magnezyum borat ve sınırlı bölgelerde tinkal ve borosilikatlardan oluşmuştur. Bu cevherler genelde düşük tenörlü olup rafine ürün üretiminde teknolojik zorlukları olan yapıdadır, askarit

cevheri özellikle Çin ve Kazakistan'da bulunmakta olup ortalama  $B_2O_3$  tenörü %8-9'dur. Başta Yingkou olmak üzere Çin'deki askarit yatakları 25 milyon ton tüvenan cevher içermekte olup 2006 yılı başındaki toplam rezerv  $B_2O_3$  bazında 2 milyon ton olarak verilmektedir. Qaidan (Çin) bor yatakları 4.000 m yükseklikte bulduklarından ve birbiriyle ilişkili mineral grupları içerdiklerinden (bor, lityum ve potasyum) Güney Amerika da yer alan bor yataklarına benzemektedirler. JSC Bor tarafından açık ocak işletmeciliği yöntemi ile işletilen ve bilinen en önemli datolit bor yatağı Dalnegorsk Rusya bölgesinde yer almaktadır.  $B_2O_3$  tenörü %8-9'dur [1,53].

Türkiye'de önemli tinkal yatakları Kırka'da kolemanit yatakları ise Emet ve Bigadiç civarında bulunmaktadır. Bunlara ilaveten, Bigadiç'te az miktarda üleksit rezervi mevcut olup Kestekte zaman zaman üleksit yan ürün olarak elde edilmektedir [1,53].

**Çizelge 2.4.** Türkiye'deki rezerv miktarları [1,53]

Cevher	Tenör (%)	Toplam (bin ton)	(%)
Kolemanit	28,40	644.000	76
Üleksit	29,00	14.000	2
Tinkal	25,80	193.000	22
<b>Toplam</b>	<b>27,78</b>	<b>851.000</b>	<b>100</b>

**Çizelge 2.5.** Dünya bor rezervleri [1,53]

Ülke	Toplam	Dağılım (%)
Türkiye	851.000	72
ABD	80.000	7
Rusya	100.000	8
Çin	47.000	4
Arjantin	9.000	1
Bolivya	19.000	2
Şili	41.000	3
Peru	22.000	2
Sırbistan	13.000	1
İran	1.000	0
<b>Toplam</b>	<b>1.183.000</b>	<b>100</b>

## 2.5. Türkiye Bor Yatakları ve Zenginleştirme Tesisleri

Türkiye'nin bilinen borat yataklarının tümü Batı Anadolu'da yer almaktadır. Günümüze dek saptanmış olan borat yatakları, Marmara Denizi'nin güneyinde, doğu-batı doğrultusunda yaklaşık 300 km, kuzey-güney doğrultusunda ise 150 km'lik bir alan içinde Bigadiç, Sultançayırı, Kestelek, Emet ve Kırka bölgelerinde bulunmaktadır [12]. Bor mineralleri, doğada diğer mineral ve kayaçlarla birlikte masif olarak veya çözelti olarak sularda bulunmaktadır. Dolayısıyla üretim yöntemleride buldukları yere ve derinliğe göre değişmektedir. Karada masif olarak bulunan bor bileşikleri; cevherin bulunduğu derinliğe ve fiziksel yapısına bağlı olarak açık ocak veya kapalı ocak yöntemi veya çözelti madenciliği yöntemi ile üretim yapılmaktadır [53].

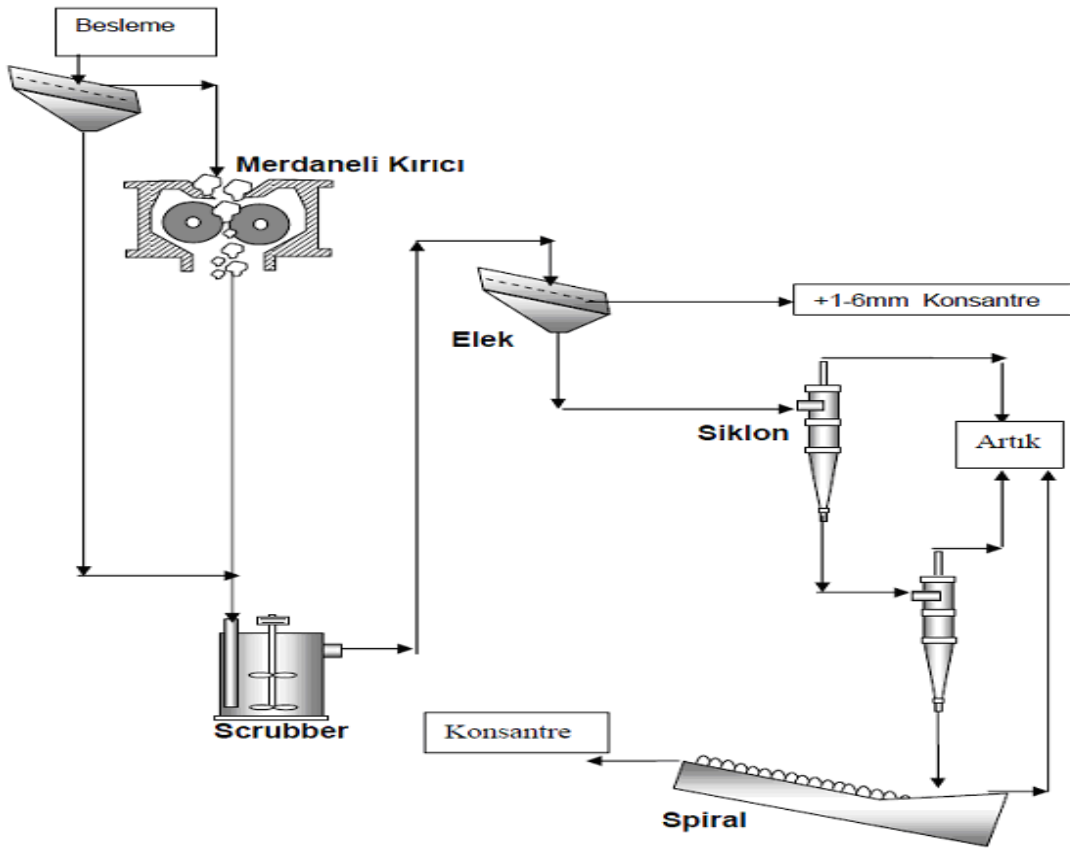
### 2.5.1. Kırka borat yatakları ve zenginleştirme tesisleri

Ankara'nın 240 km batısında Eskişehir ilinin 70 km güneyindeki Kırka Beldesinin 4,5 km batısında kurulmuş olup, Eskişehir iline 74 km mesafededir. Yataklar neojen tortuları arasında yer almaktadır. Miosen'de mevcut göl ortamlarına volkanik faaliyetler neticesinde fay zonlarından gelen hidrotermal çözeltilerin; ortamın fiziko-kimyasal koşulları altında çökerek boratları oluşturduğu sanılmaktadır. Boratlar kil, tuf ve marn ile ara katlı olup, kireçtaşı borat mercceklerinin altında ve üstünde bulunur. Yatağın sondajlarla kesilen kalınlıkları 2-150 m arasında değişmekte olup, aritmetik ortalaması 70 metredir. Yataktaki başlıca bor mineralleri tinkal, kolemanit ve üleksittir. Bu minerallere ilaveten yataкта tinkalkonit, tünelit ( $\text{SrB}_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), kurnakovit, inyoit, meyerhofferit ve hidroborasit mineralleri de oluşmuştur. Boraks konsantrasyonunun en yüksek olduğu yer, yatağın merkezi olan Sarıkaya'dır. Boraks, 0,1-1 cm iriliğinde sübhedral ve anhedral kristaller halindedir. Yatağın kenar kesimlerinde ana mineraller üleksittir ve genellikle lifli, masif yapıdadır. Kolemanit, yatağın alt ve üst kısımlarında yumrular ve "geod"lar halinde bulunur. Yataкта birbirine tedricen geçiş gösteren ve boraks kristalleri ile killerin yer değiştirmesine göre sınıflandırılan 3 tip cevhere rastlanmaktadır. Bu cevherler bantlı cevher, bileşik cevher (yeşilimsi, sarımsı ve kahverenginin değişik tonlarında) ve camsı cevher (saydam, beyaz renkte olup tuz görünümündedir)'lerdir. Kırka boraks yatağı dünyanın en büyük rezervine sahip olup, toplam rezervi 520 milyon ton dolayındadır. Yatağın ortalama  $\text{B}_2\text{O}_3$  tenörü %24,7'dir [12,18,53].

Kırka bölgesinde bulunan doğal boraks (tinkal) açık işletme yöntemiyle üretilmektedir. Üzerindeki örtü tabakası delme, patlatma ve ekskavatörlerle kaldırılmakta cevher yine delme ve patlatma ile gevşetildikten sonra kamyonlarla konsantratör tesisine nakledilmektedir. Yılda ortalama 1.150.000 ton tüvenan cevher işleme ve %32-33  $\text{B}_2\text{O}_3$  tenörlü 800.000 ton/yıl



konsantre tinal üretim kapasitesine sahip konsantratör tesisinde, cevher 40 cm'lik ızgaralardan geçirilerek önce 10 cm'ye sonra 2,5 cm'ye kırılarak 10.000 ton kapasiteli ara stok binasında stoklanmaktadır. Ara stok binasından düzenli olarak alınan malzeme, 6 mm'lik kuru elekte elenir, 6 mm boyutunun altındakiler %65 katı/sıvı pülp haline getirilerek içerisinde bulunan yabancı madde ve killerin aşındırılarak yıkanması için yıkama hücrelerine verilir. Buradan çıkan malzeme +1 mm'lik sulu elekten geçirilerek elek üstü santrifüj su arındırıcılardan geçirilerek stoklanır, +6 mm'lik malzeme tesislerdeki merdaneli ve şoklu kırıcılarda kırılarak aynı işlemlerden geçirilir [12,18,26,29].



Şekil 2.2. Kırka bor zenginleştirme tesisi akım şeması [55]

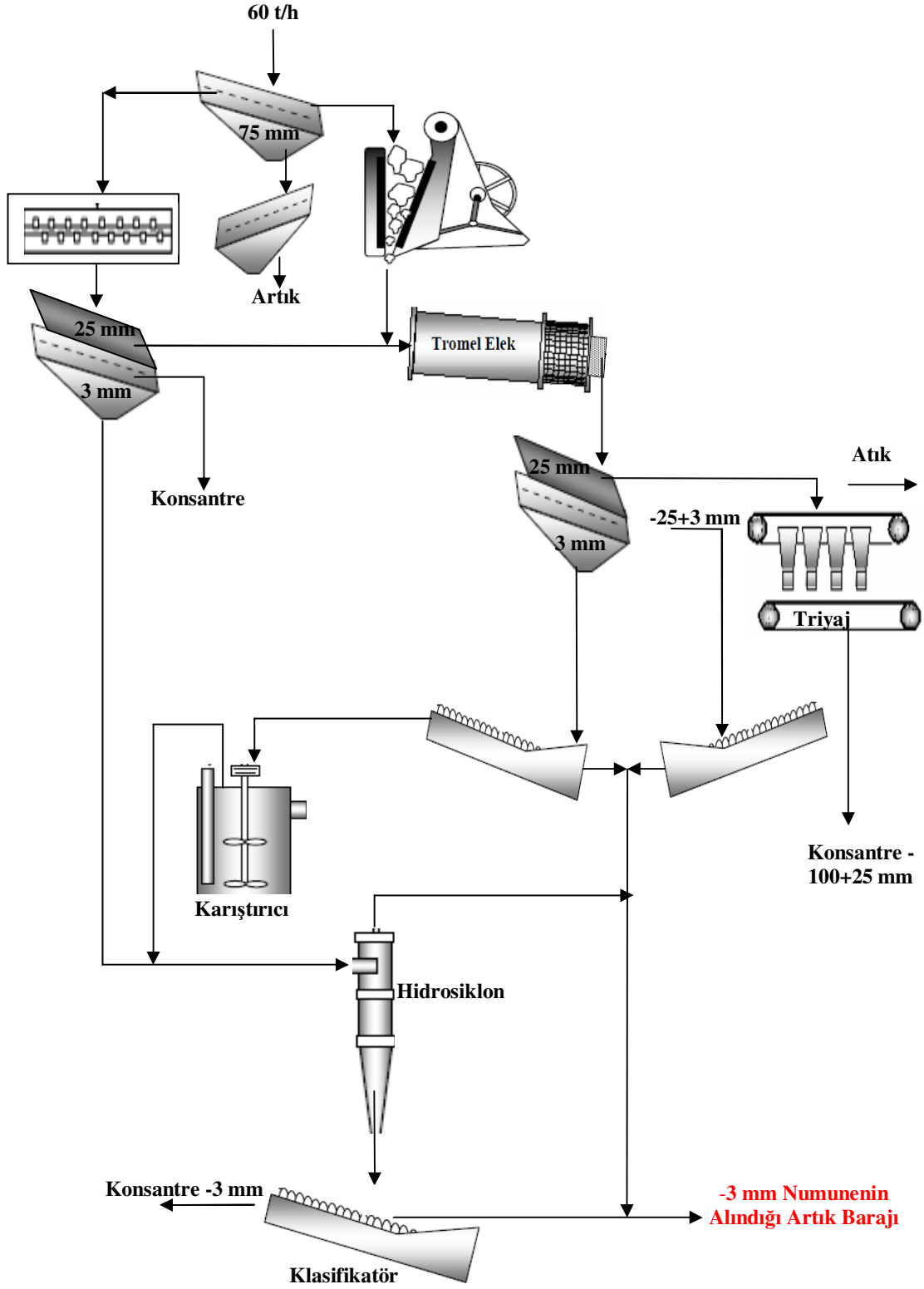
### 2.5.2. Emet borat yatakları ve zenginleştirme tesisleri

Kütahya'nın yaklaşık 60 km batısında yer alan Emet yöresinde Etimaden tarafından işletilen Hisarcık, Hamamköy, Göktepe ve Espey ocakları vardır. Bölgenin toplam rezervi yaklaşık 40 milyon ton kadardır. Bölgedeki neojen, eski metamorfik ve magmatik kayalarla çevrilmiş kuzey-güney doğusunda uzanan ve taban üzerine uyumsuz oturan göl tortularından oluşur. Burada taban kireç taşıyla başlayan tortullar, çakıl taşı, kumtaşı, tuf, kil, marn ve linyit içeren karmaşık bir seriyle devam eder. Bunun üzerine boratlı kil, marn, tuf serisi gelir ve bütün bu birimler tavan kireç taşıyla örtülür. Bütün neojenin toplam kalınlığı yaklaşık 600 m kadardır. Neojen Kestelek bölgesi ile büyük benzerlik gösterir. Fakat burada taban, kireç taşı ile başlar. Daha sonra ortamın yine tektonik olarak duyarlı olmadığını kanıtlayan çakıl taşı ve kumtaşı birikimleri görülür. Boratlı seri içinde tüfleri ve gri-yeşil killerin varlığı tektonik hareketlerin durduğunu, volkanizmanın başladığını belirtir. Kestelek'ten farklı olarak volkanizmadan sonra tektonik hareketlerin tekrar başladığını belirleyen çakıl taşları ve kumtaşları gözlenmez. Bunların yerine daha duyarlı ortamlarda oluşan kireçtaşları almıştır. Hisarcık ocaklarında boratlı seri 30-40 m kalınlıktadır. Birkaç kat katmandan oluşan ve kalınlıkları 1-1,5 m kadar olan boratların ana cevher minerali kolemanittir. Toplam borat kalınlığı 20 m'ye ulaşır. Kolemanit killer içinde irili ufaklı (10-50 cm) yumrular şeklinde bulunur. Kolemanitle birlikte az miktarlarda üleksit ve kalsit de gözlenmiştir. Bunların yanında kolemanitin değerini düşüren arsenik mineralleri (realgar, orpiment), kolemanit yumrularının dışı yakın kısımlarında, bütün yumruyu çevreleyen bir zar şeklinde bulunur. Hamamköy, Espey ve Göktepe'de tek mineral kolemanittir. Killer içinde gömülü yumrular şeklinde bulunurlar. Hamamköy'de boratlı serinin kalınlığı 20 m'dir. Kolemanit bantları ise yaklaşık 7 m'ye ulaşır. Espey'de killer ara katkılı, toplam kalınlığı 20 m'ye ulaşan 4 kolemanit katmanı vardır [12,18,53].

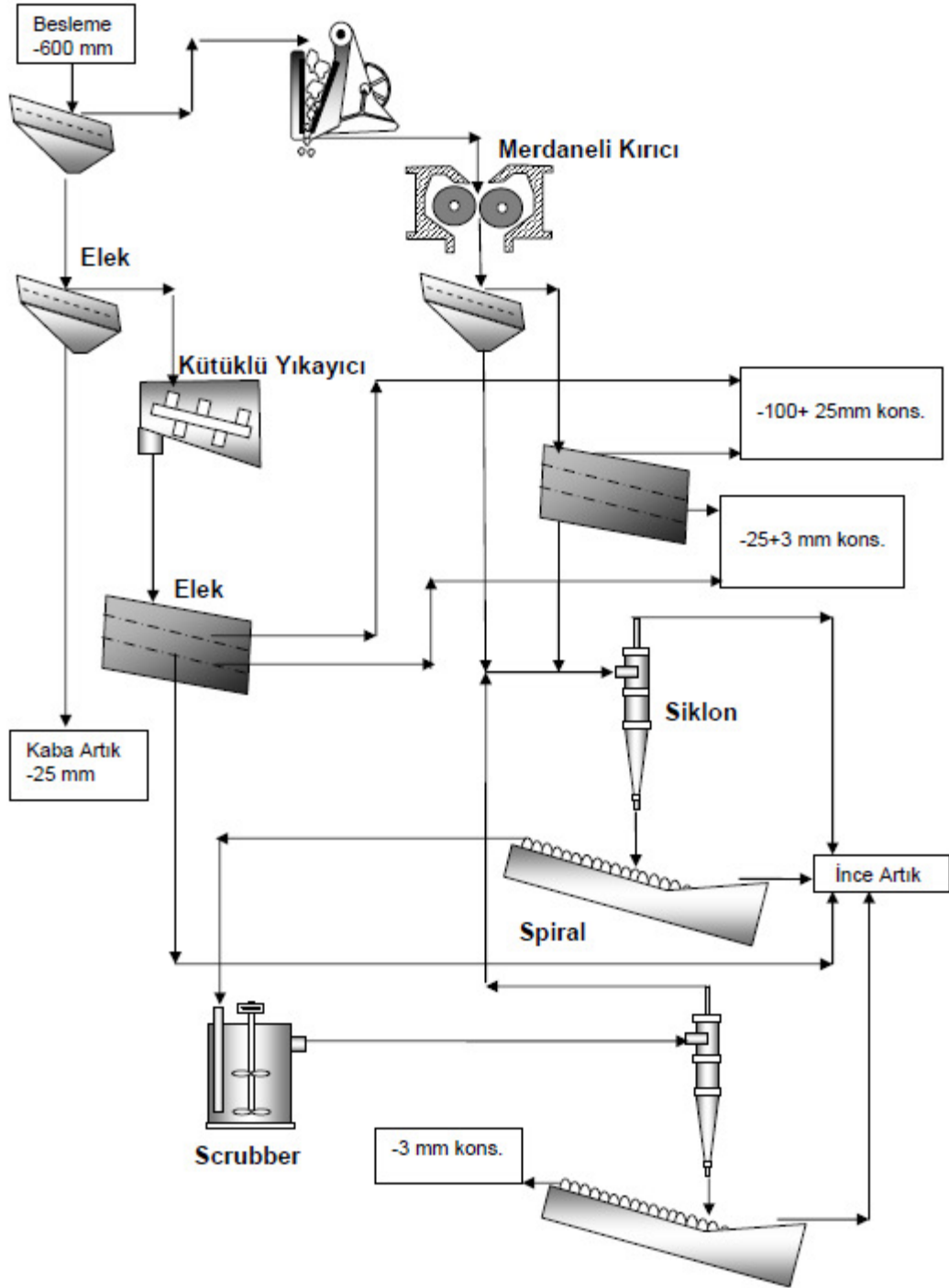
Hisarcık ve Espey açık ocaklarından üretilen cevher yine buralardaki konsantratörlerde zenginleştirilerek satışa hazır hale getirilmektedir. Hisarcık konsantratörü tüvenan cevher işleme kapasitesi 900.000 ton/yıl, konsantre cevher üretim kapasitesi 450.000 ton/yıl, Espey konsantratörü cevher işleme kapasitesi 300.000 ton/yıl ve konsantre kolemanit elde etme kapasitesi ise 120.00 t/yıl'dır [12,18,32].

Hisarcık ve Espey bölgelerine kurulan konsantratörlerde yapılan başlıca işlemler kırma, klasifikasyon ve yıkamadan oluşmaktadır. Kırma sonrası önce elle ayıklama, daha sonra yıkama-dağıtma sonrası boyuta göre sınıflandırma ile zenginleştirme yapılır. Hisarcık ve Espey

açık işletmelerinden elde edilen tüvenan tenörü yaklaşık %29  $B_2O_3$  olup, konsantratör tesisi çıkış tenörü %41 dolayında gerçekleşmektedir [12,18,32].



Şekil 2.3. Emet Espey bor zenginleştirme tesisi akım şeması [7]



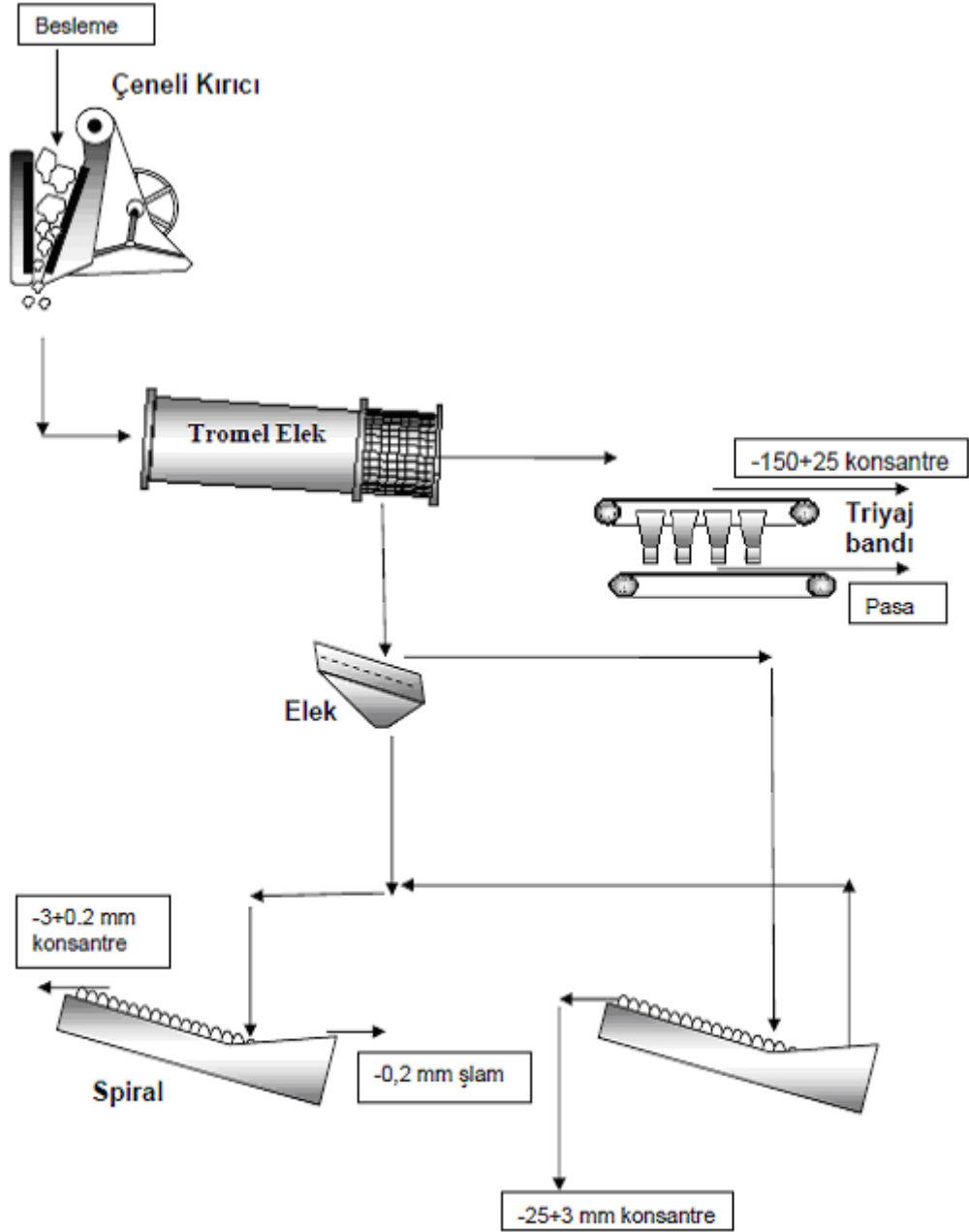
Şekil 2.4. Hisarcık bor zenginleştirme tesisi akım şeması [55]

### 2.5.3. Bigadiç borat yatakları ve zenginleştirme tesisleri

Yataklar, Balıkesir ili Bigadiç ilçesinin kuzeydoğusunda yer almaktadır. Bigadiç borat havzası yaşlı neojen tektonik bir gölün kapladığı alandır. Yataklarda; marn, borat, kil ve tuf ardışık dizilmişlerdir. Boratlar 1-3 m kalınlıkta tabakalar halinde killer arasında yer alır. Başlıca mineraller kolemanit ve üleksittir. Kolemanit yataklarındaki arsenik oranı çok düşüktür ki bu özellik cevherin önemini artırmaktadır [8]. Yatakların rezerv durumu;

- Kolemanit: Toplam 58 milyon ton, ortalama %30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- Üleksit: Toplam 11 milyon ton, ortalama %30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Çıkarılan cevherler; konsantratör tesisinde zenginleştirme işlemine tabi tutularak satılık ürün haline getirilmektedir. Tesiste yapılan zenginleştirme; cevheri su ile yıkayarak kil minerallerinden ayırma ve ardından da sınıflandırma işleminden ibaret olup üç ayrı boyutta konsantre ürün elde edilmektedir. Elle ayıklama, tamburla aktararak dağıtma, boyuta göre sınıflandırma ile zenginleştirme yapılır. Tesise beslenen ortalama tüvenan cevher tenörü %30-32 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olup, elde edilen kaba konsantre tenörü %42 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ince konsantre tenörü %36 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve ara ürün tenörü %29 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> civarında gerçekleşmektedir. Artık ince ürün ise %16 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içermektedir. Tüvenanın üleksit olması halinde ise %30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'lük cevherden elde edilen kaba konsantrenin tenörü %38 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ince konsantre tenörü ise %26 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olarak gerçekleşmektedir [2,12,32,53].



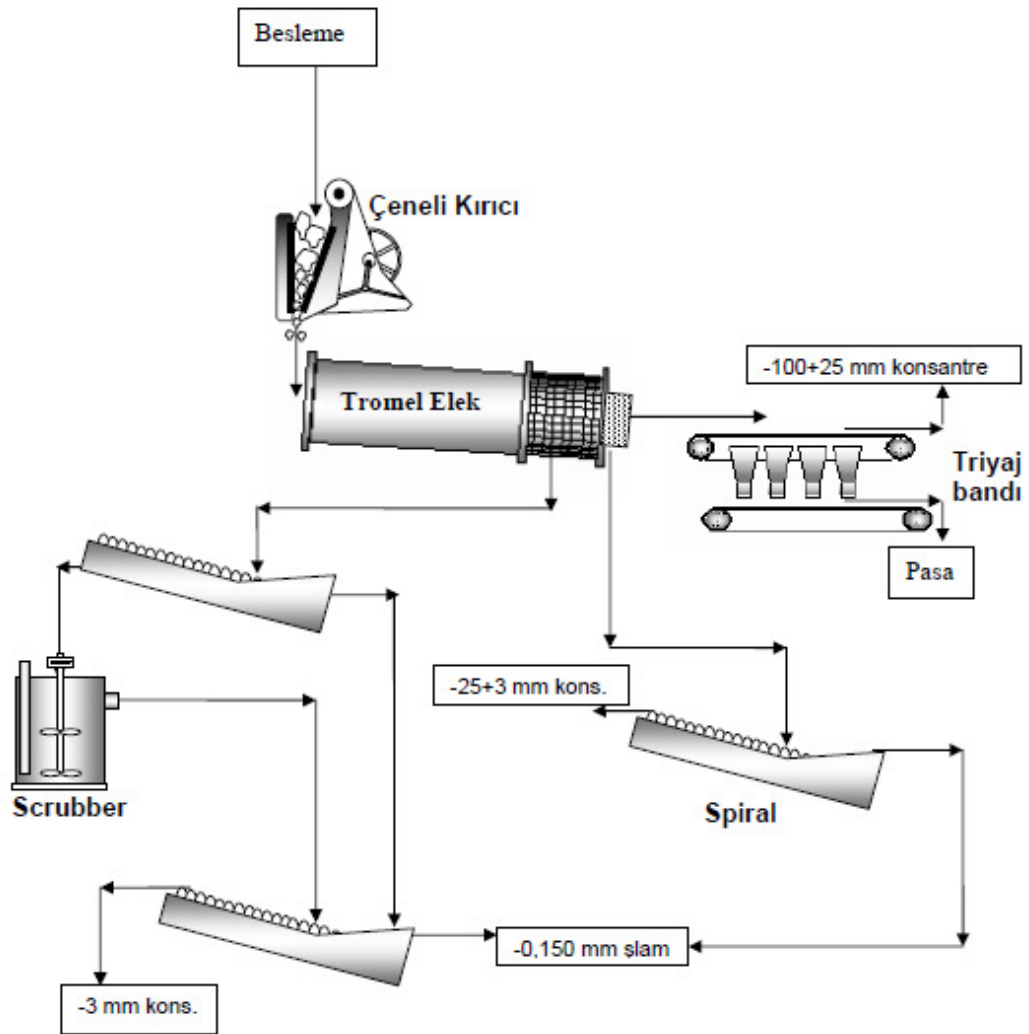
Şekil 2.5. Bigadiç bor zenginleştirme tesisi akım şeması [55]

#### 2.5.4. Kestelek kolemanit yatakları ve zenginleştirme tesisleri

Bursa ilinin Mustafa Kemal Paşa ilçesinin güneydoğusunda yer almaktadır. Yatak, klasik neojen sedimantasyonunda oluşmuştur. Neojen tortuların kalınlığı yer yer volkanitlerle ve genç alüvyonlarla örtülmüştür. Boratlı katmanlar, kil-marn tuf serisi içinde oluşmuştur.

Killerle ayrılmış üç boratlı katman vardır. Bu katmanlarda boratlar kolemanit yumruları biçimindedir. Yumruların büyüklükleri bir kaç cm'den 80-100 cm'ye kadar değişir. Başlıca bor minerali kolemanit olup, hidroborasit, probertit, meyerhofferit ve üleksit yan mineraller olarak görülür. Yatağın ortalama %29,4 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>tenörlü toplam 7 milyon ton rezervi vardır [5,8].

Konsantratör tesisi kırma, yıkama, eleme ve triyaj ünitelerinden oluşmakta olup konsantratör de işlenen tüvenan cevher kapasitesi 200.000 ton/yıl ve elde edilen konsantre ise 90.000 ton/yıl'dır [2,53].



Şekil 2.6. Kestelek bor zenginleştirme tesisi akım şeması [55]

### **3. BOR ARTIKLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Türkiye; gerek yeraltı gerekse yerüstü kaynakları bakımından oldukça zengindir. Atık madenciliğinin amaçları arasında; evrensel kaynakların yeniden kazanımının maksimize edilmesi, atık maddelerdeki değerli mineralin tekrar elde edilmesi ve doğal kaynakların korunması ile doğaya ve dolayısıyla insanlığa zararı olan maddelerin veya minerallerin eliminesinin sağlanmasıdır. Madencilik faaliyetleri sırasında ortaya çıkan atıkların; miktarlarının giderek artması, depolanacağı yer, doğa tahribatı, atıkların stabilitesi ve emniyeti, hava, toprak ve su kirliliği ve ıslah çalışmaları başlıca çevre sorunlarıdır. İleride tüm dünya ülkelerini sıkıntıya sokacak böylesi problemlerle karşılaşmamak için bu kaynaklarımızın korunması ve en rasyonel biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu noktada, atıkların tekrar ekonomiye kazandırılması zorunlu hale gelmiştir [2,5,18,19,20,53].

#### **3.1. Bor Atıklarının Uygun Bir Şekilde Değerlendirilmesinden Elde Edilecek Avantajlar**

1. Hali hazırda büyük bir potansiyel olan stoklar ülke ekonomisine kazandırılacaktır.
2. Stoklama maliyeti azalacaktır.
3. Çevre kirliliği önlenmiş olacaktır.
4. Üretilen yeni ürünlerle ek kazanç sağlanacaktır.
5. Atıkların yer altı ve yer üstü sularını kirlilemesi önlenecektir.
6. Atıkların atıldığı göletlerin yapım maliyetleri ve kapladıkları alanlar azalacaktır [2, 5,51,53].

#### **3.2. Bor Atıklarının Değerlendirme Yöntemleri**

İdeal değerlendirilme şekli atıkların tamamının değerlendirilmesidir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalara göre bor atıklarının değerlendirme yöntemleri; atıkların depolanması (atıkların kompaktlaştırılması (sıkıştırma), pülp halindeki atıkların flokülasyonu), atıklardaki kıymetli içeriklerin kazanılması ve kilin değerlendirilmesi şeklindedir [2,5,51].

#### **3.3. Atıklardan Borun Tekrar Kazanılması**

Genelde bor atıklarına, zenginleştirme sırasında atığa kaçan borun tekrar kazanılması amacıyla suda bekletme+sınıflandırma, gravite yöntemleri, manyetik ayırma, elektrostatik ayırma, soda liçi, çözeltme+flokülasyon, flotasyon, ısı işlem (kalsinasyon, dekrepitasyon) ve



briketleme yöntemleri uygulanmaktadır. Ayrıca son zamanlarda ses ötesi dalgaların kil uzaklaştırmadaki etkinliği ve atıklardaki borun doğrudan çözme helezonu ile kazanımı araştırılmış ve önemli sonuçlar alınmıştır. Bor konsantratör tesislerinde uygulanan elle ayıklama, mekanik dağıtma+sınıflandırma yöntemleri ancak iri boyutlara uygulanabilmekte, ince boyuttaki (-0,5 mm) %15-20 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü cevherler ise atık barajına gönderilmektedir. Atıklardaki killerin içinde ferromanyetik ve paramanyetik minerallerin bulunması durumunda sabit mıknatıslı yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcılar etkili bir ayırım yapabilmektedir [2,5,51].

### **3.4. Atıkların Uygun Sektörde Kullanılması**

Bor minerallerinin yan kayacının çoğunlukla kil mineralleri içermesi, bu atıkların seramik ve inşaat sanayinde değerlendirilebileceğini akla getirmektedir. Atık killerin tuğla sanayinde değerlendirmesi ile hem tuğla sanayinde ek hammadde kaynağı sağlamakta hem de işletmede atıkların atılması sırasında ortaya çıkan problemler aza indirilmektedir. Atık killer seramik sanayinde frit, sır ve masse yapımında, ayrıca inşaat sektöründe çimento ve betona katkı malzemesi, yol, baraj ve köprü yapımında dolgu malzemesi olarak değerlendirilebilir [2,5,51].

### **3.5. Atıkların Uygun Bir Şekilde Depolanması**

Tesislerde zenginleştirme sonucu ortaya çıkan ince artıklar atık barajına verilmeden önce uygun zenginleştirme yöntem veya yöntemleri ile bor kazanılmalı ve geriye kalan artıklar tükene beslenmelidir. Etkili bir çökelme işleminden sonra suyu yeniden kazanılan nihai artıklar diğer endüstriyelerde kullanılma olanağı düşünülerek barajlarda stoklanmalıdır.

#### 4. BOR CEVHERLERİNİN ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Bor zenginleştirme yöntemleri diğer minerallerde olduğu gibi, ekonomik değere sahip bor minerallerinden (kolemanit, üleksit, tinkal) beraber aynı yatakta bulunan değersiz minerallerden (kalker, kalsit, jips, marn, tuf, kil, mika, organik madde vb.) arındırmak için uygulanır.

Bor minerallerinden de gang minerallerini ayırmak için mineraller arasındaki fiziksel (boyuta göre sınıflandırma, gravite, manyetik ve elektrostatik ayırma), kimyasal (dekrepitasyon, liç) ve fizikokimyasal (flotasyon) özellik farklılıklarına dayanılarak zenginleştirme yapılmaktadır.

Ülkemizde bulunan bor mineralleri yatakları genellikle killer içerisinde yumrular (iri kristalli) halinde ve kil ile sıvanmış olarak yüksek tenörlü olarak bulunmaktadır. Bu nedenle genellikle bor ile kil arasındaki boyut farklılığından yararlanılarak kırma-aşındırma (yıkama), sınıflandırma ve triyaj ile değişik boyutlarda (-100+25, -25+3 ve -3+0,2 mm) zenginleştirilmektedir. Böylece iri ve ince boyutlardaki önemli oranlarda artıklar ortaya çıkmaktadır. Bunlarında tenörleri bazen başka ülkelerdeki yatak tenörlerinden bile yüksek olabilmektedir. Bu nedenle iri boyutlarda zenginleştirme sonucu ortaya çıkan artıkların değerlendirilmesi oluşmaktadır.

Özellikle bor mineralleri kırılğan bir yapıya sahip olduğu için kırma ve iri zenginleştirme sırasında önemli oranlarda ve yüksek tenörlerde ince (-3 mm) artıklar ortaya çıkmakta bunlarda artık barajında biriktirilmektedir. Bu artıklar ise hem ekonomik hem çevresel sorunlara neden olduğu gibi artık barajlarının kapasitelerinde yetersizliği ortaya çıkmaktadır.

Flotasyon yöntemi, sadece ABD ve Rusya'da uygulanmaktadır. Diğer zenginleştirme yöntemlerinin ise henüz uygulanması bulunmamaktadır. Fakat laboratuvar çapta yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Buna göre endüstriyel ve laboratuvar çapta uygulanan zenginleştirme yöntemleri;

- Mekanik Aşındırma (Yıkama) ve Boyuta Göre Sınıflandırma ile Zenginleştirme
- Gravite Yöntemi ile Zenginleştirme
- Manyetik Zenginleştirme
- Isıl İşlemler

- Elektrostatik Ayırma ile Zenginleştirme
- Ses Ötesi Dalgalar ile Zenginleştirme
- Flotasyon Yöntemi İle Zenginleştirme

#### **4.1. Mekanik Aşındırma (Yıkama) ve Boyuta Göre Sınıflandırma ile Zenginleştirme**

Cevherlerin ufalama işlemleri esnasında farklı sertlik ve gevreklikteki minerallerden meydana gelmesi nedeni ile farklı büyüklük ve şekillerde kırılması söz konusu olabilir. Bir mineralin kırılmaya karşı dayanıklılığını diğer minerallerden çok farklı olması bir veya daha çok mineralin iri veya ince tanelerde önemli ölçüde zenginleşmesine yol açabilir. Daha sonra kırılma ürünü üzerine yapılacak bir boyuta göre sınıflama ile bu iki farklı ürünü ince ve iri taneler halinde ayırarak konsantre ve artık elde edilebilir. Boyuta göre sınıflama, elekler, klasifikatörler ve siklonlar ile yapılabilir. Kırma işlemleri esnasında kristal yapılarındaki farklılık dolayısı ile cevherleri oluşturan mineraller farklı şekilde kırılabilir. Bazı cevherler, örneğin bor cevherleri kil ile karışık halde bulunur. Böyle bir cevher kırılmaya tabi tutulursa kil mineralleri ve diğer yararlı mineraller serbest hale gelir. Bu karışım su ile yıkanırsa kil mineralleri suyla dağılarak çok ince bir şlam oluşturur. Bu şlam karışımdan ayrılırsa geride yararlı mineral konsantresi ve kilden ibaret artık elde edilir. Kilin yıkanması işlemi için kullanılan başlıca aygıtlar kütüklü yıkayıcı, pervaneli yıkayıcı ve aktarma tamburlarıdır. Karıştırma süresi, karıştırma hızı, yıkama çözeltisinin süspansiyon yoğunluğu, dağıtıcı kimyasal cinsi ve dozajı, katı/sıvı oranı ve tane boyutu bu zenginleştirme işleminde etkili olan parametrelerdir [18].

Elle ayıklama yönteminde; tüvenan bor cevheri 100 mm tane boyutunun altına kırıldıktan sonra 25 mm'lik elekte elenir ve -100+25 mm tane sınıflı bant üzerinden geçirilir. Bandın çevresindeki işçiler tarafından faydalı bor minerali ile yan taşı renk, parlaklık ve kristal yapılarındaki farklılıklarından yararlanılarak zenginleştirme işlemi yapılmaktadır [10,54].

Yıkama tamburu ile zenginleştirmede; bor mineralleri, kil minerallerinin su içinde şişme ve dağılma özelliklerinden yararlanılarak ayrılmaktadır. Yıkama tamburuna verilen bor cevherleri içindeki ince boyutlu killer pülp içinde dağılarak iri boyutlu bor minerallerinden sınıflandırma sonrasında ayrılmaktadır. Aktarma tamburları silindirik veya silindirokonik gövdelidirler. Silindir boyutları 1,5-2,5 m boyutunda olmaktadır. Tambur taşıyıcı rulolar üzerinde 10-15 dev/dk. bir dönüş hızı ile döndürülür. Bu tamburlara 10 cm boyuta kadar cevher beslenebilir. Gövdelerinin iç yüzeyinde malzemeyi kaldıracı plakalar bulunur. Aktarma işleminin daha etkin yapılabilmesi için "Log-Washers" adında araçlar kullanılmaktadır. Log-Washers'lar üzeri kepçelerle kaplı ve kütük adı verilen karıştırıcı oluk üzerine

yerleştirilmiştir. Cevher bir taraftan beslenmekte, su karşı taraftan verilmekte tamburun dönüşü esnasında kaldırıcılar ile karıştırılan cevherdeki kil mineralleri sürtünme ve düşmelerdeki darbe etkisi ile dağılıp, serbest hale gelmektedirler. Bor cevheri 15-25 dev/dk hızla dönen kütüğün içinde sıkışırken kil mineralleri su içinde dağılarak artık kenarından taşma ile uzaklaştırılmaktadır. Kütüklü yıkayıcılarda dağıtma ve yıkama işlemi aynı anda yapılmaktadır. Bu yöntem Bigadiç ve Emet konsantratör tesisinde kullanılmaktadır [54].

Aşındırıcı ovucularda ise; sac veya paslanmaz çelikten oluşan bir tank ile içindeki mil üzerine takılmış, kanatları birbirine göre ters hareket eden karıştırıcı pervanelerden oluşmaktadır. Bir elektrik motoru tarafından tahrik edilen millere takılı pervaneler yüksek devirle dönerek mineral taneleri arasında sürtünme ile kilin dağılması gerçekleştirilir. Aşındırıcı ovucuya beslenen cevherler genellikle 4-5 mm boyutunun altındadır. Çalışılan pülp %70-80 katı içerir. Tank içinde yeteri kadar dağılmış cevher, tanktan dışarı alınarak boyut ayırma işlemine tabi tutulduğunda kilden ibaret şlam ve mineral taneleri birbirinden ayrılabilir [54,55].

Mekanik aşındırma (yıkama) ve boyuta göre sınıflandırma ile zenginleştirme konusunda yapılan çalışmalar Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Mekanik aşındırma (Yıkama) ve boyuta göre sınıflandırma ile yapılan zenginleştirme çalışmaları

Çalışma	Yapılan deney	Numune, tane boyutu (mm) ve tenörü (%B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Elde edilen konsantr tane boyutu (mm)	Karıştırıcı tipi ve pervane sayısı	Karıştırma süresi (dak.)	Karıştırma hızı (devir/dak.)/hücre hacmi (lt.)	% K	Konsantr tenörü (% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Verim (%)	Dağıtıcı cinsi ve miktarı (g/t)
[40]	Mekanik+Kimyasal dağıtma Yaş eleme	Emet Espey kolemanit artığı -3 26,30	-3+0,150	Denver hücresi	10	1000/2	30	43,76	73,51	Na(PO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> 200
[56]	Mekanik+Kimyasal dağıtma Yaş eleme	Emet Espey kolemanit artığı -3 26,30	-3+0,150	Denver hücresi	10	1200±50/2	40	44,63	95,52	Na(PO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> 600
[22]	Mekanik dağıtma + Yaş eleme	Kestelek kolemaniti -1 20,70	-1+0,074	Wemco Fagergren 3	20	785	65	31,9	74,9	-
[22]	Mekanik dağıtma + Yaş eleme	Bigadiç kolemaniti -3+0,2 29,50	-3+0,297	Wemco Fagergren 3	20	785	65	34,6	87,5	-
[24]	Mekanik dağıtma + Sınıflandırma	Kestelek kolemaniti -3	-3+0,1	Pervaneli aşındırıcı	24	1400	50	37,09	96,04	-
[63]	Mekanik dağıtma + Sınıflandırma	Bigadiç kolemanit artığı -3 18	-3	Mekanik karıştırıcı	20	780	50	32,5	86,4	-

**Çizelge 4.2.** Mekanik aşındırma (yıkama) ve boyuta göre sınıflandırma ile yapılan zenginleştirme çalışmaları

Çalışma	Yapılan deney	Numune, tane boyutu (mm) ve tenörü (%B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Elde edilen konsantr tane boyutu (mm)	Karıştırıcı tipi ve pervane sayısı	Karıştırma süresi (dak.)	Karıştırma hızı (devir/dak.) /hücre hacmi (lt.)	% K	Konsantr tenörü (% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Verim (%)	Dağıtıcı cinsi ve miktarı
[23]	Scrubbing + Yaş eleme	Kestelek kolemaniti -25+3 30,00	-25	-	-	750	-	35,94	91,37	-
[70]	Suda bekletme + Mekanik dağıtma	Emet kolemaniti 23,56	-4	Mekanik karıştırıcı	15	950	60	33,20	84,89	-
[70]	Suda bekletme + Mekanik dağıtma	Emet kolemaniti 23,56	-4	Mekanik karıştırıcı	15	950	60	35,23	81,88	-
[55]	Aşındırıcı ovucu	Bigadiç Acep ocağı üleksiti -3+0,2	-3+0,2	-	30	1700/1	75	35,48	80	-
[55]	Aşındırıcı ovucu	Bigadiç Simav ocağı kolemaniti -3+0,2 32,73	-3+0,2	-	30	1700/1	75	41,72	90,84	-
[29]	Aşındırıcı karıştırma	Tinkal -25+0,2 28,94	-25	-	10	1500	50	30,85	56,78	-
[7]	Hidrosiklon	Emet kolemaniti -25	-0,425	-	-	-	20	40,69	64,68	-

#### 4.2. Gravite Yöntemi ile Zenginleştirme

Bor cevherlerinde, mineralojik bileşimi açısından gang minerali olarak kil bulunmaktadır. Bor mineralinin özgül ağırlığı 1,5-2,5 gr/cm<sup>3</sup>, gang minerali kilin ise 2-3 gr/cm<sup>3</sup>'tür. Gravite zenginleştirmesinde, aralarındaki özgül ağırlık farkı nedeni ile akışkan ortamdaki hareket farklılığına dayanılarak mineral tanelerinin birbirinden ayrılması sağlanmaktadır. Mineral tanelerinin akışkan ortamdaki hareketleri, özgül ağırlığın yanı sıra şekil, tane boyutu ve ağırlığı ile yakından ilişkilidir. Bor mineralini, genelde yan kayaç olarak bulunan kil mineralinden ayırmada, boyuta göre zenginleştirme ve yıkama-dağıtma yöntemleri başarılı olamaz ise diğer yöntemlere göre daha ekonomik olması açısından gravite ile zenginleştirme yöntemi denenebilir [18,22].

Gravite yöntemi ile zenginleştirme konusunda yapılan çalışmalar Çizelge 4.3'de verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Gravite yöntemi ile yapılan zenginleştirme çalışmaları

Çalışma	Yapılan deney	Numune, tane boyutu (mm) ve tenörü (%B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Elde edilen konsantre tane boyutu (mm)	% K	Konsantre tenörü (% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	% Verim	Açıklama
[21]	Sarsıntılı masa	Bigadiç kolemanit -25+0,2	-1+0,5 -0,5	-	51,01	68,67	Kalsinasyon atıklarından sonra sallantılı masa ile zenginleştirilmiştir.
[32]	Sallantılı masa	Emet kolemanit 17,28	-1	-	22,31	42,38	Jig ile zenginleştirmeden sonra sallantılı masa ile zenginleştirilmiştir
[22]	Yüzdürme batırma	Kestelek -0,2 20,70	-	-	36	55	Ağır sıvılar ile yüzdürme batırma
[22]	Yüzdürme batırma	Bigadiç -3+0,2 29,50	-	-	44	80	Ağır sıvılar ile yüzdürme batırma



### 4.3. Manyetik Zenginleştirme

Manyetik ayırma cevher içerisinde bulunan veya sonradan karışmış olan demirli safsızlıkların temizlenmesi ve demir cevherinin zenginleştirilmesi için kullanılan yöntemdir. Genellikle kuvvetli manyetik özellik gösteren minerallerin zenginleştirilmesinde kullanılır. Kil içerisinde  $Fe_2O_3$  içerikli biyotit bulunmaktadır. Biyotitin manyetik çekilebilirlik değeri 5,88-8,90 olduğundan orta derecede manyetik, bor mineralinin çekilebilirlik değeri olmadığından diamagnetiktir. Bu aradaki manyetik çekilebilirlik farkından dolayı bu yöntem kullanılabilir. Manyetik kuvvetler, yerçekimi, merkezkaç, sürtünme ve atalet kuvvetleri, parçacıklar arası itici veya çekici elektrostatik kuvvetler manyetik zenginleştirmede etkili olan parametrelerdir [18,22].

Özdağ vd. (1988), Kestelek yıkama tesisinden çıkan -3 mm boyutlu atıklardan yüksek alan şiddetli sürekli manyetik ayırıcı kullanarak %94,8  $B_2O_3$  verimiyle %41,76  $B_2O_3$  tenörlü bir konsantre ve %5,2  $B_2O_3$  kayıpla %3,02 tenörlü bir artık elde etmişlerdir [28].

Bilici vd. (2000), yaptıkları çalışmalarda; Kestelek bor işletmesi -3 mm ara ürüne doğrudan kuru manyetik ayırma işlemi uygulanması sonucunda %41,27  $B_2O_3$  içerikli bir ürün toplam %77,47  $B_2O_3$  verimi ile elde edilirken, buna karşılık dağıtma sonucu elde edilen ön konsantrenin manyetik ayırma deneyi sonrasında %44,02  $B_2O_3$  içerikli bir ürün toplam %84,62 verimle edilebileceğini vurgulamışlardır [23].

### 4.4. Isıl İşlem ile Zenginleştirme

Bor cevheri ısıl işleme tabi tutulduğunda kristal suyunu kaybederek şişme özelliği gösterip zayıf bir yapıya dönüşür ve kırılabilir yapı kazanır. Gang minerali kilden eleme yöntemi ile kolayca ayrılmaktadır. Bu eleme işlemi esnasında bor minerali, kil mineralinin tane boyutundan daha ince bir boyuta indiğinden elek altından alınır. Bu yöntemde etkili parametreler, sıcaklık aralığı, ısıl işlem süresi ve tane boyutudur [12,18, 22, 27, 34].

Isıl işlem ile zenginleştirme konusunda yapılan çalışmalar Çizelge 4.4'de verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Isıl işlem ile yapılan zenginleştirme çalışmaları

Çalışma	Yapılan Deneş	Numune, tane boyutu (mm) ve tenörü (% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Çalışılan tane boyutu (mm)	Konsantre tane boyutu (mm)	Süresi (dak.)	°C	Konsantre tenörü (% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	% Verim
[65]	Kalsinasyon	Kolemanit 18,50	-3	-0,5	75	430	28,78	85,81
[22]	Dekrepitasyon	Kestelek kolemanit -0,2	-0,2	-0,105	15	450	36,2	69,2
[22]	Dekrepitasyon	Bigadiç kolemanit 3+0,2 Kolemanit	-3	-0,105	15	500	59,8	80,4
[25]	Dekrepitasyon	Emet kolemanit %30,86	-25,0	-1	15	500	52	95
[30]	Dekrepitasyon	Bigadiç kolemanit	-4,7	-0,417	20	500	60	86
[31]	Kalsinasyon	Bigadiç kolemanit	-25,0+3,0	-9,51		700-430	54	75-80
[31]	Kalsinasyon	Bigadiç kolemanit	-25,0+3,0	-9,51		680-330	56,63	75-80
[54]	Kalsinasyon	Emet Hisarcık kolemanit -3 % 26,63	-3,15+2,00	-3,15+2,00	15	500	55,68	84,23

#### 4.5. Elektrostatik Ayırma ile Zenginleştirme

Mineraller arasındaki elektrik iletkenlik farkına dayanan, elektrostatik kuvvetlerin aktif olduğu bu yöntemde, minerallerin yüksek gerilim altındaki statik bir elektrik yükü kazanma, bu yükü bir süre kaybetmeme veya tamamen ileterek kaybetme özelliklerinden yararlanılmaktadır [12, 18, 22].

Kayataz vd. (1986), Bigadiç kolemanit atıklarına elektrostatik ayırma sonucu, -3,36+1 mm boyut aralığında miktarca %52,69 oranında %38,21 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü bir konsantrenin %58,64 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> verimiyle kazanılabileceğini, -1+0,21 mm boyut aralığında miktarca %31,50 oranında %37,42 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü bir konsantrenin %37,64 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> verimiyle kazanılabileceğini saptamışlardır [63].

Kayataz vd. (1997), Kestelek -0,2 mm şlam havuzu numunesinden dağıtma sonrası elde edilen ön konsantrenin elektrostatik ayırma sonucu, miktarca %34,8 oranında %40,7 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü bir konsantrenin %68,2 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> verimiyle kazanılabileceğini belirtmişlerdir. Bigadiç -3 mm +0,2 mm boyutlu artık numunesinden dağıtma sonucu elde edilen ön konsantrenin elektrostatik ayırma sonucu, miktarca %45,9 oranında %39,6 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü bir konsantrenin %59,9 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> verimiyle kazanılabileceğini saptamışlardır [22].

#### 4.6. Ses Ötesi Dalgalar ile Zenginleştirme

Ses ötesi dalgalar ilahtan mühendislik endüstrisine kadar yaygın olarak kullanılmaktadır. Cevher hazırlama teknolojisinde geniş bir şekilde kullanıldığı birçok çalışmada belirtilmiştir. Bor zenginleştirilmesinde ses ötesi dalgaların cevher yüzeylerine yapışan kil taneciklerinin uzaklaştırılmasında kullanımı hem laboratuvar hemde pilot ölçekte araştırılmaktadır [27,72].

Sönmez vd. (1997), ses ötesi dalgaların kolemanit atıklarının zenginleştirilmesinde kullanılması için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Suda iki saat bekletmenin ardından yapılan şlam (-0,045 mm) atma deneyleri sonucunda %32,34 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü bir ön konsantre kazanılmıştır. Suda bekletme+mekanik damıtma deneylerinin sonucunda konsantrenin tenörü %35,04 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e, %89 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> randımanla yükselmiştir. Arsenik tenöründe azalma olmamış, demir tenöründe belirgin bir azalma olmuştur. Ultrasonik banyo deneyleri sonucunda %35 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü konsantre, beslemeye göre %84,70 verimle kazanılmıştır. Arsenik ve demir içeriklerinin belirlenmesi için optimum şartlarda tekrarlanan deneyler sonucunda %36 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü konsantre, beslemeye göre %83,79 verimle elde edilmiştir. Beslemedeki As miktarı %0,16'dan %0,13'e, Fe miktarı %0,73'den %0,58'e düşmüştür [27].

#### 4.7. Flotasyon Yöntemi İle Zenginleştirme

Cevher zenginleştirmenin amacı, değerli mineralleri birbirinden ve gang minerallerinden uygun zenginleştirme yöntemleriyle endüstrinin isteği doğrultusunda ekonomik olarak ayırmaktır. Bu yöntemlerden biride flotasyondur.

Flotasyon kelimesinin sözlük anlamı yüzdürmedir. Flotasyon boyut küçültme ile yeterince serbest hale getirilmiş (serbestleşme oranı %75-80) mineral taneciklerinden (genel olarak -250+20 mikron arası) ve sudan oluşan sistem içerisine (pülp) hava verilerek oluşturulan uygun çaplı hava kabarcıklarının yüzeyine, arzu edilen mineral taneciklerinin (seçimli olarak) yapışması ile oluşan kabarcık-tanecik agregasının pülp yüzeyine çıkması neticesinde yapılan zenginleştirme işlemidir. Kısacası, minerallerin seçimli olarak sulu ortamda hava kabarcıkları yardımıyla ayrılmasını sağlayan bir cevher zenginleştirme yöntemidir. Genellikle düşük tenörlü ve ince boyutta serbestleşen, diğer yöntemlerle ekonomik olarak zenginleştirilemeyen minerallerin zenginleştirilmesinde kullanılır [52].

Flotasyon tekniğinin başarısı, uygun çalışma parametrelerinin yanında kullanılan aletlerin tipine de bağlıdır. Flotasyon prosesinin gerçekleştirildiği bu aletlere flotasyon makineleri denir. Günümüzde kullanılan flotasyon aletleri; mekanik karıştırılmalı (flotasyon hücreleri (selüller), hava ile karıştırılmalı (flotasyon kolonları, Jameson flotasyon hücresi (kolonu)) olmak üzere iki farklı grup altında toplanabilir. Tane boyutuna bağlı olarak flotasyon verimleri açısından bu aletlerin birbirlerine göre üstünlükleri vardır. Bu da, farklı çalışma mekanizmalarına sahip olmalarından kaynaklanmaktadır [52].

Bu aletlerde aranan temel özellikler şunlardır;

1. Pülp içindeki katı tanelerin homojen karışımını sağlayıp süspansiyon halinde tutabilmek.
2. Pülp içine yeterli havayı verebilmek.

Minerallerin fiziko-kimyasal yüzey ve ara yüzey özellikleri farklılıklarından yararlanan bu proses, oldukça karmaşık (kompleks) bir işlemdir. Diğer zenginleştirme yöntemleri katı taneciklerin kütesinden ve hacminden yararlanırken flotasyon katının yüzey ve ara yüzey özelliklerinden yararlanır. Flotasyon işleminin başarısı çeşitli fiziksel, kimyasal ve mekanik faktörlere bağlıdır ve bu faktörler arası etkileşim kaçınılmazdır [52].

Bor minerallerinin zenginleştirilmesinde, yıkama ve dağıtma yöntemi uygulanmakta ve kilin bor minerallerinden uzaklaştırılması ile iri boyutlarda bir ön konsantre elde edilmektedir.

Bu işlem sonucunda yaklaşık %20'lere varan  $B_2O_3$  içerikli ince taneler hiçbir işleme tabi tutulmadan artık barajlarında biriktirilmektedir. İnce boyutlu bu artıkların verimli bir şekilde kazanılması ancak flotasyon yöntemi ile mümkündür [33,34].

Kolemanit flotasyon yöntemi ile başarılı olarak zenginleştirilen tek bor mineralidir. Literatürde genelde %20-30  $B_2O_3$  içeren kolemanit 20 mesh altına öğütülüp siklon ile şlamı uzaklaştırıldıktan sonra flotasyon yapılabileceği, şlam atma gerekebileceği ve %20-40 pülp yoğunluğunda sülfanat tipi kolektörlerle yüzdürülebileceği, eğer karbonat problemi varsa nişasta, dextrin, quebracho ilave ederek bastırılabilceği belirtilmiştir [6].

Çeşitli toplayıcı reaktiflerle yapılan çalışmalar sonucu boraks cevherinin %35'ten daha fazla verimle yüzmediği saptanmıştır. Bu denli düşük verimlerin elde edilmesinin nedenlerini araştırmak amacıyla mikroflotasyon yöntemi ile saf boraks minerali, saf katyonik ve anyonik reaktifler kullanarak bir dizi sistematik deneyler yapılmıştır. Ayrıca Kırka boraks yatağından alınan saf kil numuneleri ile de aynı şartlarda flotasyon deneyleri yapılarak kilin boraks flotasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen bu veriler ışığında boraks cevherinin yüzme yeteneğini engelleyen faktörler belirlenerek bazı öneriler sunulmuştur.

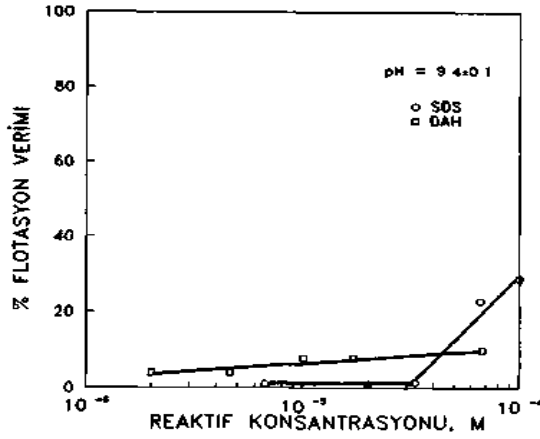
Reaktiflerin belirli bir süre içinde mineral yüzeyine adsorplanabilme yeteneği mineralin ve reaktifin özelliklerine bağlıdır. Kimyasal adsorpsiyon sistemlerinde, adsorpsiyon kısa sürelerde gerçekleşirken, fiziksel adsorpsiyon sergileyen sistemlerde ise daha uzun kıvam sürelerine ihtiyaç vardır.

Boraks gibi tuz tipi minerallerde flotasyonu kontrol eden önemli parametrelerden birisi de pH'dır. Bor mineralleri pH 9,3 civarında tampon çözelti oluşturduklarından genellikle bu değer altındaki pH'larda flotasyon pH'nın sabit tutulması güçleşmektedir.

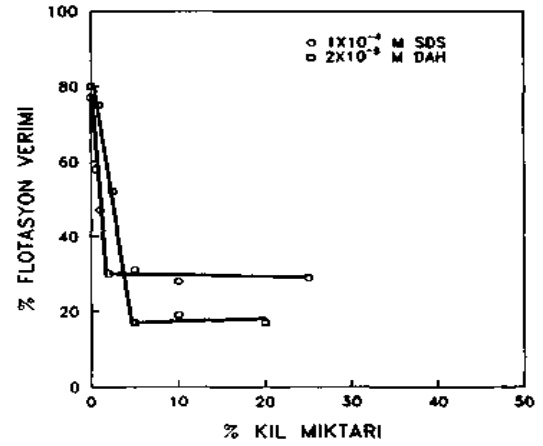
Boraks cevheri ile daha önce yapılmış çalışmalarda boraksın anyonik kollektörlerle çok düşük verimlerde yüzdüğü saptanmıştır. Bu olayın mekanizmasını açıklamak üzere saf boraks ve saf anyonik ve katyonik reaktiflerle bir dizi sistematik mikroflotasyon deneyleri yapılmıştır. Saf boraks doygun çözeltilerde her iki reaktifle de yüzmesine karşın, sisteme %5 oranında kil ilavesinin bile flotasyon verimini büyük ölçüde azalttığı bulunmuştur. Kilin etki mekanizması şlam kaplanması şeklinde açıklanmaktadır.

Kaytaç, Çelik ve Hançer (1993), Kırka boraks cevherinin anyonik reaktiflerle %35'ten fazla verimle yüzdürülemediği killerin varlığının şlam etkisi gösterebileceği varsayımından hareket ederek beyaz ve gri killerle doygun çözeltilerde Şekil 4.1'de sunulan flotasyon deneyleri yapılmıştır. Görüldüğü gibi hem SDS hem de DAH doğal pH'da killeri yüzdürememektedir.

Şekil 4.2’de ise yine doygun çözeltilerde kilin % miktarına bağlı olarak SDS ve DAH için saf boraks flotasyon verim değişimlerini sergilemektedir. Şekil 4.2’de açıkça görüleceği üzere kilin %1 oranında varlığı bile flotasyonu düşürmeye, %10’luk bir kil oranı ise flotasyon verimlerini %20’lere düşürmeye yetmektedir [33].



Şekil 4.1. Doygun çözeltilerde gri kilin reaktif konsantrasyonu göre verim değişimi [33]



Şekil 4.2. Gri kil ilavesinin boraksın yüzeybilirliğine etkisi [33]

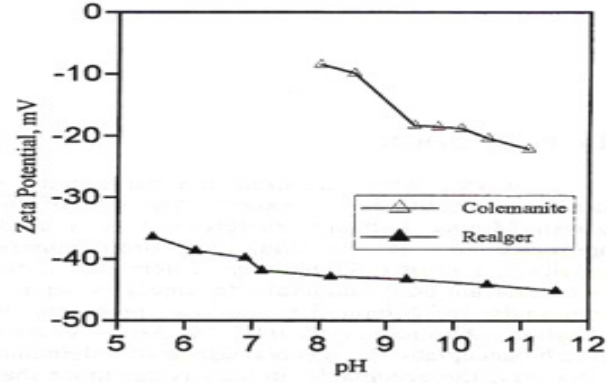
Koca ve Savaş (2003), kolemanit ve realgarı üzerinde elektrokinetik çalışmalar yapmışlardır. R825, R840, sodyum oleat, KAX, KEX kullanılarak 10 dk karıştırma süresinden sonra yaptıkları bu çalışmada sıfır yük noktasını tespit edememişlerdir [Şekil 4.3] [66].

Çelik, Hançer ve Miller (2002), bor minerallerinin flotasyon kimyasını incelemişlerdir. Saf kolemanit, üleksit, inderit ve tünelit kullanarak yaptıkları zeta potansiyel çalışmalarında kolemanitin sıfır yük noktasını pH 10,5’de saptamışlardır [67].

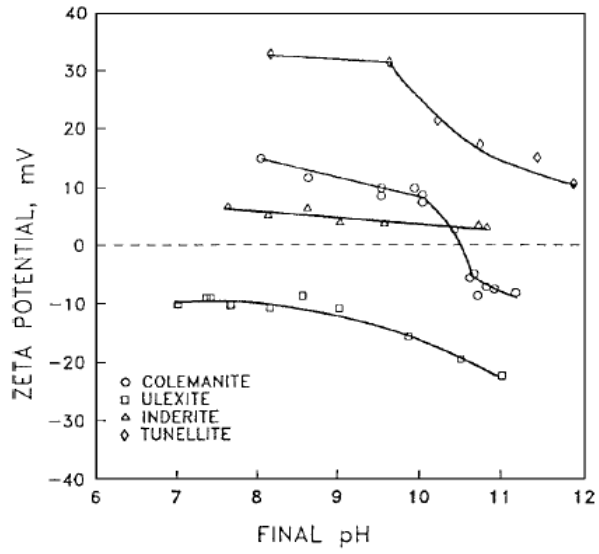
Uçar ve Yargan (2009), kolemanit ve kilin pH’a göre zeta potansiyel ölçümlerini yapmışlardır (Şekil 4.5). Buna göre kolemanit yaklaşık pH 10,2’de sıfır yük noktasına sahipken kil ölçüm yapılan bütün pH’larda negatif yüzey yükü göstermiştir. Kolemanitin sahip olduğu sıfır yük noktası Çelik vd (Şekil 4.4) (pH 10,5) ve Yarar (pH 10,7) tarafından yapılan ölçümlerle uyuyurken Koca ve Savaş (1998) tarafından yapılan ölçümlerle (sıfır yük noktası yok) uyuşmamaktadır (Şekil 4.3).

Kolemanite değişik oranlarda kil eklenmesiyle elde edilen numunenin zeta potansiyelinin ölçülmesi sonucunda kil miktarının kolemanitin zeta potansiyelini negatif olarak

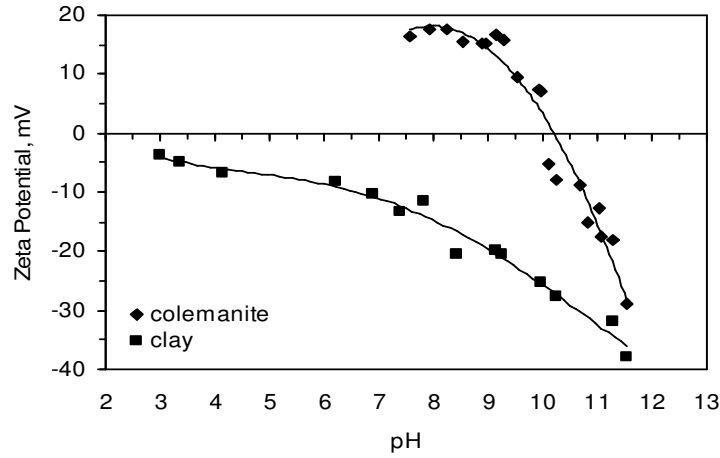
arttırdığı şekil 4.6'dan görülmektedir [56]. Bu da doğal pH'da negatif olan kil minerallerinin pozitif yüklü olan kolemanit minerallerinin yüzeyini kapladığını göstermektedir [35, 39, 67].



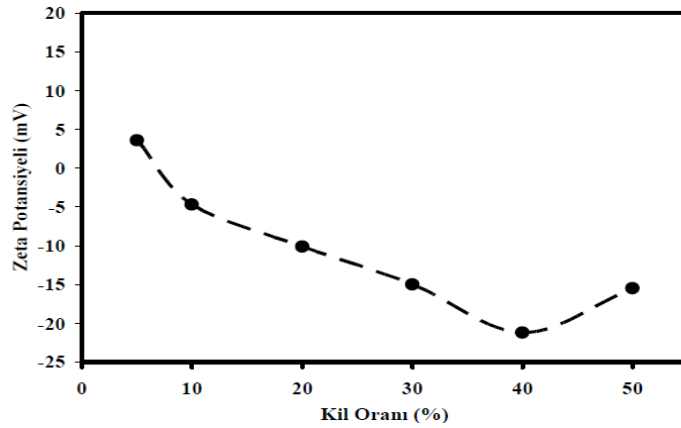
Şekil 4.3. Kolemanit ve realgerin değişik pH'larda zeta potansiyeli [66]



Şekil 4.4. Kolemanit, üleksit, inderit ve tünellitin değişik pH'larda zeta potansiyeli [69]



Şekil 4.5. Kolemanit ve kilin değişik pH'larda zeta potansiyeli [39]

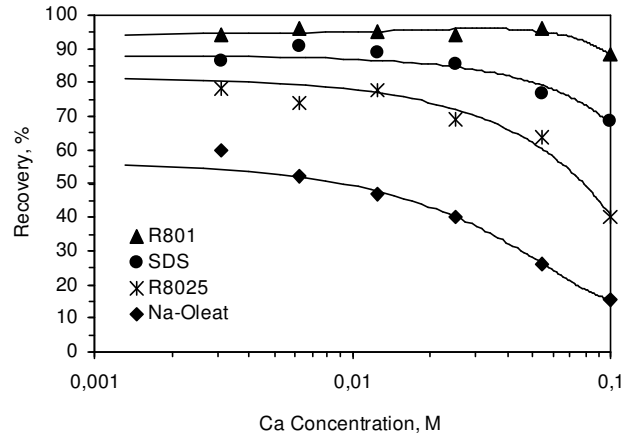


Şekil 4.6. Kilin değişik oranlarda kolemanite eklenmesi ile ortam pH'larında zeta potansiyeli [56]

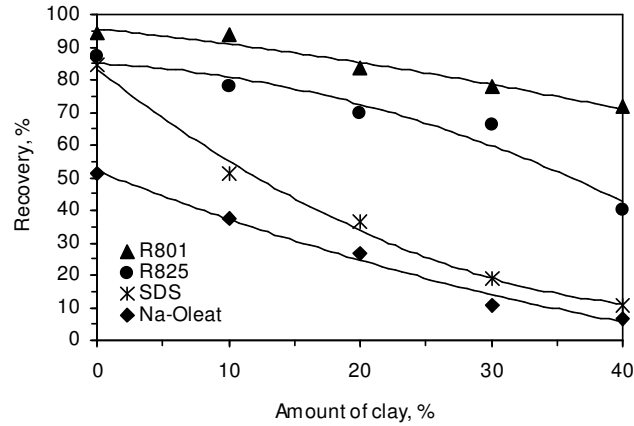
Uçar ve Yargan (2009)'ın kolemanitin çözünmesi ile ortama girebilecek  $Ca^{2+}$  iyonlarının ve gang minerali olan kilin kolemanitin yüzeyliliğine etkisini belirleyebilmek için ortama farklı miktarlarda  $CaCl_2$  ve kil ilave edilerek yaptıkları mikroflotasyon deneylerinin sonuçları Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'da verilmiştir. Belirli reaktif dozajında (1500 g/l)  $Ca^{2+}$  iyonu konsantrasyonunun flotasyon verimine etkisi belirli bir değere kadar R801 ve SDS için olumlu, daha sonrada azalma yönünde olmuştur. R825 ve Na-oleat için bunu söylemek mümkün değildir,  $Ca^{2+}$  iyonları bu reaktiflerin yüzdürebilirliğini olumsuz olarak etkilemektedir. Çelik vd. (2002), SDS ile yapılan kolemanit flotasyon çalışmalarında çok değerlikli iyonların ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ) flotasyon verimini arttırdığını tespit ederek SDS için belirtilen görüşü kuvvetlendirmişlerdir. Bu iyonların kolemaniti canlandırdığını belirtmişlerdir.



Ortama eklenen kil miktarına göre flotasyon verimini gösteren Şekil 4.8 incelendiğinde; R801 ve R825 reaktifleri kolemanitin yüzebilirliği üzerinde %10 kil katkısına kadar bir değişiklik oluşturmaz iken, SDS ve Na-oleat da ise kolemanitin yüzebilirliğinin oldukça azaldığı görülmektedir. Burada pozitif yüklü kolemanit yüzeyinin negatif yüklü kil şlamı ile kaplanması nedeni ile reaktiflerin yüzeye adsorplanması engellenmekte ve verim düşmektedir.



Şekil 4.7. Ca<sup>2+</sup> iyon konsantrasyonunun flotasyon verimine etkisi (Reaktif:1500 g/t) [39]



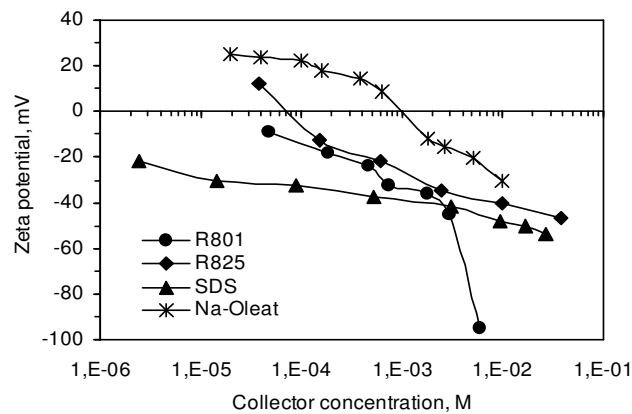
Şekil 4.8. Eklenen kil miktarına göre flotasyon verimi (Reaktif: 1500 g/t) [39]

Seçimli kolemanit flotasyonunda kullanılabilecek toplayıcıların (R801, R825, SDS ve Na-oleat) kolemanit ve kilin elektrokinetik davranışlarına etkisini belirlemek için yapılan deney sonuçları Şekil 4.9 ve 4.10'da verilmiştir. Sonuçlara göre; anyonik olan bu reaktiflerin pozitif yüklü kolemanitin yüzeyine daha iyi adsorblandıkları için yüzey yükünü kile oranla daha fazla arttırmışlardır. Bu reaktiflerden R801'in hem kolemanit hem de kilin  $\zeta$  potansiyeline etkisinin

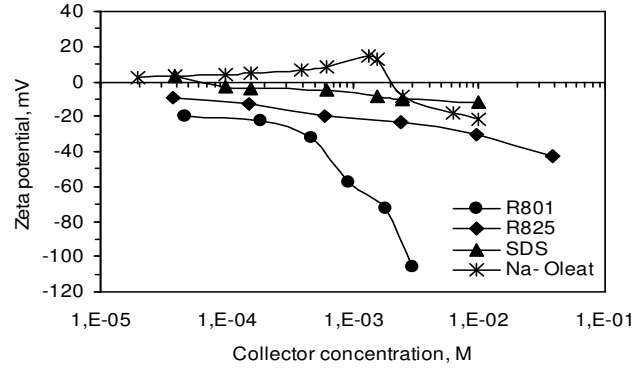
daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre R801 reaktifinin flotasyonda daha etkili olacağı açıktır. Anyonik reaktiflerin özellikle R801'in kil yüzeyine adsorplanması kil numunesinin büyük oranlarda içerdiği montmorillonit yüzeyinde bulunan bazı pozitif noktalar ve aynı zamanda yüzeyine adsorplanan  $Ca^{2+}$  iyonları sağlamış olabilir. Majzik and Tombácz (2007), montmorillonit yüzeyinde  $Na^+/Ca^{2+}$  yer değişimi olduğunu ve  $Ca^{2+}$  iyonlarının organik bileşiklere bağlandığını bildirmiştir [39].

Toplayıcı olarak kullanılan SDS, Na-oleat, R801 ve R825 reaktiflerinden en fazla yüzey yük artışını R801 vermiştir. Bu reaktifler ile yapılan kontak açısı ( $\theta$ ) ölçümlerine göre de kolemanit yüzeyinde en büyük kontak açısını ( $73^\circ$ ) de R801'in verdiği tespit edilmiştir [39]. Koca ve Savaş (2004) tarafından değişik reaktifler kullanılarak dynamic captive bubble metoduna göre Emet kolemaniti ile temas açısı ölçümleri yapılmıştır. R825 reaktifi ile yaptıkları kontak açısı ölçümleri ile reaktifsiz saf sudaki ölçümler arasında önemli bir fark elde edememişlerdir. Bu nedenle daha önceden yaptıkları çalışmalarına (Koca vd. 2003) dayanarak bu reaktifin kolemanit yüzeyine adsorbe olmadığını bildirmişlerdir. Ancak yapılan bu çalışma ile R825'in kolemanit yüzeyine az da olsa adsorplandığını göstermektedir. R840 ve Na-oleat ( $10^{-2}$  M) ile yaptıkları çalışmalarda temas açısını  $45^\circ$  olarak ölçtükleri için bu reaktiflerin kimyasal olarak adsorplandığını belirtmişlerdir [68].

Kolemanit yüzeyine R801'den sonra en çok adsorplanan ikinci reaktif SDS ve daha sonrada R825 ve Na-oleat gelmektedir [39].



**Şekil 4.9.** Reaktiflerin kolemanitin zeta potansiyelinde etkisi [39]



**Şekil 4.10.** Reaktiflerin kilin zeta potansiyelinde etkisi [39].

Mikroflotasyon çalışmaları sonucunda da bu flotasyon reaktiflerinden yüzdürebilirliği en fazla olan reaktifin R801 olduğu,  $Ca^{2+}$  iyonunun yüzebilirliğe olumlu, ortamda kolemanit miktarına göre %10'dan fazla kil bulunması durumunda olumsuz etki yarattığı belirlenmiştir [39].

Kolemanit atıkları ve bor minerallerinde yapılan flotasyon çalışmaları Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.6.'da verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Kolemanit atıklarında yapılan flotasyon çalışmaları

Çalışma	Çalışılan numune	Flotasyon tane boyutu (mm)	Yapılan deney	Koşulandırma ve flt. süresi (dak.)	Toplayıcı cinsi ve/ miktarı (g/t)	Bastırıcı cinsi ve/ miktarı (g/t)	Köpürtücü cinsi ve miktarı (g/t)	pH	%K	BeslemeTenörü %B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Verim
[39]	Emet kolemanit	-0,150+0,038	Flotasyon hücresi (2lt.,1200±50 d/d)	2+5/3,5	R801/2500	Nişasta/800	-	8,83	25	36,52	46,23	99,36
[40]	Emet kolemanit	-0,150+0,038	Jameson flotasyon hücresi	2+5	R-801/3500	Nişasta /800	MIBC	-	2,5	36,52	46,63	99,47
[60]	Kestelek kolemanit	0,074 şlam uzaklaştırılmış	Flotasyon hücresi (1200 d/d)	5/3	R801/600, R825/600, HF698/600,	Dekstrin/80		10	15	32/(aşındırma yıkama ve eleme sonucu)	44,5	86,1
[37]	Emet kolemanit	-0,147+0,053	Flotasyon Hücresi (2,2 lt.)	Kond. yok.	AP825,G.yağı/1600	-	-	9,3	20	36	45,7	88,4
[63]	Bigadiç kolemanit	-0,210+0,038	Flotasyon Hücresi	-	R801+R825/1750	-	-	10	-	32.5	42,19	62,2
[35]	Bigadiç kolemanit	-0,42+0,010	Flotasyon hücresi (1,8 lt.)	-	G.yağı, R825 (naftenik asit) (emülsiyon)/500	Naftenik asit/500	Hoechst Flotanol G (MIBC+Alkol karışımı)	9	16,5	41,3	45 47	72 93
[22]	Kestelek kolemanit	-0,297+0,074	Flotasyon hücresi	5/3,5	R801/400, R825/400, F698/75, Ke1365/120	Dekstrin/80, Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /150	FD14	10,3	-	31,9	43,8	66,7
[22]	Bigadiç kolemanit	-0,297+0,074	Flotasyon hücresi	5/3	R801/300, R825/300, F698/85	Dekstrin/50, Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /200	FD14	10,3	-	34,6	41,4	75,2

**Çizelge 4.6.** Bor minerallerinde yapılan flotasyon çalışmaları

Çalışma	Çalışılan numune	Flotasyon tane boyutu (mm)	Yapılan deney	Koşullandırma ve flt. süresi (dak.)	Toplayıcı cinsi ve miktarı (g/t)	Bastırıcı /can. cinsi ve/ miktarı (g/t)	Köpürtücü cinsi ve miktarı (g/t)	pH	% K	Besleme tenörü % B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Konsantr tenörü % B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Verim
[57]	Emet kolemanit	-0,210+0,020	Flotasyon hücresi (1350 d/d)	Kon. yok/5	AP825, CA927/100	-	AF70	9,3	20	-	35	80
[58]	Hisarcık kolemanit	-0,210+0,020	Flotasyon hücresi (1350 d/d)	10	R-825 150	-	AF70/100	9,3	20	% 40	48	90
[61]	Emet kolemanit	0,150+0,075	Mikroflot.	1	R-825, R- 840, Na-Oleat, Armac-T, KAX, KEX	-	MIBC	9	3	-	33.93	96.99
[62]	Emet kolemanit	-0,210+0,020	Flotasyon hücresi (1200 d/d)	Kon. yok	CA927/1500 R-825/ 2000	-	Aerofrother70/100	9,3	25	-	40 44	-
[35]	Hidroborasit	-	-	-	Nekal Gaz yağı	Nişasta	-	-	-	-	18,2 34	81 92,2
[59]	Tinkal	-0,3+0,038	Flotasyon hücresi	Kon. yok/5	DAH SDS R825R801/ 2000	Nişasta, tannik asit	AERO801	9,3	-	34,80	34,85/35,93	75,05/80,70
[33]	Boraks	-0,250 +0,100	Mikroflot.	10/10.	SDS DAH	-	-	9,3	-	-	-	65
[29]	Boraks	-0,2 (şlam atılmış)	Flotasyon hücresi (1500 d/d)	10/10	R825/1000	Nişasta/ 2000- /BaCl <sub>2</sub> /200	Çamyacağı/200	9,5-10	45	28,85	34,80	36,47
[55]	Bigadiç kolemanit tülü ocağı ara ürün	-0,3+0,075	Flotasyon hücresi (1 lt., 1400 d/d)	-	R825/2500 (kaba flt.) R825/800 (Temiz. Flt.)	Dekstirin/238, BaCl <sub>2</sub> /375 (kaba flt.) Dekstirin/100, BaCl <sub>2</sub> /200 (Temiz. flt.)	MIBC+çamyacağı (Kaba + temiz flt.)	10	40	25,37	42	62,57

## 5. KOLON FLOTASYONU

Kolon Flotasyonu, Boutin ve Tremblay tarafından 1960'larda patentlenmiştir. Kolonların ilk tanımları ve test çalışmaları Boutin ve Wheeler (1967) tarafından yapılmıştır. Bu kolonlara "Kanada Kolonları" adıda verilmektedir [43,45,52]. İlk olarak, demir cevherinin zenginleştirilmesinde 30,5 ve 20 cm çapında kolonlar kullanmışlardır [45,46,52].

Flotasyon kolonu, mekanik karıştırması bulunmayan ve hava ile karıştırmalı alet sınıfına giren bir flotasyon aletidir. İnce taneli minerallerin flotasyonunda klasik hücrelere göre daha iyi performans gösteren alettir. 20 yıllık bir geliştirme ve iyileştirme çalışmalarından sonra 1980 yıllarında madencilik sektörüne girmiştir. Göstermiş olduğu performanstan dolayı ince taneli minerallerin flotasyonunda tercih edilir alet olmuştur [42,46,52].

Tasarımı ve çalışma esasları flotasyon hücrelerinden farklı olan flotasyon kolonlarının cevher zenginleştirme endüstrisinde kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Flotasyon kolonlarında mekanik karıştırıcının bulunmaması flotasyon hücrelerine göre en önemli farkı oluşturur. Bu nedenle flotasyon kolonlarında daha az türbülans olayı vardır (sadece hava kabarcıklarının yarattığı mikro türbülans) [41,52].

Flotasyon kolonları, klasik ve modifiye olmak üzere iki tiptir. Klasik flotasyon kolonları özellikle, flotasyon hücreleriyle zenginleştirilmesi sorunlu olan, ince taneli cevherlerin seçimli ve verimli bir şekilde zenginleştirilmesinde kullanılır. Çünkü klasik flotasyon kolonlarında flotasyon hücrelerine göre daha küçük boyutlu hava kabarcıkları üretilebilir. Bu, hidrofob tane-kabarcık çarpışma olasılığını arttırır [52]. Ayrıca, bu kolonlarda yıkama suyunun kullanılması gang taneciklerinin konsantrine içine sürüklenmesini azaltır [45,52].

Modifiye flotasyon kolonları ise iri boyutta serbestleşen (1 veya 2 mm altında) cevherleri yüksek bir verimle zenginleştirmek amacıyla geliştirilmiş olup laboratuvar ve pilot ölçekte başarılı sonuçlar alınmıştır. Bu boyutta serbestleşen cevherler ince öğütülmeksizin flotasyon hücrelerinde zenginleştirildiklerinde verim düşük olmaktadır. Bunun nedeni flotasyon hücrelerinde mekanik karıştırıcının yarattığı yüksek türbülanstır. Bu, tane-kabarcık sisteminin parçalanmasına neden olmaktadır. Buna karşın modifiye kolonlarda, hücrelere göre daha düşük türbülansın varlığı ve klasik flotasyon kolonlarına göre köpük zonunun bulunmayışı iri tanelerin yüzdürülmesini sağlamaktadır [52].

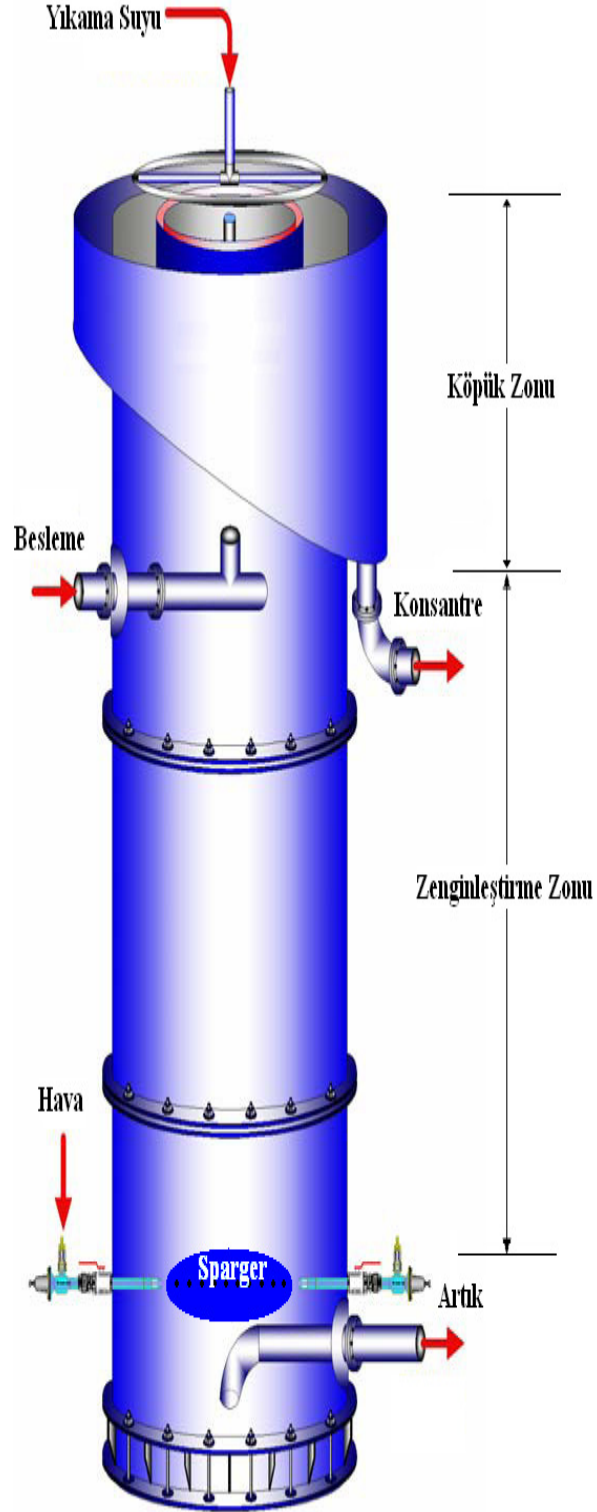
Modifiye kolonların klasik kolonlardan farkı:

- Biasın (artık debisi - besleme debisi) negatif olması,

- Genellikle yıkama suyunun kullanılmaması ve
- Köpük zonu bulunmayışıdır [49,50,52].

**Çizelge 5.1.** Flotasyon kolonları ile mekanik flotasyon hücreleri arasındaki farklılıklar [42]

	Flotasyon Kolonları	Mekanik Flotasyon Hücreleri
Tane-kabarcık bağlanma mekanizması	Çarpışma	Çarpışma ve hava çökmesi
Pülp-Hava akışları	Zıt akımlı	Besleme sistemine göre değişir
Köpük tabakası	Kalın ve yıkama suyu ile yıkanır	Kalın değildir ve genellikle yıkama suyu kullanılmaz
Hava veriş şekli	Kabarcık üretici ile (sparger)	Karıştırıcının dönüşü ile atmosferden yada dışarıdan fan ile
Hava hızı	0,8-3 cm/sn	0,3-1 cm/sn
Hacimsel hava miktarı	%15-30	%15
Kabarcık çapı	Daha küçük ve daha kolay kontrol edilebilir	Kontrolü zordur
Bias	Genellikle pozitif biasla çalışır	Negatif biasla çalışır
Kalma süresi	Tane-kabarcık agregasının kopması genellikle köpük pülp ara yüzeyinde meydana gelir ve taneler kolona yeni beslenmiş taneler ile aynı kalma süresine sahip olurlar	Tane-kabarcık agregasının kopması ile taneler takip eden hücreler kadar kalma süresine sahip olurlar
Köpük yüzey alanı-hücre hacmi oranı	Düşük	Yüksek



Şekil 5.1. Kolon flotasyonu



## 5.1 Flotasyon Kolonunu Oluşturan Zonların Tanıtımı

- Zenginleştirme zonu
- Köpük (yıkama) zonu

Yukarıda belirtilen her zonun kendine has özellikleri vardır. Kolonda flotasyon prosesinin başarısı için bu özellikleri tanımada yararlar vardır.

### 5.1.1 Zenginleştirme zonu

Kolonun alt kısmını oluşturan ve flotasyonun mikro olaylarının (karşılaşma, çarpışma, yapışma, kopmama ve parçacık kabarcık yükselmesi) gerçekleştiği zondur. Bu bölgede hava tutunum yüzdesi %10 ila %20 arasındadır [52].

Pülp beslemesi bu zonun hemen üstünden yapılır. Besleme içindeki mineral parçacıkları pülp ile inerken kolon dibinden hava üreticisi tarafından üretilen ve yükselen hava kabarcıkları ile karşılaşır. Flotasyonun fiziksel mikro olayları hidrofob parçacıklar ile kabarcıklar arasında gerçekleştikten sonra kabarcık-parçacık agregaları köpük zonuna doğru yükselirler. Çoğunlukta olan hidrofil taneler bu zonun alt kısmındaki artık çıkışından kolonu terk ederler. Besleme genellikle kolon yüksekliğinin yaklaşık 2/3'sinden yapılır [43,52].

İnce ve normal boyutlu taneler genelde zenginleştirme zonuna besleme pompası ile beslenir. Artık çıkışını kolaylaştırmak için ikinci bir pompa da ilave edilebilir. Hava, bu zonun tabanında bulunan hava üreticisine direkt verilir. Hava üreteçleri genelde poroz paslanmaz çelikten yapılır. Kauçuk veya filtre bezinden imal edilmiş hava üreteçleri de kullanılabilir. Hava üreteçleri düşey veya yatay monte edilebilir. Köpürtücü ilave edilen sulu ortama 2 mm veya daha küçük çaplı hava kabarcığı üreticisi tercih edilir. Bunun nedeni kabarcık-tane arasındaki çarpışma olasılığının daha yüksek olmasını sağlamaktır [52].

#### **5.1.1.1. Zenginleştirme zonunda flotasyonun temel mikro olayları**

Zenginleştirme zonu, hidrofob taneler ile kabarcık arasında flotasyonun fizikokimyasal mikro olaylarının gerçekleştiği bölgedir. Bu bölgede gravite etkisiyle tabana düşen hidrofob bir tanenin, yükselen bir hava kabarcığına yapışabilmesi ve kazanımı, flotasyonun mikro olaylarının ardı ardına gerçekleşmesine bağlıdır. Bu olaylar sırasıyla:

- Hidrofob tanenin yolunun hava kabarcığı tarafından kesilmesi (tanenin kabarcıkla karşılaşması)
- Karşılaştığı tane için gerekli serbest yüzeye sahip kabarcık ile tanenin çarpışması
- Taneciğin kabarcığa yapışması

- Tane kabarcık agregasının parçalama kuvvetlerine karşı yeterli direnci göstermesi (stabilite)
- Agreganın yükselmesi (yüzmesi)'dir.

#### **5.1.1.2. Tane-kabarcık karşılaşması**

Yüzebilir bir parçacığın geri kazanımının gerçekleşebilmesi için flotasyonun temel olayının birinci koşulu tane ile kabarcığın karşılaşmasıdır. Bu, yükselen kabarcık ile inen tanecığın aynı yol üzerinde bulunması demektir. Aksi halde bu olayın devamındaki tanecik kabarcık çarpışması gerçekleşmez. Tane-kabarcık karşılaşması bir olasılıktır. H kalınlığındaki zenginleştirme zonunun bir elemanı (kesit veya dilim) olarak, bu eleman içindeki hidrofob tanenin izleyeceği yolları düşünerek tane-kabarcık karşılaşma olasılığı hesaplanabilir.

Bir eleman içinde bir parçacığın izleyeceği iki yol vardır. Birinci yol hava kabarcığının izleyeceği yükselme yolu, ikinci yol ise kabarcık arasından geçen yoldur. Eğer tanecik birinci yol içerisinde ise kabarcık-tanecik karşılaşması mümkündür. Aksi halde tane H kalınlığındaki elemanı geçerse bu eleman içinde flotasyonun mikro olayları gerçekleşmez.

Eğer kabarcıkların küresel ve homojen olarak zenginleştirme zonunda dağıldıklarını düşünürsek bu durumda bir eleman içinde karşılaşma olasılığı ( $P_k$ ) şu bağıntı yoluyla hesaplanabilir:

$$P_k = 1,209 \sqrt{\epsilon_g^2}$$

$$\epsilon_g = \text{hava tutunum yüzdesi (hold-up)}$$

Bağıntıya göre  $P_k$  sadece hava tutunum yüzdesinin bir fonksiyonudur. Kabarcıkların çapına ve kolon şekline bağlı değildir [42].

#### **5.1.1.3. Tane - kabarcık çarpışması**

Yüzebilir bir tanenin bir kabarcık tarafından yakalanma olayının ikinci bir fazı tane ile kabarcık arasındaki çarpışmadır. Bunun için kabarcık ve tane aynı yol üzerinde bulunmalı ve tane kabarcığa yaklaşmalı sonuçta kabarcığın serbest yüzeyine çarpmalıdır. Bu olayın gerçekleşmesi için tane yükselen kabarcık önünde bulunan su perdesini (direnci ortama göre yeteri kadar yüksek) aşabilecek ağırlığa sahip olmalıdır (yeterli hız). Eğer tane oldukça küçük ve ağırlığı az ise (hızı düşük) bu, tanenin çarpışma yolunu saptırabilir ve çarpışma olayı gerçekleşmez.

Bu etapta karşılaşma yolu üzerinde bulunan parçacık ve kabarcık, onlar arasındaki sıvı miktarını azaltıncaya kadar yaklaşırlar (hidrodinamik olay nedeniyle) sonuçta ince bir film tabakası oluşur. Bu olayın gerçekleştiği zamana “çarpışma zamanı“ denir. Bu; tanenin kütlesine, suyun yüzey gerilimine bağlıdır. Bu olaydan sonra gelecek flotasyon etabı yapışmadır.

Birçok araştırmacı bu olayı teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Bunlardan çoğu çarpışma olayının gerçekleşmesinin hava kabarcığının ve tanenin çapına bağlı olduğunu belirtmişler, çarpışma olasılığını ( $P_c$ ) hesaplayan modeller geliştirmişlerdir [42].

$$P_c = (d_p / d_b)^n, \quad d_p: \text{Tane çapı}, \quad d_b: \text{Kabarcık çapı}$$

#### **5.1.1.4. Taneciğin kabarcığa yapışması**

Yüzebilir tane ile hava kabarcığı arasındaki çarpışma olayından sonra gelen faz taneciğin kabarcığa yapışmasıdır. Çarpışma devresinde su filminin (tane-kabarcık arasında) incelmelerinden sonra tanecik-kabarcık arasındaki su yatağının bozulmasıyla yapışma olayı başlar, çok kısa bir zaman (indüksiyon zamanı) içinde duyarlı bir temas açısının yerleşmesiyle bu olay sona erer.

Bir parçacığın bir kabarcığa yapışması bu parçacığın hidrofob olmasına bağlıdır. Hidrofob özelliği de parçacık yüzeyinin doğasına ve onun yüzeyine absorbe olan kolektör yoğunluğuna bağlıdır. İri taneleri hidrofob yapmak için ince tanelere göre daha küçük olmasıdır. Nedeni ise özgül yüzey alanlarının ince tanelere göre daha küçük olmasıdır. İri parçacıkların yapışması olayı ince taneler gibi kolay olur. İri tanelerin flotasyonunda güçlük stabiliteden kaynaklanır. Stabilitayı sağlamak için ilave kolektör kullanmak gerekir.

Yeteri kadar hidrofob olan tanenin hava kabarcığına yapışması mümkündür. Pratikte, eğer temas açısı 30 derece veya daha büyük olacak şekilde tanenin hidrofobluğu sağlanırsa yapışma olayı daima gerçekleşir. Yapışma olayı tanenin çapına bağlı değildir [42].

#### **5.1.1.5. Bir tane-kabarcık agregasının parçalanmaması**

Stabilite, flotasyon prosesinde kritik etaplardan biridir. Bir agreganın stabilitesi, hidrodinamik sistemin ve tanenin ağırlığı nedeniyle oluşan ayırma kuvvetleri tarafından bozulur.

Yapışmanın devamlılığı, ayırma kuvvetlerinin etkisi temas yüzeyi (tane-kabarcık) etrafında oluşan yapışma kuvvetleri tarafından etkisiz hale getirilmesine bağlıdır. Yani yapışma kuvvetleri ayırma kuvvetlerinden daha büyük olmalıdır.

Yapılan araştırmalara göre stabilite, tanenin hidrofobluğu ile artar, tanenin ve kabarcığın çapının artmasıyla azalır. Bir agreganın stabilizesine en çok ortamın türbülansı etki eder. Kolonda hava kabarcıkları tarafından yaratılan mikro türbülans değeri, flotasyon hücrelerindeki türbülansa göre daha küçüktür. Bundan dolayı flotasyon kolonu iri tanelerin flotasyonu için idealdir.

Dinamik sistemde agreganın (parçacık-kabarcık) stabilitesi, parçalama kuvvetlerine göre yapışma kuvvetinin büyük olmasına bağlıdır. Kısacası  $F_A > F_D$  olmalıdır.

Yapışma kuvveti ( $F_A$ ) Merris tarafından geliştirilen aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$F_A = 2 \cdot \Pi \cdot r_0 \cdot \delta \cdot \sin \theta$$

$r_0$ : Tane kabarcık arasındaki temas yüzeyinin yarıçapı

$\delta$ : Suyun yüzey gerilimi

$\theta$ : Temas açısı

$F_A$ : Yapışma kuvveti

Bağlantıya göre bir agreganın stabilitesi temas açısının artmasıyla artmaktadır. Ayrıca temas yüzeyinin yarıçapının artmasıyla da yapışma kuvveti artmaktadır. Bir taneye etki eden kuvvetler (parçalama kuvvetleri) tanenin kütlesi ( $m$ ) ile onun ivmesinin ( $a_p$ ) çarpımına eşittir (Newton'un 2.yasası). Bu durumda  $F_D$ :

$$F_D = m \cdot a_p$$

Bağıntıdaki  $a_p$  tanenin çarpışmadan önceki hızı ile çarpışma sonrasındaki (agreganın hızı) hızı farkının çarpışma zamanına bölümüdür [42].

### **Bir agreganın stabilitesi;**

- Tanenin çapına
- Tanenin kütlesine
- Tanenin hidrofobitesine
- Hava kabarcığı çapına
- Köpürtücü miktarına
- Türbülansına bağlıdır [42].

### 5.1.2. Köpük (Yıkama) zonu

Köpük zonu hava kabarcıklarından oluşan bir yataktır. %60-70 hava tutunumu olan ve konsantrenin yıkama suyu ilavesiyle yıkandığı bir bölgedir. Bu zonun yüksekliği arttıkça konsantrenin tenörü artar ve verim düşer.

Bu zon zenginleştirme zonundan iki farklı özellikten dolayı ayrılır:

- Yıkama suyu ilavesiyle kabarcıkların birleşmesi
- Hava tutunumu yüzdesinin artışı (%60-70): Eğer hava tutunum %74'den büyük olursa kabarcıkların birleşimi kaçınılmazdır.

Köpük zonunun toplam verim üzerine etkisi negatiftir. Bu etki %30-50 arasındadır. Bu, zenginleştirme zonu veriminin %30-50 arasında düşmesidir. İnce tanelerin zenginleştirilmesinde köpük zonuna gereksinim duyulur. Nedeni ise ince gang tanelerinin hidrolik sürüklenme ile konsantre içine sürüklenmesini engellemek içindir. İri tanelerin zenginleştirilmesinde gereksinim duyulmaz. Köpük zonunun varlığı bias değerine bağlıdır. Bias değeri negatif ise köpük zonu yoktur [52].

Köpük bölgesi kalınlığı endüstriyel uygulamalarda 1,5 m kadar olabilmektedir. Köpük, kolonun konsantre taşma seviyesinin üzerinden veya içinden su ile yıkanarak kararlı ve kalın olması sağlamaktadır. Köpükten aşağı doğru süzülen yıkama suyu ile yükselen köpüğün zıt akımlı olarak karşılaşması, köpük içerisine su ile taşınmış gang minerallerinin toplama bölgesine geri dönebilmesini, böylece yüksek tenörlü konsantre elde edilebilmesini sağlamaktadır. Bu iki bölge dışında toplama ve köpük bölgeleri arasında bulunan, köpükten geri düşen taneler ve tane yüklenmiş yükselen kabarcıkların bulunduğu ara bölge de bulunmaktadır [43].

### 5.2. Flotasyon Kolonu Tasarımı

Endüstriyel boyutta uzunlukları yaklaşık 9-15 m arasında değişen ve çapı en fazla 2-2,5 m olan (bafflsız; kolonu içten düşey olarak bölümlere ayıran kanatçıkları bulunmayan kolonlarda) flotasyon kolonları, genel olarak silindirik yapıdadır. İmalatında paslanmaz sac kullanılır [52]. Flotasyon kolonları temel olarak iki bölgeye ayrılır. Bu bölgeler kolonun alt kısmını oluşturan ve tane ile hava kabarcıkları arasında mikro olayların gerçekleştirdiği zenginleştirme bölgesi, bu bölgenin üst kısmında bulunan ve hava kabarcıklarının yoğun olduğu köpük bölgesidir. Köpük bölgesi kalınlığı endüstriyel uygulamalarda 1,5 m kadar olabilmektedir. Besleme genellikle kolon yüksekliğinin 2/3'de yapılır. Genel olarak kolon çapı

ile boyu arasında oran 1/10 olup, kolonun boyu, zenginleştirilecek tane boyutuna göre değişir. İri tanelerin flotasyonu için zenginleştirme zonunun boyu daha kısa, ince taneler için ise yeterli uzunlukta olmalıdır [43,52].

### 5.3. Flotasyon Kolonunun Avantajları

- 1) Üretilen konsantrenin kalitesi (tenörü) yüksektir.
- 2) Konsantre birim maliyeti düşüktür (düşük enerji tüketimi).
- 3) Flotasyon kolonları mekanik flotasyon hücrelerinden daha az üniteye ihtiyaç duymalarından dolayı kontrolü kolay ve otomatik kontrole daha yakındır.
- 4) Tesislerde daha az alana ihtiyaç vardır ve flotasyon devreleri mekanik flotasyon devreleri kadar kompleks değildir.
- 5) Yapımı ve dizaynı kolaydır.
- 6) Yatırım ve bakım masrafları düşüktür.
- 7) Zenginleştirilecek mineral tane boyut ağırlığı oldukça geniştir (10  $\mu\text{m}$  - 2mm, büyük boyut modifiye flotasyon kolonu için) [44,52].

### 5.4. Flotasyon Kolonunun Dezavantajları

- 1) Tesislerde yüksekliğin sorun olması.
- 2) Yıkama suyu maliyeti.
- 3) Kabarcık üretici bakımı.
- 4) Minerallerin flotasyon kolonunda kalma süresinin fazla olması nedeniyle hızlı oksidasyon özelliği olan cevherler için uygun olmamasıdır [44,52].

### 5.5. Kolon Flotasyonunda Zenginleştirmeye ve Performansı Etkileyen Parametreler

5.5.1. Hold-up (Hacimsel hava miktarı ,  $\epsilon_g$ )

5.5.2. Akış Hızları

- Yüzeysel Artık Hızı (Superficial tailing rate-  $J_a$ )
- Yüzeysel Besleme Hızı (Superficial feed rate-  $J_b$ )
- Yüzeysel Bias Hızı (Superficial bias rate-  $J_B$ )
- Yüzeysel Hava Hızı (Superficial air rate-  $J_h$ )
- Yüzeysel Yıkama Suyu Hızı (Superficial wash water rate-  $J_{ys}$ )

5.5.3. Taşıma Kapasitesi ( $C_a$ , Carrying rate)

5.5.4. Sabit Tasarım Parametreleri

5.5.5. Sistemin İçinde Değerleri Bağımsız Olarak Değiştirilemeyen Diğer Parametreler

### 5.5.6. İşletme Parametreleri

#### 5.5.1. Hold-up (Hacimsel hava miktarı- $\epsilon_g$ )

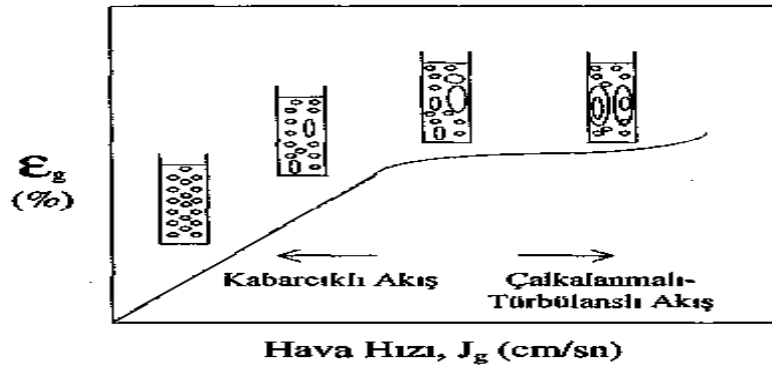
Flotasyon ortamında bulunan hava hacminin kolon hacmine oranına hava hold-up'ı denir.  $\epsilon_g$  sembolü ile gösterilir [52].

$$\epsilon_g = \frac{V_g}{V_c}, \quad V_g: \text{Hava hacmi}, V_c: \text{Kolonun hacmi}$$

Hacimsel hava miktarı, hava hızı, kabarcık çapı, pülp akış hızı, tane/kabarcık agregalarının yoğunluğu ile pülp yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir.

Tipik bir flotasyon kolonunun toplama bölgesinde hacimsel hava miktarı %5-30 arasındayken, köpük bölgesinde %80'e kadar çıkmaktadır. Şekil 5.2'de hava hızı ile kolondaki hacimsel hava miktarı arasındaki ilişki görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, hava hızı ile hacimsel hava miktarı arasında doğrusal ilişkinin bulunduğu bölümde homojen çaplı kabarcıkların aynı hızda yükseldiği kabarcıklı akış (bubbly flow) koşulu oluşmakta ve flotasyon kolonlarının da bu akış koşullarında çalışması istenmektedir. Hava hızında bunun ötesinde bir artış olduğunda hacimsel hava miktarı kararsız olmakta ve kabarcıkların birleşerek büyümeleri sonucu hızla yükseldikleri heterojen akış meydana gelmektedir. Bu akışa çalkalanmalı türbülanslı akış (churnturbulent flow) koşulu denir. Hava hızındaki artışın devam etmesi ile küçük çaplı kolonlarda (<10 cm) kabarcıklar kolon kesitini tamamen kaplamakta, bu akış koşuluna ise salyangoz akış (slug flow) koşulu adı verilmektedir [43,45,52].

Sabit hava hızı değerinde sisteme eklenen köpürtücü miktarının artması, kabarcık çapını küçülterek toplama bölgesindeki hacimsel hava miktarının yükselmesine neden olmaktadır [43].



Şekil 5.2. Hava hızı ile kolondaki hacimsel hava miktarı arasındaki ilişki [43]

### 5.5.2. Akış hızları

Birim kolon kesit alanındaki hacimsel akış hızlarıdır.

$$J_x = \frac{Q_x}{A_c} = \frac{cm^3 / sn}{cm^2} = \frac{cm}{sn}$$

(x; besleme, artık, bias ve yıkama suyu)

$J_x$ , akış hızı,  $Q_x$ , debi,  $A_c$ , ise kolon kesit alanıdır.

Bias hızı flotasyon kolonlarının en önemli özelliklerinden birisidir ve köpükten aşağı doğru süzülen net su akışı ya da buna denk olan artık ve besleme akışları arasındaki net su akış farkı olarak tanımlanmaktadır.

$$J_{bias} = J_{artık} - J_{besleme}$$

Optimum kesitsel bias hızı 0,1-0,2 cm/sn'dir. Klasik kolonlarda bias pozitifdir. Modifiye kolonlarda bias negatiftir ve köpük zonu yoktur. İnce tanelerin yüzdürülmesinde gang minerallerinin sürüklenmesini engellemek amacıyla bias değeri arttırılır. İri tanelerin flotasyonunda ise tam tersidir [52].

Negatif biasla çalıştırılan flotasyon kolonu uygulamaları da vardır ve özellikle iri tanelerin flotasyonunda başarılı sonuçlar elde edilmiştir [43,47].

Artık su içeriği akış hızının, besleme su içeriğinin akış hızından daha büyük olması sonucunda doğan fark, kolonun köpük bölgesinden verilen yıkama suyu ile fazlasıyla karşılanmaktadır. Böylece yıkama suyunun bir kısmı pozitif biası karşılayarak kolon içinden aşağı doğru akarken, diğer kısmı konsantre çıkışından alınmaktadır. Yıkama suyunun biası karşılayarak aşağı yönde akan kısmı köpüğü yıkayarak besleme suyu ile gang minerallerinin konsantreye kaçmasına engel olmaktadır [45].

Tanelerin toplama bölgesinde kalma süreleri artık akış hızına, tanelerin çökelme hızlarına ve toplama bölgesinin yüksekliğine bağlıdır. Tıkanma ve tanelerin çökelerek birikmemesi için artık akışı en az olacak şekilde ayarlanmalıdır. [43]

### 5.5.3. Taşıma kapasitesi ( $C_a$ )

Birim zamanda birim kesit alanında kolonda yüzen mineral ağırlığı olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle; kolondan kazanılan maksimum katı miktardır [48,49].

Taşıma kapasitesi;

$$C_a = 0,068 * d_{80} * pt$$



$d_{80}$ : Konsantrenin %80'nin geçtiği tane büyüklüğü ( $\mu\text{m}$ )

$\rho_t$ : Tane yoğunluğu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), eşitliği ile hesaplanır.

Kolon flotasyonu tasarımı amaçlandığında taşıma kapasitesi deneysel olarak belirlenir. Kolondan konsantre olarak alınacak maksimum katı hızına ulaşana kadar besleme katı içeriğinin artması ile yapılan bir seri deney ile belirlenmektedir [43,45].

#### **5.5.4 Sabit Tasarım Parametreleri**

##### **5.5.4.1. Kolon yüksekliği / Kolon çapı oranı**

Kolon flotasyonu kapasitesi kolon yüksekliği değişimi ile doğrudan ilişkilidir. Yükseklik/çap oranı ise 10:1'den az olmaması gerekmektedir. Kolon çapı değişimi, kabarcık çapını da etkilemektedir. Kolon çapı büyüdükçe, kabarcık çapı artmaktadır. Kolon çapının performansa etkisi konusunda yapılan çalışmalarda; kolon çapının büyümesinin akış koşulunun borulu akıştan (plug flow) mükemmel karışmalı akışa (perfect mixed flow) geçişine bağlı olarak verimde azalmaya neden olacağı, diğer bir ifadeyle kolon çapının büyümesi ile kolon performansının bozulduğunu göstermişlerdir. Literatürde bu çalışmaların tersine sonuçlarla da karşılaşılmaktadır. Yüzeysel besleme miktarı, köpük kalınlığı gibi işlemsel parametrelerin farklı değerlere sahip olması neden olarak gösterilmiştir [43, 45, 52].

##### **5.5.4.2. Zenginleştirme (Toplama) bölgesi yüksekliği**

Kolon flotasyonundaki temizleme ve köpük bölgesi yüksekliği performansı etkileyen iki önemli unsurdur [45,52]. Toplama bölgesi yüksekliği kapasiteyi, temizleme bölgesi yüksekliği ise seçimliliği etkilemektedir. Toplama bölgesi ile temizleme bölgesi yüksekliklerinin, deneysel çalışmalarla optimize edilmesi gerekmektedir. Genellikle kolon tabanından itibaren kolon yüksekliğinin 2/3'lik kısmı toplama bölgesi olarak belirlenir [43,45]. Toplama bölgesi yüksekliğinin artması kalma süresini (residence time) artırdığından verim artmakta, konsantre tenörü ise azalmaktadır [45,52].

İnce tanelerin flotasyonu için, daha uzun zenginleştirme bölgesine, iri tanelerin flotasyon kinetiği daha hızlı olduğundan daha kısa zenginleştirme bölgesine ihtiyaç vardır.

Toplama bölgesinde, yükseklik çap oranının artırılması, eksensel karışımın azalmasının bir sonucu olarak hidrofobik mineraller arasında toplama bölgesinde ayırmayı iyileştirilebilir [45].

### **5.5.4.3. Yüzeysel yıkama suyu dağıtıcı sistemi ve konumu**

Köpük bölgesinin mekaniği tam olarak çözümlenemediği için kuramsal çalışmalardan yola çıkılarak yüzeysel yıkama suyu dağıtım sistemi ve konumunu belirlemek mümkün olmamıştır ve bu durum her cevher için deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir [45].

### **5.5.4.4. Kabarcık üreticinin türü**

Kolon flotasyonunu mekanik hücrelerden ayıran en önemli özelliklerinden biri de havanın kolona kabarcık üretici ile verilmesidir. Kabarcık üretiminin amacı, orta ve yüksek yüzeysel hava miktarlarında küçük çaplı kabarcıklar elde etmektir. Kolon flotasyonunda kabarcık üreticileri iki ayrı tipte bulunmaktadır. Bunlar;

- İçsel Kabarcık Üreteçleri (Internal sparger)
- Dışsal Kabarcık Üreteçleri (External sparger)

Çeşitli kabarcık üreticileri ile yapılan çalışmalarda toplama bölgesinde ki hava miktarının kolon kesit alanı ile kabarcık üretici yüzey alanı arasındaki oranı aşağıdaki eşitlikte verilmektedir. Bu oranın artması durumunda toplama bölgesindeki hava tutunumunda azalma olacağını belirtmişlerdir [45].

Kolona yerleştirilen hava üreticilerinin çapı kolon çapından küçük olmalıdır ki yüzmeyen gang parçacıkları kolaylıkla atık çıkışına gidebilmelidir. Genelde kolon kesit alanı ( $A_c$ ) ile kabarcık üreticisi yüzey alanı ( $A_s$ ) arasındaki oran ( $R_s$ ) dikkate alınır [52].

$R_s: A_c/A_s \ll 1$  oranı 1 den çok çok küçük olmalıdır.

$R_s$ : Kolon kesit alanı / Hava üreticisi yüzey alanı

$R_s$  değeri arttıkça hava tutunum yüzdesi düşer.

Bu durum kabarcık-tane karşılaşma olasılığını düşürür. Kısacası ince taneler için  $R_s \ll 1$  ve iri taneler için  $R_s < 1$  olmalıdır. Hava tutunum yüzdesinin %8'in üzerinde olması durumunda iri tanelerin stabilitesi düşer sonuçta verim de düşer [52].

$$R_s = \frac{A_c}{A_s}, dk = C * (R_s * J_h)^{0.25}, (R_s < 1)$$

$J_h$ : Yüzeysel hava miktarı (cm/sn)

$d_k$ : Kabarcık çapı (mm)

$R_s, J_h$ : Kabarcık üretici birim alanındaki hava miktarı (cm/sn)

$C$ : Köpürtücü konsantrasyon sabiti

### 5.5.5. Sistemin içinde değerleri bağımsız olarak değiştirilemeyen diğer parametreler

#### 5.5.5.1 Kabarcık çapı ve dağılımı

Kolon flotasyonunda kabarcık çapı ve dağılımı performansı etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Kabarcık çapının büyümesi, hava tutunumu miktarını artırmakta bunun sonucunda kolon flotasyonu çalışma koşulları bozulmaktadır. Kolon flotasyonunun çalıştığı kabarcıklı akış rejiminde, kabarcığın 2 mm altında olduğu durumlarda en iyi sonuçlar elde edilmektedir. Kabarcık çapını kontrol etmek için yüzeysel hava miktarı, sıvı miktarı, katı oranı ve kabarcık üretici yüzey alanı üzerinde belirli düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. Buradan iki önemli sonuç ortaya çıkmaktadır. Kabarcıkların yüzey alan hızı (ya da taşıma kapasitesi- $C_a$ ),  $d_k$ 'nın artması ile artmayabilir, bir diğer sonuç ise; toplama hız sabiti  $J_h$  ile orantılı olup  $d_k$  ile ters orantılıdır, yani azalan  $d_k$  yüksek toplama hız sabitini verir. Bu noktada kabarcık yüzey alan hızı (Superficial bubble surface rate-  $S_k$ ) ortaya çıkar [45,52].

$$S_k = \frac{6 \cdot J_h}{d_k} = \frac{cm^2 / sn}{sn}$$

$J_h$ : Yüzeysel hava miktarı (cm/sn)

$d_k$ : Kabarcık çapı (mm)

Maksimum kabarcık yüzey alan hızında en iyi kabarcık boyutu  $0,8 < d_k < 1,5$  mm arasındadır. Kabarcık yüzey alan hızı taşıma kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir. Buna göre; aşağıdaki denklemden de görüldüğü gibi,  $C_{max}$  ile  $d_p$  arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır [45,52]. Sabit köpürtücü dozajında hava hızının artışı, kabarcık çapının artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle optimum tane toplama olasılığı, yani flotasyon hız sabitinin maksimum olduğu özgül bir hava hızı değerinin bulunduğu belirtilmiştir [41].

$$C_{r \max} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{d_p \cdot \rho_p \cdot J_h}{d_k}$$

$d_p$ : Tane çapı ( $\mu m$ ),  $\rho_p$ : Tane yoğunluğu ( $g/cm^3$ )

#### 5.5.5.2. Hava tutunumu

Kolon flotasyonunda en fazla söz edilen parametrelerden biri de hava miktarı olup, toplama bölgesinin hidrodinamik koşullarını belirlemede önemli bir etkidir. Hava miktarının etkisi temelde iki kavrama dayanır. Hava tutunumu ( $E_h$ ) ve yüzeysel hava miktarı ( $J_h$ )'dır. İkisinde birbiriyle doğrudan ilişkilidir. Hava tutunumu pülp ile dolu kolona hava verildiğinde meydana gelen değişim oranıdır, başka bir ifadeyle; flotasyon kolonunun herhangi bir

noktasında hacimsel olarak havanın kapladığı miktar olarak tanımlanmaktadır. Tipik bir flotasyon kolonunun toplama bölgesinde hava tutunumu %5-30 arasındayken, köpük bölgesinde %80'e kadar çıkmaktadır. Köpürtücü miktarının artması durumunda, yüzeysel hava miktarı ve kolondaki hava tutunumunda artmaktadır [45,52].

### 5.5.6. İşletme parametreleri

#### 5.5.6.1. Yüzeysel hava miktarı

Birim zamanda kolona verilen hava miktarının kolon kesit alanına oranı olarak tanımlanır. Yüzeysel hava miktarı farklı kesitlerdeki kolonların kıyaslanmasında kullanılan önemli bir parametredir. Flotasyon kolonlarında toplama bölgesinde yüzeysel hava miktarı ile kabarcık çapı arasında ki ilişki aşağıdaki eşitlikte verilmektedir [45,49,52].

$$J_h = \frac{Q_h}{A_c}, \quad d_k = C * J_h^{0,25}$$

$Q_h$ : Birim zamanda kolona verilen hava miktarı (cm<sup>3</sup>/sn)

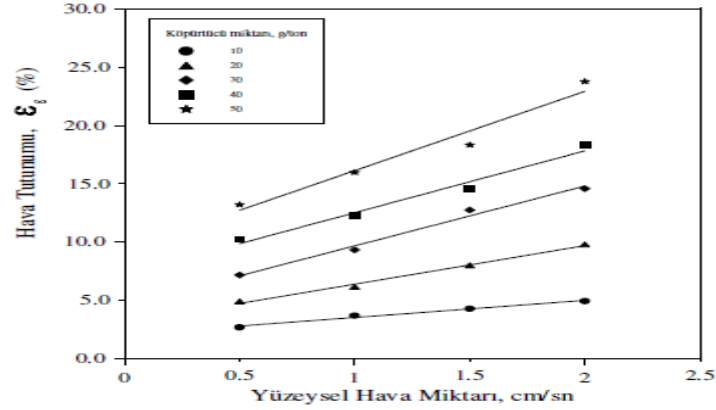
$d_k$ : Kabarcık çapı (mm)

$J_h$ : Yüzeysel hava miktarı (cm/sn)

$A_c$ : Kolon kesit alanı (cm<sup>2</sup>)

$C$ : Köpürtücü konsantrasyon sabiti

Yüzeysel hava miktarı ve kabarcık çapı flotasyon kolonundaki hava tutunumunu belirlemektedir. Kolondaki hava tutunumu, yüzeysel hava miktarının artışı ile artmaktadır. Şekil 5.3. ikili faz sisteminde (hava/su) hava tutunumunun, farklı yüzeysel hava miktarlarında köpürtücü miktarına bağlı olarak doğrusal arttığını göstermektedir [43]. Ancak belirli bir akış hızı değeri aşıldığında, kolondaki kabarcıklı akış koşulları bozularak büyük kabarcıkların meydana getirdiği türbülanslı akış koşulları oluşmaktadır. Bu durum kolon flotasyonunda arzu edilmez, daha çok kolonlarda kabarcıklı akış koşullarının oluşması istenmektedir. Yüzeysel hava miktarının performansa etkisi konusunda yapılan çalışmalar genellikle uyum içindedir. Artan yüzeysel hava miktarı ile verimin maksimum değer verecek şekilde arttığını ve belirli bir noktadan sonra ise azaldığını vurgulamaktadırlar. Tenör ise tam tersi bir eğilim göstermekte, verimin maksimum olduğu bölgede minimum değer almaktadır [45].



**Şekil 5.3.** İkili faz sisteminde hava tutunumunun, farklı yüzeysel hava miktarında köpürtücü miktarına bağlı değişimi

#### **5.5.6.2. Yüzeysel besleme miktarı**

Yüzeysel besleme miktarının kolon performansına etkisini çeşitli araştırmacılar incelemiş ve birbirinden farklı sonuçlar elde etmişlerdir. Fakat çok sayıda araştırmacı yüzeysel besleme miktarının azalması ile verimin arttığı konusunda birleşmektedirler. Diğer taraftan, kesin bir açıklama getirilememekle beraber yüzeysel besleme miktarının artışıyla verimin arttığını deneysel olarak gösteren çalışmalar da bulunmaktadır [45,52]. Besleme pülpinün katı içeriğindeki artışa bağlı olarak toplama bölgesindeki hacimsel hava miktarındaki artış, kabarcık çapının büyümesi ve köpüğün bozulmasına neden olabilmektedir [43].

#### **5.5.6.3. Yüzeysel yıkama suyu miktarı**

Kolon flotasyonunda yıkama suyu, konsantreye su ile taşınan gang minerallerinin pülp içinde geri yıkanarak tenörün yükseltilmesi için verilmektedir, yani yüzeysel yıkama suyu miktarı seçimli bir konsantre üretimi için önemli bir etkidir. Suyun fazla kullanılması kabarcık yükselme hızını düşüreceği ve buna bağlı olarak da hava tutunumunu artıracığı için kolon flotasyonu çalışma koşulları bozulacaktır [45].

$$J_w = \frac{Q_w}{A_c}$$

$Q_w$ : Birim zamanda kolona verilen yıkama suyu miktarı ( $\text{cm}^3/\text{sn}$ )

$A_c$ : Kolon kesit alanı ( $\text{cm}^2$ )

$J_w$ : Yüzeysel yıkama suyu miktarı ( $\text{cm}/\text{sn}$ )

Araştırmacıların yapmış olduğu bazı çalışmalarda yüzeysel yıkama suyu artışı ile tenör yükselirken verim düşmekte, bazı çalışmalarda ise tam tersi bir durum gözlenmektedir. Aşırı yüzeysel yıkama suyu, köpüğün seyrelmesine ve su tktiminin artmasına neden olmakta, aynı zamanda diğer aşamalarda da sorun yaratacağından istenmemektedir [43,45,52].

Kolon flotasyonunda yüzeysel yıkama suyu ilave noktası da yine zenginleştirme işleminde büyük önem kazanmaktadır. Yüzeysel yıkama suyu arttırılarak ürünün kalitesi iyileştirilirken, veriminde azaldığı gözlenmiştir. Kolonun temizleme bölgesinde, yüzeysel yıkama suyu verildiğinde verim değerleri değişmiştir ve yüzeysel yıkama suyu ilave noktasının arttırılması durumunda verimin arttığını, yüzeysel yıkama suyu ilave noktasının azaltılması ile de ürün tenörünün iyileştirildiği belirtilmiştir [45,52].

#### **5.5.6.4. Köpük kalınlığı**

Köpük kalınlığının artmasıyla konsantre tenörü önemli lde artarken, verimde önemli bir azalma görülmemektedir. Bunun nedeni, köpük kalınlığının artması ile köpükte kalma süresinin artmasına, köpükte yükselen su miktarının azalmasına bağlı olarak su ile taşınan gang minerallerinin konsantreye ulaşmadan geri yıkanma olasılığının daha fazla olmasıdır. Köpük içindeki mekanizmanın daha iyi anlaşılabilmesi için bu konuda daha fazla araştırma yapılmasında yarar görülmektedir [43,45].

#### **5.5.6.5. Pülp yoğunluğu**

Besleme pülp yoğunluğunun kolon flotasyonuna etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve pülp yoğunluğunun artışı ile verimin arttığı yapılan çalışmalar sonucunda açıklanmıştır. Diğer bir ifadeyle, pülpte katı oranının artışı, kabarcık yükselme hızını ters yönde etkileyerek viskoziteyi ve pülp yoğunluğunu arttırmaktadır. Kabarcığa yapışan katı miktarının artması, kabarcık yükselme hızını düşüreceğinden kolondaki hava tutunumu artacaktır. Bu artmanın nedeni, yüksek pülp yoğunluğunun toplama bölgesindeki engelli çökelme koşullarını düzenleyerek tanenin kalma süresinin artmasına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Bu durum kolondaki çalışma koşullarını bozacaktır. Kolon flotasyonunda, genellikle kullanılan en iyi katı oranı %10-20 arasındadır [43,45].

Flotasyon verimi ve konsantre tenörü açısından kolonun taşıma kapasitesine uygun besleme yapılması gerekmektedir. Aşırı katı beslemesi yapıldığında tanecikler için yeterli sayıda hava kabarcığı olmayacağından verim düşer, ortam viskoziteside artacağından gang tanelerinin konsantre içine sürüklenmesi kaçınılmaz olacaktır ve tenörde düşecektir [52].

#### **5.5.6.6. Köpürtücü miktarı**

Mekanik hücrelerde olduğu gibi toplayıcı miktarı ve türü, pH, kolon flotasyonunda da benzer etkiyi gösterir. Fakat köpürtücü derişimi kabarcık boyutunu değiştireceğinden performans üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğundan verimin maksimum olduğu bir köpürtücü derişimi kabul edilmektedir. Genellikle de köpürtücü miktarı ile kabarcık çapı arasında ters bir ilişkinin olduğu görülmektedir [30]. El-Shall vd. (2000), sodium alkyl ether sulfate (anyonik köpürtücü) ve polyglycols (noniyonik köpürtücü) iki farklı tip köpürtücü kullanarak kolonda, flotasyon veriminin köpürtücü tipine bağlı olduğunu ve özellikle anyonik köpürtücü kullanılması durumunda köpüğün kararlı olma yeteneğini belirlemişlerdir [45]. Sabit köpürtücü dozajında hava hızının artışı, kabarcık çapının artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle optimum tane toplama olasılığı, yani flotasyon hız sabitinin maksimum olduğu özgül bir hava hızı değerinin bulunduğu belirtilmiştir. Sabit hava hızı değerinde sisteme eklenen köpürtücü miktarının artması, kabarcık çapını küçülterek toplama bölgesindeki hacimsel hava miktarının yükselmesine neden olmaktadır [43].

#### **5.5.6.7. Su ile taşınım (entrainment)**

Su ile taşınım (entrainment); mekanik flotasyonda ve kolon flotasyonunda genellikle ihmal edilmektedir. Fakat tenör ve verim için önemli olan su ile taşınım, köpüğe bağlanmadan su ile köpüğe taşınan malzemeyi ifade etmektedir. Bu şekilde tanelerin köpük fazı içine taşınmaları yukarı yönde yükselen hava kabarcığının arkasında veya çevresinde sürüklenen, su ile ya da köpük ara yüzeyinde yukarı sürüklenen kabarcıklar tarafından itilen su ile taşınma şeklinde gerçekleşmektedir [45].

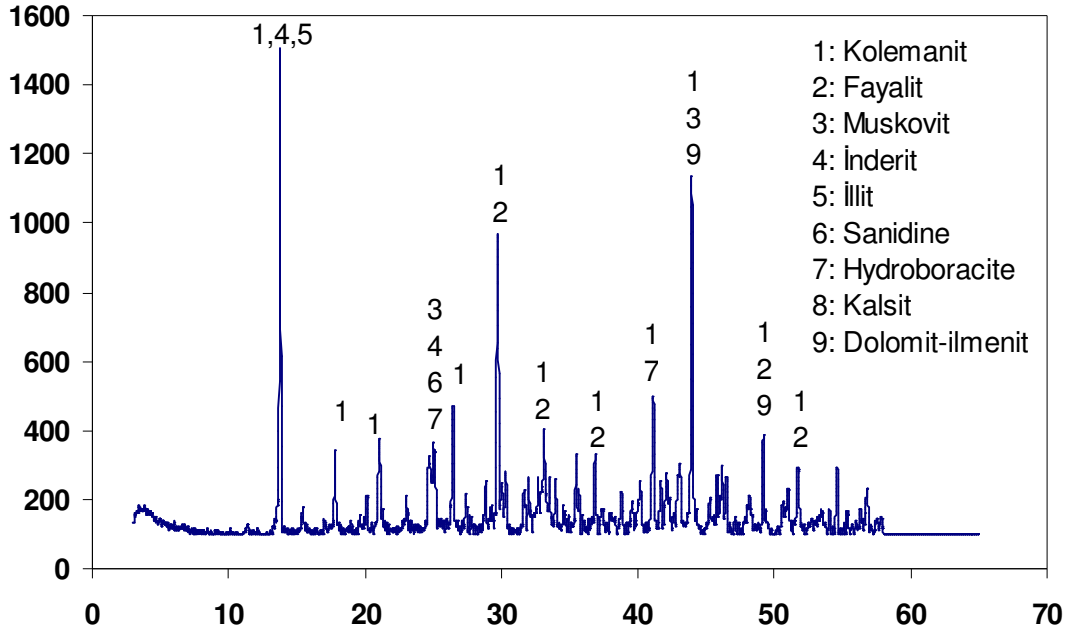
Kolon flotasyonunda kullanılan parametreler, tanelerin su ile taşınımına büyük ölçüde etki etmektedir. Yüzeysel yıkama suyu miktarı, ortalama tane büyüklüğü, yüzeysel hava miktarı ve köpürtücü miktarı değişimleri su ile taşınımı etkilemektedir. Yüzeysel yıkama suyu miktarının, yüzeysel hava miktarının ve köpürtücü miktarının artması ile su ile taşınım artmakta, ortalama tane büyüklüğünün artmasıyla azalmaktadır ve performans üzerine etkisi oldukça etkili olmaktadır [45].

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

### 6.1. Malzeme ve Yöntem

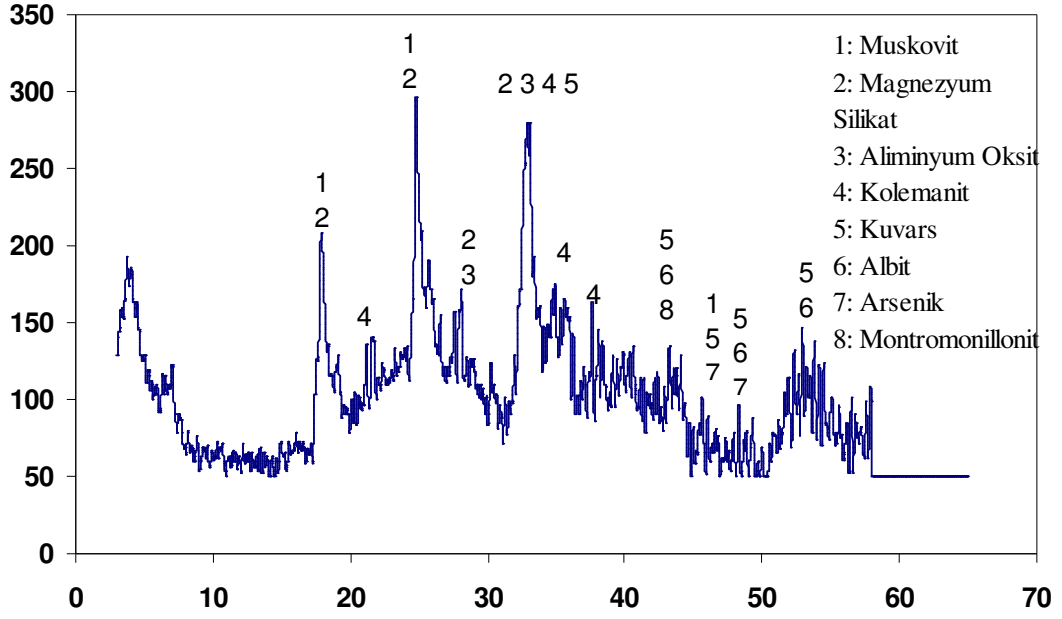
Deneylerde Kütahya-Emet bölgesinde faaliyet gösteren Emet Etibor Genel Müdürlüğü Espey konsantratör tesisi (Şekil 2.3) ince (-3 mm) atık barajından alınan numuneler kullanılmıştır. Numune konileme-dörtleme yöntemleri kullanılarak, kimyasal analiz, elek analizi, mineralojik analiz ve zenginleştirme deneyleri için temsili olarak ayrılmış ve torbalanmıştır.

Deneylerde kullanılan artık barajı numunesinin kimyasal analizi Emet Etibor Genel Müdürlüğünde ARL Brand 8680<sup>+</sup> model X-Ray cihazında yapılmış ve sonuçlar çizelge 6.1'de verilmiştir. Artık barajı (-0,150+0,038 mm), şlam (-0,038 mm), konsantre ve atık numunesinin mineralojik analizi Rigaku Miniflex Brand marka XRD cihazı ile Cu  $\alpha$  ( $\lambda=1,54 \text{ \AA}$ ) ışınması kullanılarak yapılmıştır (Şekil 6.1, 6.2, 7.2, 7.3). Kabarcık çapı ölçümleri fotoğraf çekildikten sonra Split-Desktop 2.0 programı ile ölçülmüştür (Ek çizelge 5-6).



Şekil 6.1. -0,150+0,038 mm boyutlu flotasyona giriş numunesinin XRD sonuçları

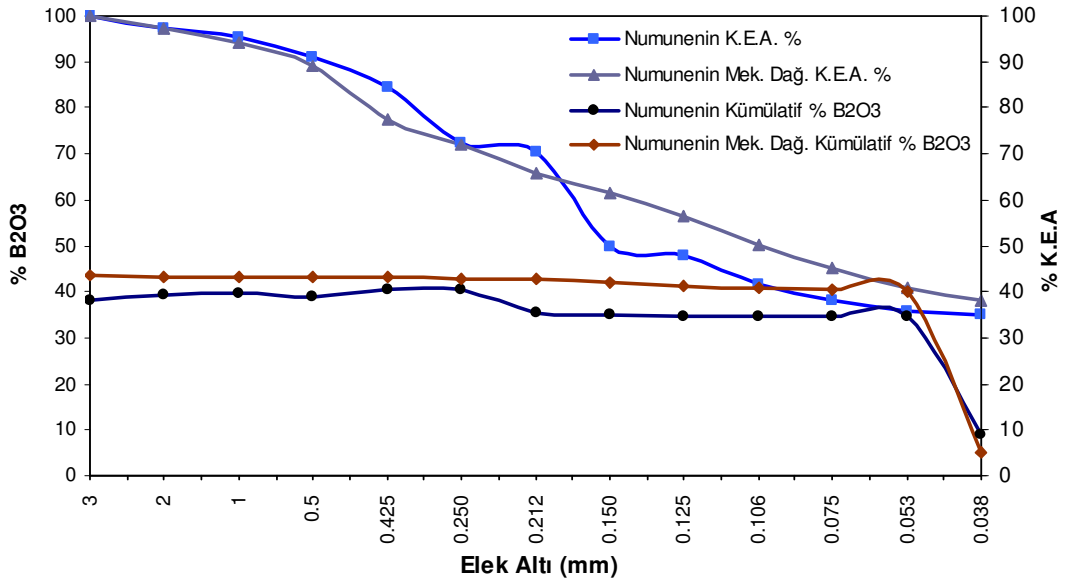




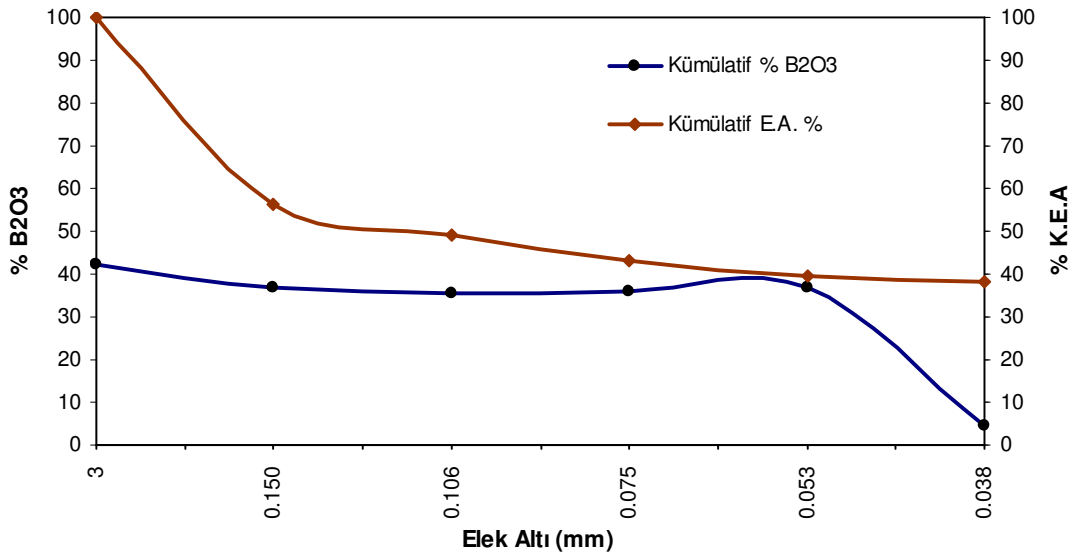
Şekil 6.2. -0,038 mm boyutlu (şlam) numunenin XRD sonuçları

Çizelge 6.1. Numunenin kimyasal analizi [39]

İçerik	Miktar (%)	İçerik	Miktar (%)
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,3	TiO <sub>2</sub>	0,33
CO <sub>2</sub>	11,3	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0146
F	0,842	MnO	0,0985
Na <sub>2</sub> O	0,191	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,85
MgO	6,29	NiO	0,0102
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,3	ZnO	0,0099
SiO <sub>2</sub>	25,7	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,448
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,128	Rb <sub>2</sub> O	0,0472
SO <sub>3</sub>	0,953	SrO	0,612
Cl	0,0196	Cs <sub>2</sub> O	0,113
K <sub>2</sub> O	2,38	BaO	0,0635
CaO	13	PbO	0,0052
		<b>Toplam</b>	100



**Şekil 6.3.** Numunenin mekanik+kimyasal dağıtma+yaş elek analizine göre tane boyutuna bağlı kümülatif B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve elek altı değişimi (Ek Çizelge 1, Ek Çizelge 2)



**Şekil 6.4.** Mekanik+kimyasal dağıtımdan sonra -0,150 mm'lik elek beslemesine göre numunenin tane boyutuna bağlı kümülatif B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve elek altı değişimi (Ek Çizelge 3)

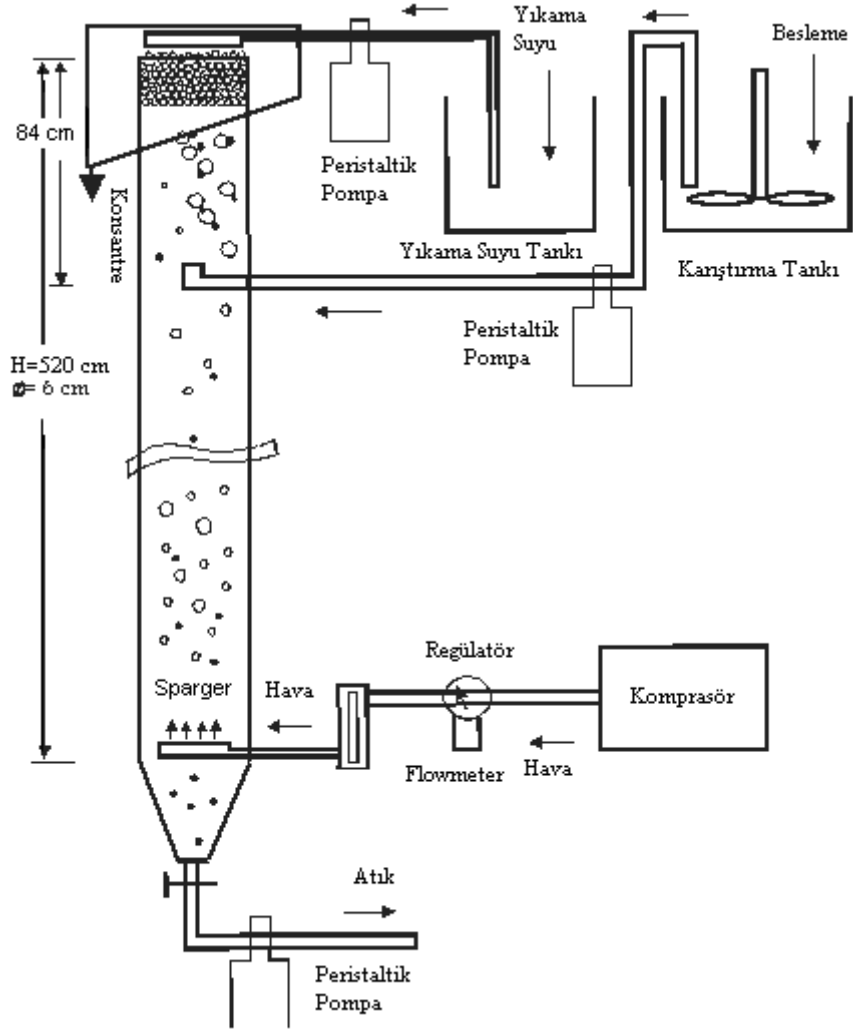
Tesis artığı numunelerden kili uzaklaştırmak için ilk önce Denver flotasyon hücresinde mekanik dağıtma işlemi uygulanmıştır. Mekanik karıştırma ve kimyasal dağıtma işlemlerinde daha önce yapılan çalışmalarda belirlenen optimum şartlar kullanılmıştır [39,40,56].

- Karıştırıcı: Dalga kırıcı Denver hücresi
- Karıştırıcı hacmi: 4 lt.
- Dağıtıcı:  $\text{Na}(\text{PO}_3)_6$  (Sodyum hegzametafosfat)
- Dağıtıcı Miktarı: 200 g/t

Bu koşullardaki kil dağıtma sonucunda yapılan elek analizinde (Ek çizelge 1-3) görüldüğü gibi, istenilen tenör olan %40  $\text{B}_2\text{O}_3$  değeri 0,15 mm boyutun üzerinde elde edilmiştir. Bu nedenle bu boyut üstü ayrılmıştır.

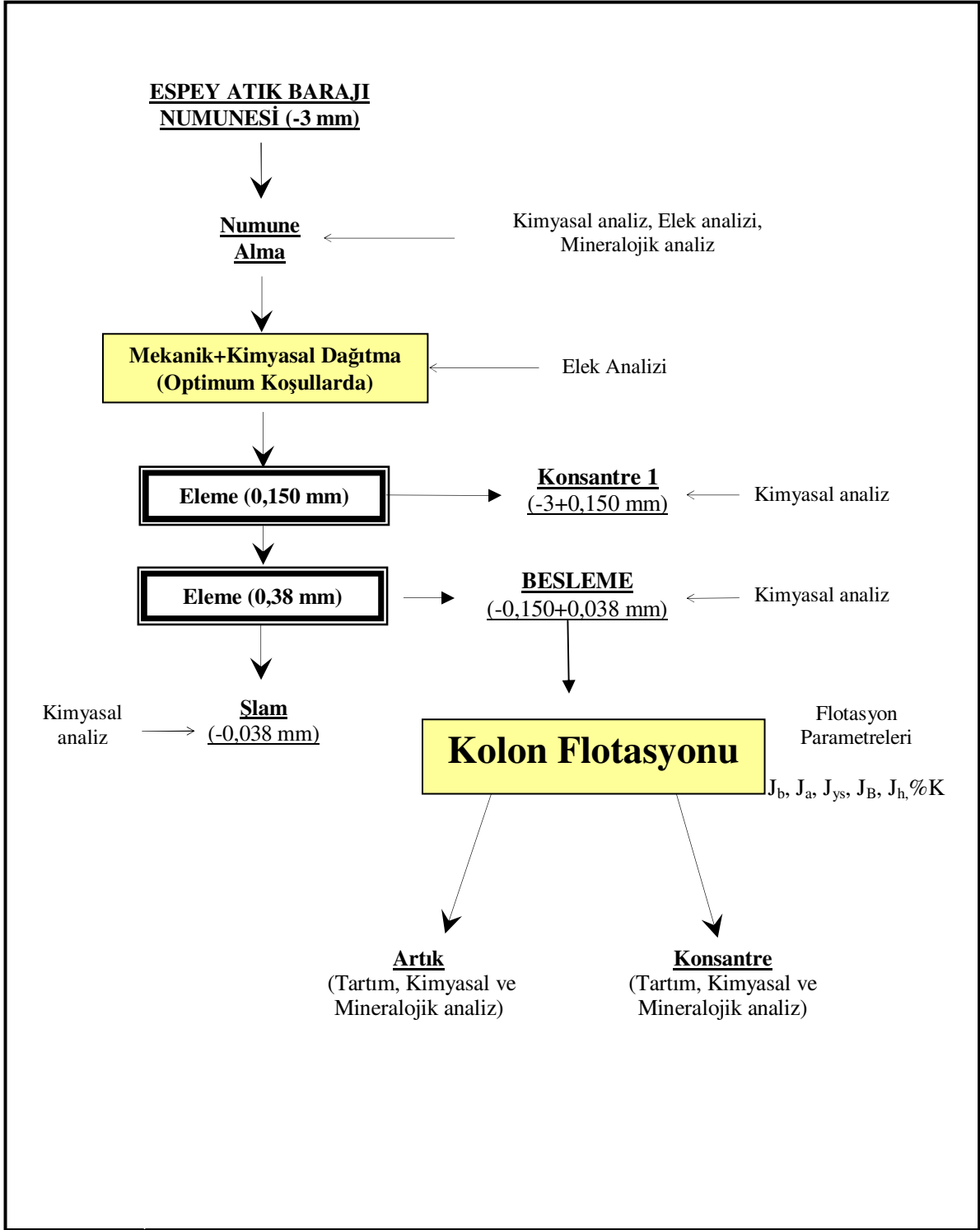
İkinci aşamada, 0,150 mm altı boyut gurubuna istenilen  $\text{B}_2\text{O}_3$  değerinde olmadığından kolon flotasyonu deneyleri uygulanmıştır. Şlam kaplama nedeniyle numuneden -0,038 mm tane boyutu atılmıştır.

Kolemanit mineralini flotasyon tekniği ile kazanabilmek için flotasyon deneyleri şekil 6.5'deki kolon flotasyonu ile yapılmıştır.



Şekil 6.5. Deneilerde kullanılan kolon flotasyonu

Çalışmalardaki bütün  $B_2O_3$  analizlerinde kimyasal yaş analiz yöntemi yani titrimetrik analiz yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmaların akım şeması şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6. Deneysel akım şeması

### Kolon Flotasyonu Deney Seti ve Düzenegi:

Kolonun;

- Yüksekliği 520 cm, çapı 6 cm olup pleksiglastan yapılmıştır.
- Kabarcık Üretim Sistemi (sparger): Paslanmaz elikten yapılmıştır.
- Hold-up ölçüm borusu: Kolonun alt tarafından kolona doğrudan bağlı ve kolon boyunca yukarıya doğru uzanan Şeffaf ince borudur.
- Peristaltik Pompalar: 3 adet olup besleme, artık ve yıkama suyu içindir.
- Tanklar: 20 lt. yıkama suyu için, 5 lt. besleme için plastik kovalardan oluşmaktadır.
- Hava debisi ölçer: Regülatöre bağlıdır (Kompresör vasıtasıyla hava verilir).

Kolonu dengeye getirmek için ilk önce kolonda bulunan suyun yüzey gerilimini düşürmek ve istenilen boyutta hava kabarcıkları oluşturabilmek için kolonun artık çıkışından kolona tüm sisteme beslenen köpürtücü miktarının 1/6'i oranında köpürtücü beslenmiştir. Ayrıca yine yıkama suyunada 1/6'i oranında köpürtücü eklenerek tüm debiler istenilen parametrelere bağlı olarak ayarlanmış ve belirli bir süre beklenilerek sistemin dengeye ulaşması sağlanmıştır. Geriye kalan köpürtücü ise pülpe eklenmiş ve bu Şekilde kolona besleme yapılmıştır.

### 6.2. Kolon Flotasyonu Deneyleri

Deneylerde DPÜ'nde Denver flotasyon hücresi [39] ve Jameson flotasyon hücresinde [40] yapılan zenginleştirme işlemleri baz alınarak belirlenen uygun reaktifler seçilmiştir.

Kolon flotasyonu deneylerinde kolemaniti en yüksek verim ve tenörde kazanabilmek için aşağdaki reaktif ve kolon parametreleri kullanılarak optimum koşullar belirlenmeye çalışılmıştır.

- Bastırıcı cinsi: Mısır nişastası (Ticari, Güneş marka)
- Toplayıcı cinsi: R801 (Cytfec firması tarafından üretilen, Őiřecam'dan alınmıştır)
- Köpürtücü cinsi: MIBC
- Tane boyutu: -0,150+0,038 mm
- pH: 8,79 (ortam pH'ı)
- Koşullandırma süresi: 2+5 dk. (bastırıcı+toplayıcı)
- Bastırıcı Miktarı ( $Q_{bas}$ ): 0, 500, 600, 700, 800, 900 g/t
- Toplayıcı miktarı ( $Q_T$ ): 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 g/t

- Köpürtücü miktarı ( $Q_K$ ): 60, 70, 80, 90 ppm
- Yüzeysel Artık Hızı ( $J_a$ ): 1,02; 1,06; 1,18 cm/sn
- Yüzeysel Besleme Hızı ( $J_b$ ): 1 cm/sn
- Yüzeysel Hava Hızı ( $J_h$ ): 0,5; 1; 1,5 cm/sn
- Yüzeysel Yıkama Suyu Hızı ( $J_{ys}$ ): 0,2; 0,3; 0,4 cm/sn
- Bias faktörü ( $J_B$ ): 0,1; 0,3; 0,9
- Katı oranı ( $\% K$ ): 5, 10, 15

Pül koşullandırma işlemi 2 lt.'lik Denver flotasyon hücresinde yapıp besleme tankına boşaltılmış ve buradan karıştırılarak kolona beslenmiştir.

### 6.2.1. Köpürtücü miktarının belirlenmesi

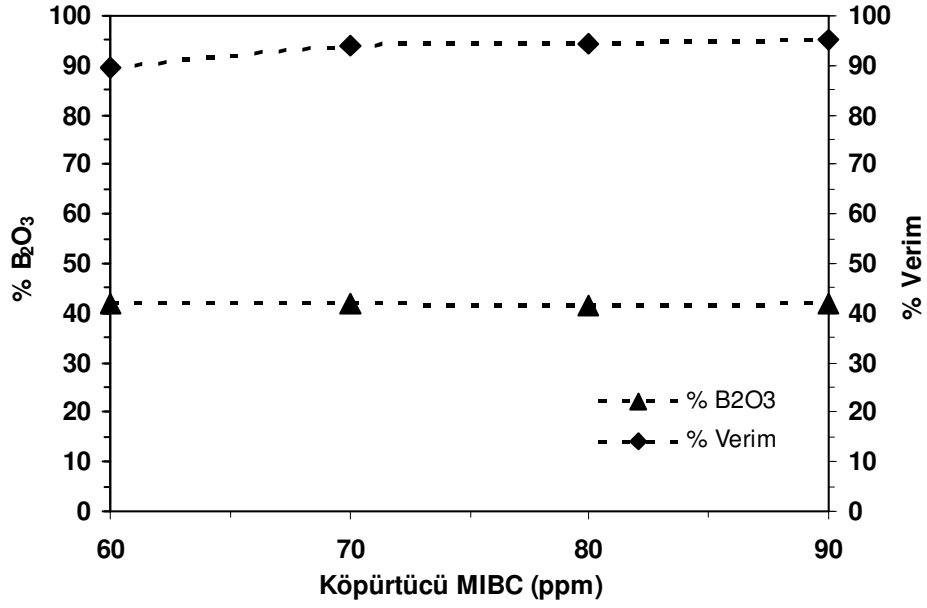
Deneyde kullanılan R801 toplayıcı reaktifinin köpürme özelliği bulunmaktadır. Fakat R801 kolonda kullanılan su miktarı fazla olduğu için yüzey gerilimini düşürmeye yeterli olamamaktadır. Bu nedenle flotasyonda köpürtücü olarak MIBC kullanılmıştır.

Kabarcık çapı, tane-kabarcık çarpışma olasılığına ve agrera stabiletisine etki eden önemli bir değişkendir.

Köpürtücünün flotasyonda etkisini belirlemek için 60, 70, 80, 90 ppm miktarlarında aşağıdaki şartlarda deneyler yapılmıştır.

#### Deney şartları;

- $Q_{bas}$ : 800 g/t
- $Q_T$ : 3000 g/t
- $J_a$  : 1,06 cm/sn
- $J_h$  : 1 cm/sn
- $J_{ys}$  : 0,2 cm/sn
- $J_B$  : 0,3
- $\% K$ : 10



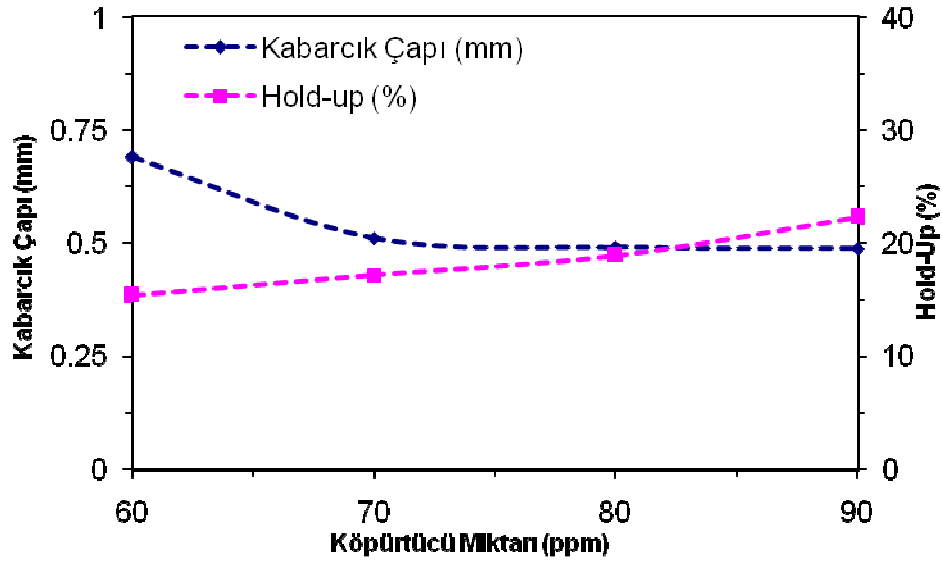
Şekil 6.7. Köpürtücüye bağlı olarak tenör-verim değişimi (Ek Çizelge 4)

Şekil 6.7’den görüldüğü gibi köpürtücü miktarı artışına bağlı olarak tenörde önemli bir değişiklik olmazken verimde bir miktar artış olmuştur. Buna göre köpürtücü sarfiyatı açısından 60 ppm değeri alınması uygundur. Bu değerde %41,91 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü konsantre %89,33 verimle elde edilmiştir.

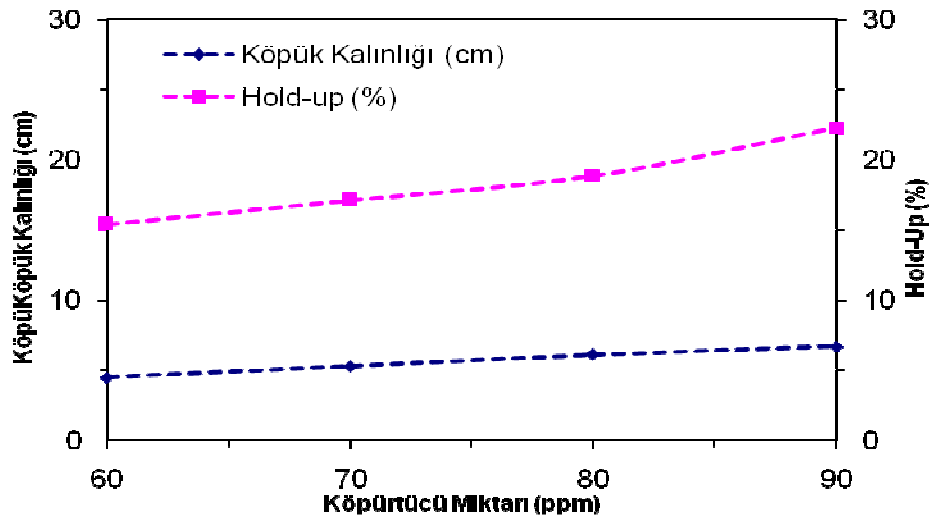
Köpürtücü miktarına göre sabit hava hızında (0,5 cm/sn) ve yıkama suyu hızında (0,2 cm/sn) yapılan deneylere göre hold-up artarken hava kabarcığı çapı düşmektedir (Şekil 6.8). Ayrıca köpük kalınlığında da artış olduğu görülmektedir (Şekil 6.9). Burada köpürtücü miktarının artışına bağlı olarak verimin artmasının nedeni oluşan fazla miktarda hava kabarcıklarının (hold-up artışı) (Şekil 5.2.) daha fazla malzemeyi yüzdürmüş olmasındandır.

Sabit hava hızı değerinde sisteme eklenen köpürtücü miktarının artması, kabarcık çapını küçülterek toplama bölgesindeki hacimsel hava miktarının yükselmesine neden olduğu daha önce yapılan araştırmalarda da belirtilmiştir [43].





Şekil 6.8. Köpürtücü miktarına bağlı olarak hold-up ve hava kabarcığı çapı değişimi (Ek Çizelge 5)



Şekil 6.9. Köpürtücü miktarına bağlı olarak hold-up ve köpük kalınlığı değişimi (Ek Çizelge 5)

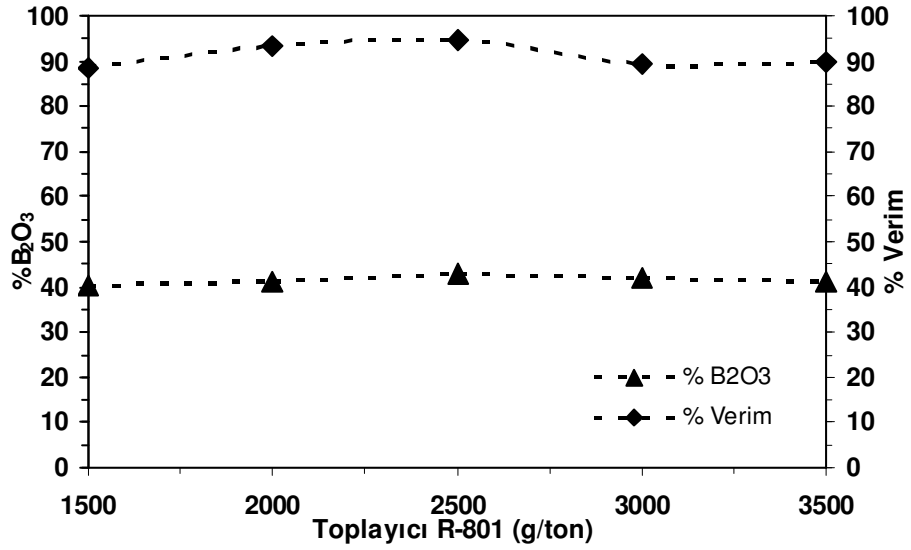
### 6.2.2. Toplayıcı miktarının belirlenmesi

Toplayıcılar, mineral yüzeyini hidrofob yaparak hava kabarcığı ile çarpıştıktan sonra oluşan aglomeranın köpük bölgesinden alınmaya kadar stabil kalma olasılığını arttıran en önemli

parametrelerindedir. Bu nedenle 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 g/t toplayıcı miktarlarında aşağıdaki şartlarda flotasyon deneyleri yapılmıştır.

**Deney şartları;**

- $Q_{bas}$ : 800 g/t
- $Q_K$ : 60 ppm
- $J_a$  : 1,06 cm/sn
- $J_h$  : 1 cm/sn
- $J_{ys}$  : 0,2 cm/sn
- $J_B$  : 0,3
- %K: 10



**Şekil 6.10.** Toplayıcıya bağlı olarak tenör-verim değişimi (Ek Çizelge 6)

Şekil 6.10'dan görüldüğü gibi tenör ve verim 2500 g/t toplayıcı miktarına kadar artmakta daha sonrada düşüş göstermektedir. 2500 g/t toplayıcı miktarına bağlı olarak %42,9 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü konsantre %94,82 verimle elde edilmiştir. 2500 g/t toplayıcı optimum şartlar için uygundur.

Fuerstenau vd. SDS'nin alumina üzerine adsorpsiyonu ile ilgili yaptıkları çalışmalara göre, zıt yüklü yüzeye SDS'nin adsorpsiyonunda, dört bölge ile karakterize edilen "Somasundaran Fuerstenau" isothermi olarak adlandırılan adsorption isothermi çizilmiş ve bu bölgelerde sırasıyla elektrostatik çekim, Ca(OH)RSO<sub>3</sub> kompleksinin yüzeyde çökmesi, yüzey kolloidleri, hemi-misel, tek tabaka formu ve miselleşme olduğu belirtilmiştir [36] .

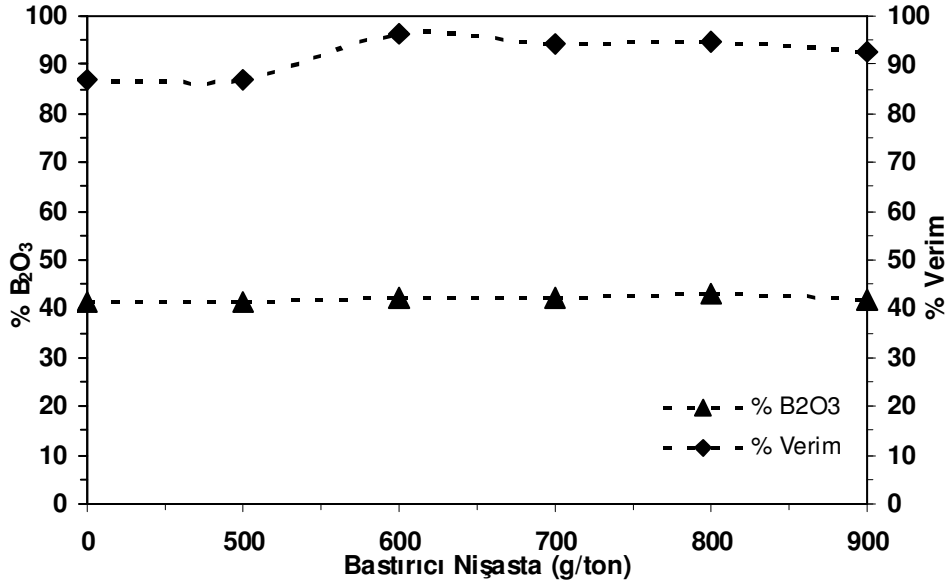
Çelik vd. (2002), tarafından yapılan çalışmalara göre SDS'nin kolemanit yüzeyine adsorpsiyonunun "Somasundaran-Fuerstenau" isothermine uyduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Çelik vd. (2002) ve Veeramasunen vd. (1996) kolemanit yüzeyinde heterokoagülasyon adsorpsiyonunun olduğunu belirtmişlerdir [67].

### 6.2.3. Bastırıcı miktarının belirlenmesi

Numunenin mineralojik analizinde de belirlendiği gibi kolemanit içerisinde gang mineralleri olarak başta montromonillonit olmak üzere kalsit ve kuvars bulunmaktadır. Daha önceki araştırmalarda [40,56] bu minerallerin bastırılmasında etkin bastırıcının nişasta olduğu belirlendiğinden, bu çalışmada bastırıcı olarak nişasta kullanılmıştır. Bu bastırıcının kolon flotasyonunda etkisini belirlemek için 0, 500, 600, 700, 800, 900 g/t miktarlarında aşağıdaki şartlarda deneyler yapılmıştır.

#### **Deney şartları;**

- **Q<sub>T</sub>**: 2500 g/t
- **Q<sub>K</sub>**: 60 ppm
- **J<sub>a</sub>** : 1,06 cm/sn
- **J<sub>h</sub>** : 1 cm/sn
- **J<sub>ys</sub>** : 0,2 cm/sn
- **J<sub>B</sub>** : 0,3
- **%K**: 10



Şekil 6.11. Bastırıcıya bağlı olarak tenör-verim değişimi (Ek Çizelge 7)

Şekil 6.11'den görüldüğü gibi tenör 800 g/t bastırıcı miktarına kadar artmakta ve sonra düşmektedir. Verim ise 600 g/t'a kadar artış göstermiş ve bu noktadan sonra azda olsa düşmüştür. En iyi tenöre ulaşılan 800 g/t bastırıcıda %42,9 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü konsantre %94,82 verimle elde edilmiştir. En iyi verime ulaşılan 600 g/t bastırıcıda %42,2 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü konsantre %96,16 verimle elde edilmiştir. Verim açısından 600 g/t tenör açısından 800 g/t bastırıcı uygundur. Optimum şart olarak ekonomiklik açısından 600 g/t bastırıcı uygun görülmüştür.

600 g/t dozajından sonra verimdeki düşüşün nedeni nişastanın az da olsa kolemaniti bastırması nedeniyledir.

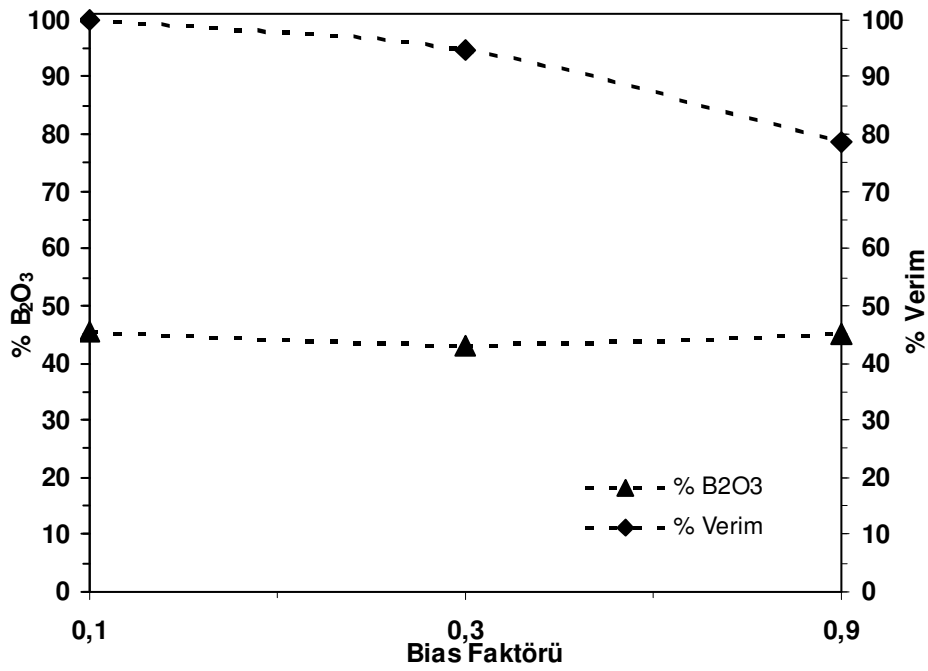
#### 6.2.4. Bias faktörü

Bias faktörü artık ile besleme debisi arasındaki farkın yıkama suyu debisine olan oranıdır. Bias faktörünün flotasyonda etkisini belirlemek için 0,1; 0,3; 0,9 bias faktörlerinde aşağıdaki şartlarda deneyler yapılmıştır.

##### Deney şartları;

- Q<sub>bas</sub>: 600 g/t
- Q<sub>T</sub>: 2500 g/t
- Q<sub>K</sub>: 60 ppm

- $J_a$  : 1,02; 1,06; 1,18 cm/sn
- $J_h$  : 1 cm/sn
- $J_{ys}$  : 0,2 cm/sn
- %K: 10



Şekil 6.12. Bias faktörüne bağlı olarak tenör-verim değişimi (Ek Çizelge 8)

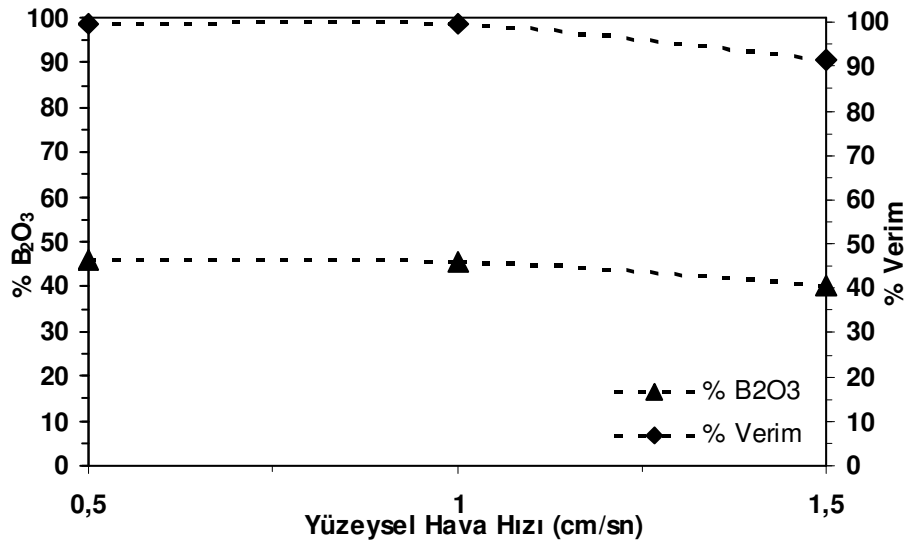
Şekil 6.12'den görüldüğü gibi bias değeri arttıkça verim düşmektedir. En iyi sonuç 0,1 bias faktöründe %45,4 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü konsantre %99,81 verimle elde edilmiştir. Bias faktörü besleme, artık ve yıkama suyu hızına bağlıdır. Sabit yüzeysel yıkama suyu ve besleme hızında; artık hızının az olması durumunda minerallerin toplama bölgesinde kalma süresi yükselmekte, bu nedenle tenör ve verim yükselmektedir. Artık hızının fazla olması durumunda ise mineral tanelerinin toplama bölgesinde kalma süresi düşmekte bu nedenle verim ve tenör düşmektedir.

### 6.2.5. Yüzeysel hava hızı

Hava miktarı toplama bölgesinin hidrodinamik koşullarının etkileyen önemli bir parametredir. Aynı zamanda farklı kesitlerdeki kolonların kıyaslanmasında kullanılır. Bu nedenle hava hızının etkisini belirlemek için 0,5; 1; 1,5 cm/sn farklı hava hızlarında aşağıdaki şartlarda deneyler yapılmıştır.

**Deney şartları;**

- $Q_{bas}$ : 600 g/t
- $Q_T$ : 2500 g/t
- $Q_K$ : 60 ppm
- $J_a$  : 1,02 cm/sn
- $J_{ys}$  : 0,2 cm/sn
- $J_B$  : 0,1
- %K: 10

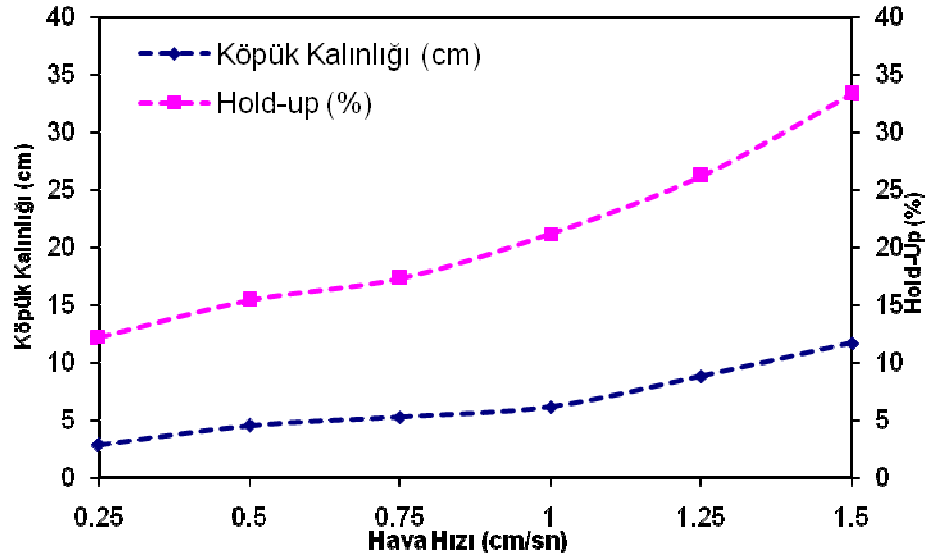


**Şekil 6.13.** Hava hızına bağlı olarak tenör-verim değişimi (Ek Çizelge 9)

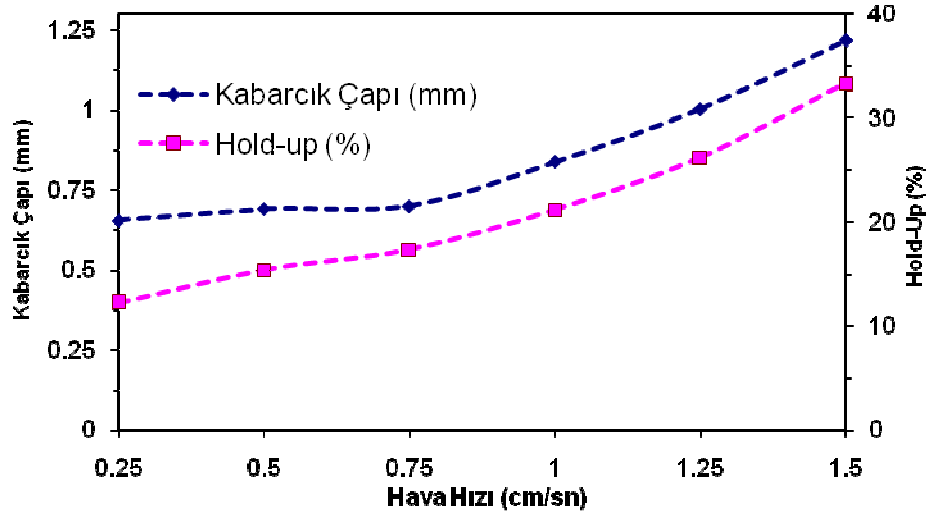
Şekil 6.13'den görüldüğü gibi hava hızı artışına bağlı olarak tenör ve verim 1 cm/sn hava hızından sonra düşmektedir. Sabit köpürtücü (60 pmm) ve yıkama suyu hızında (0,2 cm/sn) hava hızının artması ile kabarcık çapı ( $d_{50}$ ), hold-up ve köpük kalınlığı artmaktadır (Şekil 6.14, 6.15). 0,5 ile 0,75 cm/sn hava hızlarından sonra hold-up ve kabarcık çapı hızla artarken (Şekil 6.15), köpük kalınlığındaki artış daha yavaş olmaktadır (Şekil 6.14). Hava hızının artmasıyla kabarcık çapının artması kabarcık büyümesini göstermektedir. Buda kabarcıkların yükselme hızını arttırmakta ve kararlı flotasyon ortamı bozulmaktadır. Böylece kabarcık tane kopmaları oluştuğu için flotasyon verimi düşmekte ve ayrıca kabarcıkların gang tanelerini de

sürüklemesiyle de tenörde de düşme meydana gelmektedir. Bu nedenlerle 1 cm/sn hava hızına kadar kararlı flotasyon ortamı olmasına rağmen düşük hava hızında çalışmanın daha ekonomik olması nedeniyle çalışmada optimum hava hızı 0,5 cm/sn seçilmiştir. Bu hava hızında %45,9 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü konsantre %99,86 verimle elde edilmiştir.

Tipik bir flotasyon kolonunun toplama bölgesinde hacimsel hava miktarı %5-30 arasındayken, köpük bölgesinde %80'e kadar çıkmaktadır. Hava hızının artmasıyla hacimsel hava miktarı kararsız olduğu ve kabarcıkların birleşerek büyümeleri sonucu hızla yükseldikleri heterojen akış meydana getirdikleri yapılan çalışmalarda da belirtilmiştir [41,43,45,52].



**Şekil 6.14.** Hava hızına bağlı köpük kalınlığı ve hold-up değişimi (Ek Çizelge 10)



Şekil 6.15. Hava hızına bağlı kabarcık çapı ve hold-up değişimi (Ek Çizelge 10)

### 6.2.6. Katı oranı

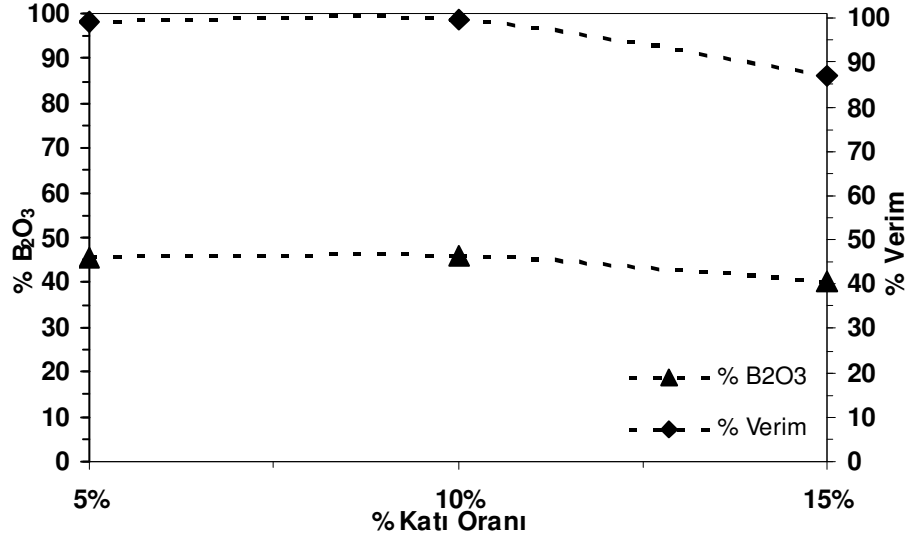
Flotasyon verimi ve konsantre tenörü açısından kolonun taşıma kapasitesine uygun besleme yapılması gerekmektedir. Aşırı katı beslemesi yapıldığında tanecikler için yeterli sayıda hava kabarcığı olmayacağından verim düşer, ortam viskoziteside artacağından gang tanelerinin konsantre içine sürüklenmesi kaçınılmaz olacaktır ve tenörde düşecektir [52].

Bu nedenle katı oranının etkisini belirlemek için %5, %10, %15, katı oranlarında aşağıdaki şartlarda deneyler yapılmıştır.

#### Deney Şartları;

- $Q_{bas}$ : 600 g/t
- $Q_T$ : 2500 g/t
- $Q_K$ : 60 ppm
- $J_a$  : 1,02 cm/sn
- $J_h$  : 0,5 cm/sn
- $J_{ys}$  : 0,2 cm/sn
- $J_B$  : 0,1





**Şekil 6.16.** Katı oranına bağlı olarak tenör-verim değişimi (Ek Çizelge 11)

Şekil 6.16.'dan görüldüğü gibi katı oranı arttıkça verim düşmektedir. %10 katı oranında %45,9 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü konsantre %99,86 verimle elde edilmiştir. %5 ve %10 katı oranlarında flotasyon süresi 4,5-5 dk. arasındadır. %15 katı oranında bu süre 3dk. 40 sn. dir. Katı oranının artması ile flotasyon süresi kısalmıştır. Katı oranının artışı ile kabarcık hızının yükselmesi ters orantılıdır. Viskozite ve yoğunluğun artması ile kolonun çalışma koşullarının değiştiği, yüksek katı oranında flotasyon ortamının bozulduğu gözlenmiştir. Optimum şartlar için %10 katı oranı uygundur.

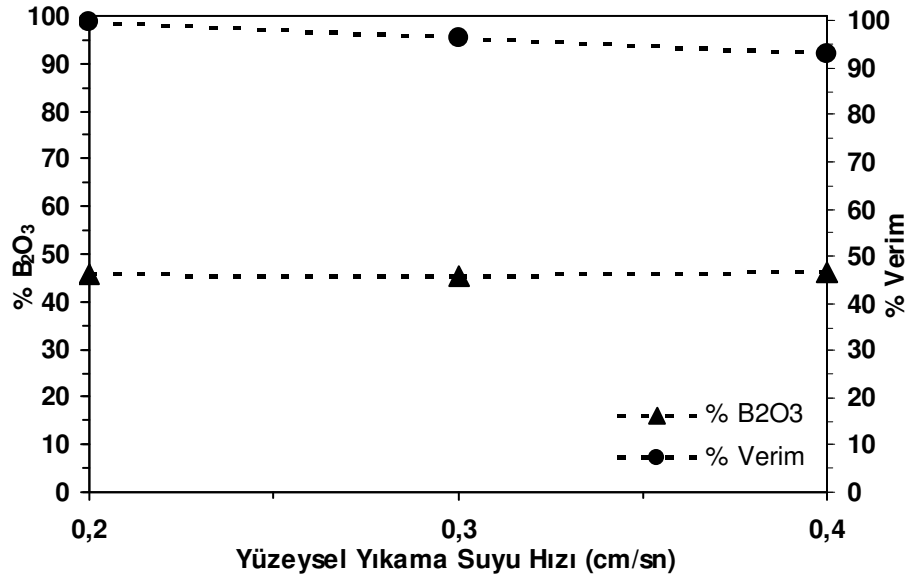
### 6.2.7 Yıkama suyu hızı

Köpükten aşağı doğru süzülen yıkama suyu ile yükselen köpüğün zıt akımlı olarak karşılaşması, köpük içerisine su ile taşınmış gang minerallerinin toplama bölgesine geri dönebilmesini, böylece yüksek tenörlü konsantre elde edilebilmesini sağlamaktadır. Yıkama suyunun fazla kullanılması durumunda kabarcık yükselme hızını düşüreceği ve buna bağlı olarak da hava tutunumu artacağından kolon flotasyonu çalışma koşulları bozulacaktır [45]. Bu nedenle yıkama suyunun etkisini belirlemek için 0,2 0,3, 0,4 cm/sn yıkama suyu hızlarında aşağıdaki şartlarda deneyler yapılmıştır.

#### **Deney şartları;**

- Q<sub>bas</sub>: 600 g/t
- Q<sub>T</sub>: 2500 g/t

- $Q_K$ : 60 ppm
- $J_a$  : 1,02 cm/sn
- $J_h$  : 0,5 cm/sn
- %  $K$ : 10



Şekil 6.17. Yüzeysel yıkama suyu hızına bağlı olarak tenör-verim değişimi (Ek Çizelge 12)

Şekil 6.17.'den görüldüğü gibi yıkama suyu hızının artışına bağlı olarak verim düşerken tenörde de bir miktar artış olmuştur. Yüksek yüzeysel yıkama suyu hızlarında, yıkama suyu gang minerallerinin konsantreye kaçmasına izin vermemektedir. 0,2 cm/sn yıkama suyu hızında %45,9 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü konsantre %99,86 verimle elde edilmiştir. 0,4 cm/sn yıkama suyu hızında %46,4 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü en yüksek konsantre elde edilmiş fakat verim düşüktür. 0,2 cm/sn yıkama suyu hızı optimum şartlar için uygundur.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Genel olarak Emet-Espey Bor yıkama tesisi ince artık barajında alınan numunenin tane boyutu 3 mm'nin altındadır. Numune çoğunlukla kolemanit ve kil minerallerinden oluşmaktadır.  $B_2O_3$  içeriği ise ortalama %26,33'tür.

Numunenin zenginleştirilmesinde iki yöntem uygulanmıştır.

1. Yöntem mekanik karıştırma ve dağıtma+kimyasal dağıtma+sınıflandırma
2. Flotasyon; Kolon Flotasyonu

Birinci yöntem ile yapılan deneysel çalışmalarda üç tane boyutunda ürün elde edilmiştir. 150  $\mu$ m fraksiyon üstünde istenilen kalitede ürün elde edilebilmiştir. Bu boyutta %42,2  $B_2O_3$  tenörlü konsantre %68,68 verimle elde edilmiştir.

Kolon flotasyonunda yapılan çalışmalarda -150+38  $\mu$ m boyutuna getirilen atıklar zenginleştirilmeye çalışılmıştır. Kolon flotasyonu parametrelerine göre %36,15  $B_2O_3$  tenörlü malzemedan flotasyon beslemesine göre %45,9  $B_2O_3$  tenörlü malzemedan flotasyon beslemesine göre ise %79,08 verimle elde edilmiştir. Ayrıca konsantrelerin birleştirilmesi ile %43,12  $B_2O_3$  tenörlü konsantre %93,46 verimle kazanılmaktadır. Kolemanit %4,6  $B_2O_3$  tenörü ile şlam olarak % 0,23  $B_2O_3$  tenörü ile flotasyon artığı olarak kaybedilmektedir.

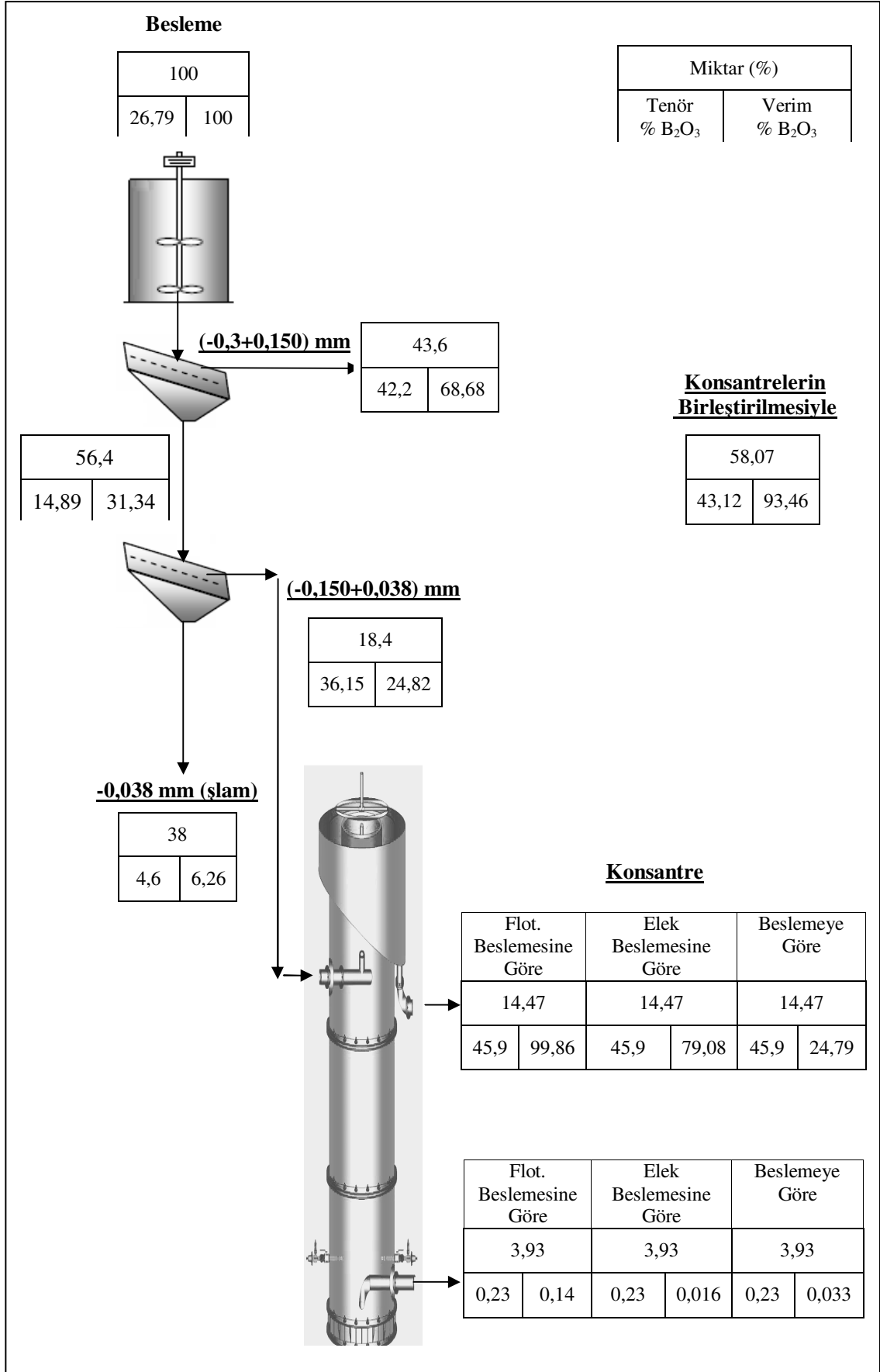
### Optimum flotasyon şartları;

- $Q_{bas}$ : 600 g/t
- $Q_T$ : 2500 g/t
- $Q_K$ : 60 ppm
- $J_a$  : 1,02 cm/sn
- $J_b$  : 1 cm/sn
- $J_B$  : 0,1
- $J_h$  : 0,5 cm/sn
- $J_{ys}$  : 0,2 cm/sn
- % K: 10

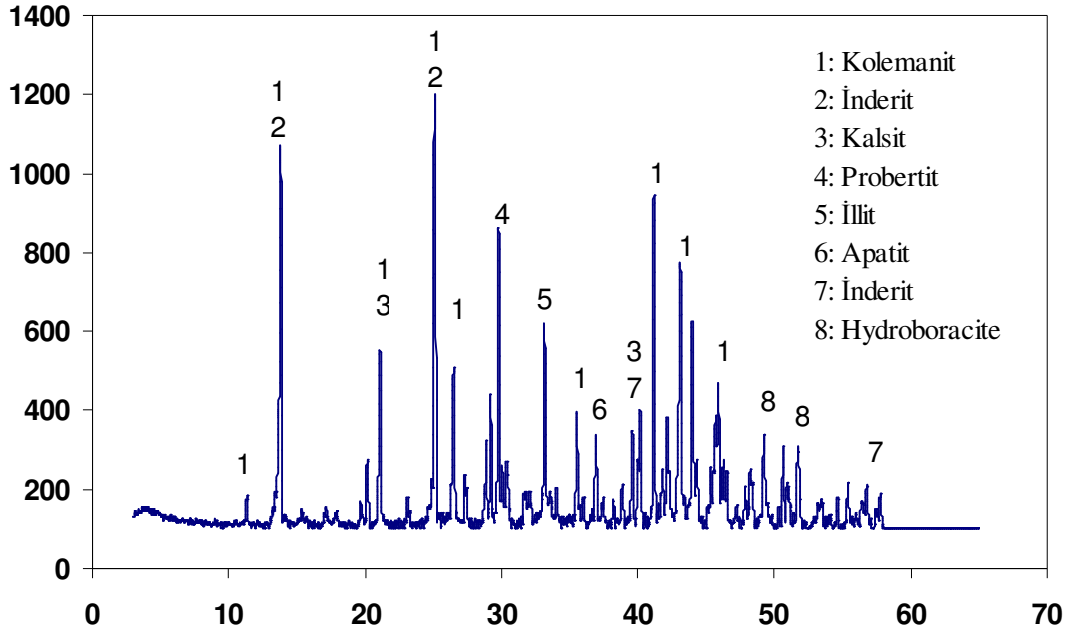
- Kolemanit minerali ilk defa kolon flotasyonunda uygulanmış olup yüksek verimle kazanılmıştır.
- Flotasyon verimine, toplayıcı, köpürtücü ve bastırıcı miktarının, bias faktörünün, hava hızının, katı oranının, yıkama suyu hızının ve şlamın önemli derecede etkiye sahip oldukları belirlenmiştir.
- Bu faktörlerden en önemli etkiyi bias faktörü ve hava hızı göstermiştir.
- Kabarcık çapı ölçümlerine göre  $d_{50}$ : 0,69 mm'dir. Çok fazla köpürtücünün kullanılması maliyeti arttıracaktır.
- Yüksek hava hızlarında oluşan türbülans kolemanit flotasyonunda verime ve tenöre önemli derecede etki etmektedir. Düşük hava hızlarında (<1 cm/sn) en iyi tenör ve verim elde edilmektedir.
- Yüksek katı oranında flotasyon süresi kısalmakta, tenör ve verimde önemli ölçüde düşüş yaşanmaktadır.
- Flotasyon zamanı bias faktörüne ve katı oranına bağlıdır.
- -38  $\mu$ m boyutunda yapılan örnek çalışmada kolemanit taneleri flotasyon kolonunda zenginleşmemektedir.
- Bigadiç kolemanit atıklarına (-0,150+0,038 mm) yukarıda belirtilen optimum şartlarda yapılan kolon flotasyonu deneylerinde verimin %99'dan aşağıya düşmediği görülmektedir.
- Optimum flotasyon şartlarında kazanılan konsantre ve atığın XRD sonuçlarına göre (Şekil 7.2 ve 7.3) kolemanit tanelerinin neredeyse tamamının zenginleştirildiği görülmektedir. Flotasyon atığında ise kolemanit yok denince kadar azdır.

### **Öneriler**

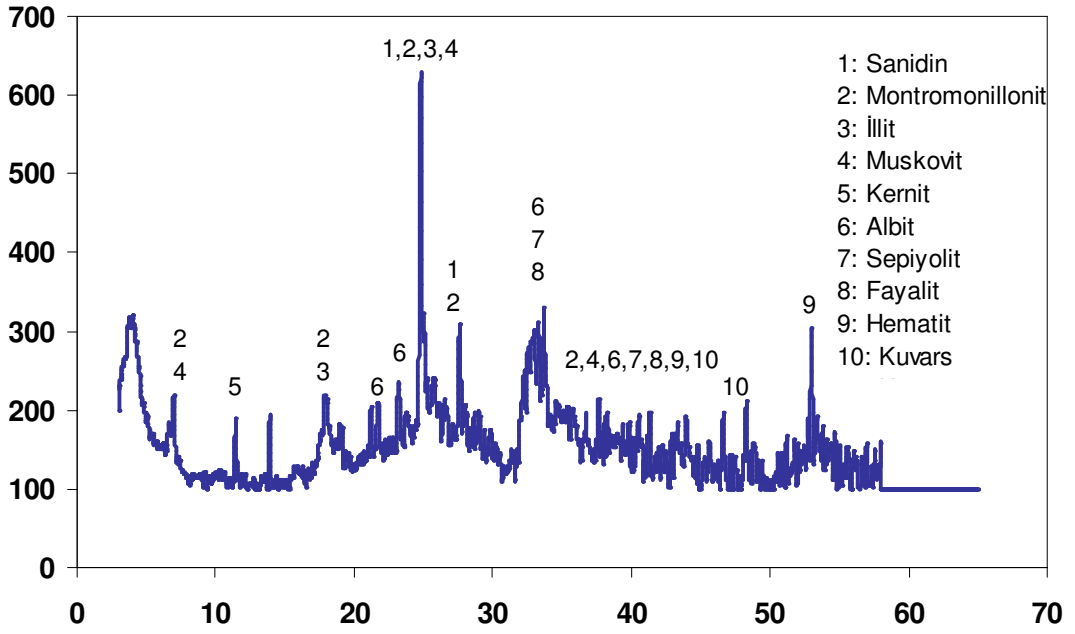
- Zenginleştirme sonucu ortaya çıkan artıkların çeşitli sektörlerde kullanım olanakları araştırılmadır.
- İnce tanelerin (-38  $\mu$ m) kazanılmasıyla ilgili daha ayrıntılı çalışmalar yapılmalıdır.
- Yüksek katı oranıyla kazanılmasının araştırılması yapılmalıdır.



Şekil 7.1 Madde Balansı



Şekil 7.2. Optimum flotasyon şartlarında kolon flotasyonu konsantresinin XRD sonuçları



Şekil 7.3. Optimum flotasyon şartlarında kolon flotasyonu artığının XRD sonuçları

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Kasım 2009, Stratejik Plan (2009-2013), [www.etimaden.gov.tr](http://www.etimaden.gov.tr), Türkiye, 90s.
- [2] DPT, 2001, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Bor Tuzları, Ankara, Türkiye, 172s.
- [3] Acarkan, N., Bor Ürün Çeşitleri ve Kullanım Alanları, Maslak-İstanbul, Türkiye, 1-5
- [4] Nezahat, E., Özdağ, H., 2002, Etibor A.Ş. Kırka Boraks İşletmesi Tinkal Cevheri ve Atıklarının Doğrudan Zenginleştirilmesi , Tübitak 26, Türkiye, 107-116
- [5] Bentli, T., Özdemir, O., Çelik, M. S., 2002, Nezahat, E., Bor Atıkları ve Değerlendirilme Stratejileri, 1. Uluslararası Bor Sempozyumu, 3-4 Ekim, Kütahya, Türkiye, 250-258
- [6] Göktepe, F., 2004, Bigadiç Bor Atıklarının Flotasyonla Zenginleştirilebilirliğinin Ön Araştırması, II. Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül, Eskişehir, Türkiye, 81-86
- [7] Yamık, A., Uçar, A., Demir, U., 2004, Emet Espey konsantratörü -25 mm bor atıklarının Hidrosiklon ile zenginleştirilmesi, II. Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül, Eskişehir, Türkiye, 99-104
- [8] Güyagüler, T., 2001, Türkiye Bor Potansiyeli, 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 18-19 Ekim, İzmir, Türkiye, 18-27
- [9] Kılınç, E., Mordoğan, H., Tanrıverdi, M., 2001, Bor Minerallerinin Önemi, Potansiyeli, Üretimi ve Teknolojisi, 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 18-19 Ekim, İzmir, 211-234
- [10] Özkan, Ş., Cebi, H., Delice, S., Doğan, M., 1997, Bor Minerallerinin Özellikleri ve Madenciligi, II. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 16-17 Ekim, İzmir, Türkiye, 224-228
- [11] Kılıç, A.M., 2004, Bor Madeninin Türkiye Açısından Önemi ve Gelecekteki Yeri, II. Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül, İzmir, Türkiye, 31-40
- [12] Helvacı, C., 2003, Türkiye Borat Yatakları: Jeolojik Konum, Mineraloji ve Bor Politikası, BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi 5.1., 4-41
- [13] Yerel, S., Özbay, N., Gence, N., 2005, Bor Madeni ve Önemi, Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, Sayı: 3, 26-33
- [14] Sarıhan, E., 2006, Bor Sektör Profili, İstanbul Ticaret Odası, Aralık, Türkiye, 1-37
- [15] Ertuğrul, E., 2004, Bor ve Toryum Madenleri Sektörü , Türkiye Kalkınma Bankası A.Ş. Araştırma Müdürlüğü, Mart, Ankara, Türkiye, 88s.
- [16] Buluttekın, M. B., 2008, Bor Madeni Ekonomisi: Türkiye'nin Dünya Bor Piyasasındaki Yeri , 2. Ulusal İktisat Kongresi , 20-22 Şubat, İzmir, Türkiye, 1-36
- [17] Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2009, Bor Ürünleri, [www.etimaden.gov.tr](http://www.etimaden.gov.tr), 63s.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [18] Yaşar, E., 1994, Bor Minerallerinin Elektrostatik ve Elektrokinetik Özellikleri, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eylül, İstanbul, Türkiye
- [19] Erkan, Z. E., Akar, A., Savaş, M., 2003, Emet Bor İşletme Müdürlüğü Hisarcık Baraj Atıklarının Değerlendirebilirliğinin Araştırılması, BAÜ Fen Bil. Enst. Derg. 5.1, Türkiye, 161-174
- [20] Batar, T., Köksal, S., Yersel, Ş., 2009, Atık Bor, Atık Kağıt ve Perlit Katkılı Sıva Malzemesinin Üretimi ve Karakterizasyonu, Ekoloji, 45-59
- [21] Emrulloğlu, F., Kara, M., Çelik, M. S., Tolun, R., 1993, Kalsine Kolemanit Atıklarının Sarsıntılı Masa ile Zenginleştirilmesi, Türkiye XIII. Madencilik Kongresi, 10-14 Mayıs, İstanbul, Türkiye, 630-638
- [22] Doğan, M. Z., Kaytaç, Y., Önal, G., Perek, K. T., 1997, Bigadiç ve Kestelek Bor Artıklarının Isıl İşlem, Elektrostatik Ayırma ve Flotasyon ile Zenginleştirme Olanaklarının Araştırılması, II. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 16-17 Ekim, İzmir, Türkiye, 76-84
- [23] Gündüz, M., Çebi, H., Bilici, M. S. U., Akçin, H., Karakoç, G., Doğan, A., 2001, Kestelek Konsantratör Tesisi Ara Ürün Stokları  $B_2O_3$  içeriklerinin İyileştirilmesi Çalışmaları, 17. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, TUMAKS, Türkiye, 125-131
- [24] Ediz, N., Bentli, İ., Ceylan, T., Tatar, I., 2004, Kestelek Bor işletmesi -3 mm Klasifikatör Çökene Ürünün Farklı Pervaneli Dağıtıcılarda Zenginleştirilmesi, II. Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül, Eskişehir, Türkiye, 93-96
- [25] Aytekin, Y., Badruk, M., Ekim 1992, Emet Kolemanit Cevherinin Dekrepatasyon Yoluyla Zenginleştirilebilirliğinin Araştırılması, 4. Proceeding of the III. International Mineral Processing Symposium, 20-22 Ekim, Antalya, Türkiye, 551-561
- [26] Gürbüz, H., Yavaşoğlu, N., Türkay, S., Bulutçu, A. N., Tolun, R., 1990, Tinkal Cevherinin Zenginleştirilmesinde İki Kademeli Yıkamanın Etkisi, 3. Proceeding of the III. International Mineral Processing Symposium, 11-13 Eylül, Antalya, Türkiye, 470-474
- [27] Savaş, M., Özdağ, H., Sönmez, E., 1997, Ses Ötesi Dalgaların Kolemanit Artıklarının Zenginleştirilmesinde Kullanımının Araştırılması, Türkiye 15. Madencilik Kongresi, 6-9 Mayıs, Ankara, Türkiye, 319-323
- [28] Özdağ, H., Bozkurt, R., Uçar, A 1988, Kestelek Bor Yıkama Atıklarından Borun Kazanılması, Proceeding of the II. International Mineral Processing Symposium, 4-6 Ekim, İzmir, Türkiye, 281-288
- [29] Çebi, H., Özkan, G., Demircan, E., Mordoğan, H., 1997, Kırka'da Üretilen Tinkal Kaba Konsantrasyonunun İyileştirilmesi, Türkiye 15. Madencilik Kongresi, 6-9 Mayıs, Ankara, Türkiye, 311-318
- [30] Tolun, R., Yarar, B., Gundiler, I., Kolemanit Cevherlerinin Dekrepatasyon Yolu ile Zenginleştirilmesi, Madencilik Cilt 11 Sayı 5, 1-6



### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [31] Akar, A., Mordoğan, H., Kemal, M., Batar, T., Kahraman, B., 2005, Bor Cevherlerine Uygulanan Isıl İşlemler, I. Ulusal Bor Çalıştayı Bildiriler Kitabı, 28-29 Nisan, Ankara , Türkiye, 209-216
- [32] Erkan, Z. E., Akar, A., Savaş, M., 2003, Emet Bor İşletme Müdürlüğü Hisarcık Baraj Atıklarının Değerlendirebilirliğinin Araştırılması , BAÜ Fen Bil. Enst. Derg. 5.1, Türkiye, 161-174
- [33] Çelik, M. S., Hançer, M., Kaytaç, Y., 1993, Doygun Çözeltilerde Boraks Flotasyonunun Anyonik ve Katyonik Reaktiflerle İncelenmesi, Türkiye XIII . Madencilik Kongresi, 10-14 Mayıs, Türkiye, 519-528
- [34] Gülgönül, İ., Çelik, M. S., Çınar, M., 1997, Üleksit Flotasyonunda Şlamın Etki Mekanizması, II. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 16-17 Ekim, İzmir, Türkiye, 70-75
- [35] Yarar, B., 1973, Düşük Tenörlü Kolemanit Cevherinin Flotasyon Yoluyla Zenginleştirilmesi, 3. Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi 21-24 Şubat, Ankara, Maden Mühendisleri Odası, 571-588
- [36] Somasundaran, P., Krishnakumar, S., 1997, Adsorption of surfactants and polymers at the solid – liquid interface, Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects 123-124, pp. 491-513.
- [37] Köse, M., Ertekin, S., Gündüz, M., Öztoprak, M., 1989, Emet Konsantratör Atık Barajındaki Arsenik ve Kolemanitleri Seçimli Olarak Kazanma İmkanları, 11. Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi, 24-28 Nisan, Ankara, 407-415
- [38] Aytekin, A., Lübiç, C., Yamık. A., 1988, Kırka Tinkal Cevherinin Flotasyonla Zenginleştirilebilirliğinin Araştırılması, Proceeding of the II. İnternational Mineral Processing Symposium, 4-6 Ekim, İzmir, Türkiye, 267-280
- [39] Uçar, A., Yargan, M., 2009, Selective separation of boron values from the tailing of a colemanite processing plant, Separation and Purification Technology, Volume 60, 30 Haziran, 1-8
- [40] Kerenciler, S., 2009, Emet Espey Bor Tesisi İnce Gölet Atıklarının Jameson Flotasyon Kolonunda Zenginleştirilebilirliğinin Araştırılması, DPÜ FBE Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, Türkiye, 72s.
- [41] Aksani, B., 1998, Flotasyon Kolonları Bölüm 2, Madencilik Cilt:37 No: 2, Haziran, Ankara, Türkiye, 41-56
- [42] Öteyaka, B., Uçbaş, Y., Bilir, K., 1996, Zonguldak Toz Kömürlerinin Modifiye Flotasyon Kolonuyla Zenginleştirilmesi, Türkiye 10. Kömür Kongresi, 20-24 Mayıs, 123-132
- [43] Aksani, B., 1998, Flotasyon Kolonları Bölüm 1, Madencilik Cilt:37 No: 2, Ankara, Türkiye, 21-40

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [44] Uçurum, M., 2004, Kurşun-Çinko Cevherinin Kolon Flotasyonu İle Zenginleştirilmesinin Araştırılması, Çukurova Üniversitesi Doktora Tezi, Türkiye, 168s.
- [45] Kurşun, H., 2001, Kolon Flotasyonunda Zenginleştirmeyi Etkileyen Parametrelerin Teorisinin İncelenmesi, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Cilt:5 Sayı: 2, 25-39
- [46] Hacıfazlıoğlu, H., 2007, Alternatif Flotasyon Yöntemlerinin Tanıtılması, Madencilik, Cilt 46, Sayı 3, Eylül, Türkiye, 23-41
- [47] Ekmekçi, Z., Şahin, A., 2006, Köpük Görüntüsü ve Flotasyon Performansı Arasındaki İlişkinin Görüntü Analiz Sistemi ile İncelenmesi, Madencilik, Cilt 45, Sayı 2, Haziran, Türkiye, 27-38
- [48] Kurşun, H., 2005, İkili (Hava/Su) ve Üçlü (Hava/Su/Mineral) Faz Sistemlerinde Hava Tutunumu Yüzeysel hava akış hızı ve Köpürtücü Miktarının Kolon Flotasyonunda Performansa Etkisi, S.D.Ü. F.B.D 9-3, 1-8
- [49] Türkan, S., Temmuz 2006, Tunçbilek Tikner Altı Atık Kömürlerinin Kolon Flotasyonu Yöntemi ile Kazanılması, DPÜ FBE Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, Türkiye, 59s.
- [50] Sönmez H., Haziran 2007, Tunçbilek Lavvarı Tikner Altı İri Atık Kömürlerinin Modifiye Flotasyon Kolonu ile Zenginleştirilmesi, DPÜ FBE Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, Türkiye, 45s.
- [51] Özdemir, M., Kıpçak, İ., Öztürk, N., 2003, Bor Endüstrisi Katı Atıklarından Boraksın Katı-Sıvı Özütleme İle Geri Kazanılması, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 5.1, 11-23
- [52] Öteyaka, B., 2007, Flotasyon Prensipleri, Yüksek Lisans Ders Notları, DPÜ, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye.
- [53] DPT, 2008, Dokuzuncu Kalkınma Planı, Kimya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu, Bor-Soda Külü-Krom Kimyasalları Çalışma Grubu Raporu, Ankara, Türkiye, 133s.
- [54] Aykul, Ö., 2008, Eti Bor Emet-Hisarcık Kolemanit Atıklarının Dekrepatasyon Yöntemi ile Zenginleştirilmesi, Ekim, DPÜ FBE Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, Türkiye, 104s.
- [55] Yegül, E., E, 2007, Bor Zenginleştirme Tesislerinde Ara Ürün Tenörlerinin Arttırılması İçin Yöntemlerin İncelenmesi, Hacettepe Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, Ankara, Türkiye, 137s.
- [56] Yargan, M., 2007, Emet Espey Bor Tesisi İnce Gölet Atıklarının Zenginleştirme Yöntemlerinin Araştırılması, Ekim, DPÜ FBE Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, Türkiye, 89s.
- [57] Özkan, S. G., Veasey, T. J., 1994, The Effect of Slime Coatings on Colemanit Flotation, V. Progress in Mineral Processing Technology, 6-8 Eylül, Kapadokya, Türkiye, 205-210
- [58] Özkan S. G., Alp M. S., Veasey T. J., 1993, Emet Kolemanit Cevheri Üzerindeki Flotasyon Çalışmaları, Türkiye 13. Madencilik Kongresi, 10-14 Mayıs, Türkiye, 453-458

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [59] Bulut, G., Ören, E., Acarkan, N., Bakan, S., 2004, Tinkal Atığına Uygulanan Flotasyon Çalışmaları, Proceedings of X<sup>th</sup> International Mineral Processing Symposium, 5-7 Ekim, İzmir, Türkiye, 253-263
- [60] Gül, A., Kaytaç, Y., Önal, G., 2006, Beneficiation of Colemanite Tailings by Attrition and Flotation, Minerals Engineering 19, 368-369
- [61] Veeramasuneni, S., Yalamanchili, M. R., Miller, J. D., Çelik, M.,S., 1996, Adsorption of Model Collector Colloids at the Surface of Colemanite as Characterized by Optical and Atomic Force Microscopy, Changing Scopes in Mineral Processing, Kemal, Arslan, Akar & Canbazoglu (eds), Balkema, 6<sup>th</sup> International Mineral Processing Symposium, Kuşadası/Türkiye
- [62] Özkan, S.G., Acar, A., 2004, Investigation of impact of Water type on Borate Ore Flotation, Water Research 38, 1773-1778
- [63] Kaytaç, Y., Önal G., Güney A., 1986, Bigadiç kolemanit artıklarının değerlendirilmesi, 1. Uluslararası Cevher Hazırlama Sempozyumu, cilt 1, İzmir, 237-249.
- [64] Fuerstenau, M. C., Miller, J. D., Kuhn, M. C., 1985, Chemistry of flotation, SIME, New York, p.177.
- [65] Kayandan, İ., Pehlivan, V., Çağlayan ve Türedi, S., 2004, Düşük Tenörlü Kolemanit Cevherinin Kalsinasyon Yöntemi ile Zenginleştirilmesi, II.Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül, Eskişehir, Türkiye, 65-69
- [66] Koca, S., Savaş, M., 1998, Zeta Potentials of colemanite and realgar, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Mineral Processing Symposium, 5-7 Eylül, İstanbul, Türkiye, 205-208
- [67] Çelik, M.S., Hançer, M., Miller, J.D., 2002, Flotation Chemistry of Boron Minerals, Journal of Colloid and Interface Science 256,121-131
- [68] Koca, S., Savaş, M., 2003, Contact Angle Measurements at the Colemanite and Realgar Surface, Applied Surface Science 225, 347-355
- [69] Yaşar, E., Gülgönül, İ., Kaytaç, Y., Çelik, M.S., 1994, Electrokinetic properties of boron minerals, 5<sup>th</sup> International Mineral Processing Symposium, 6-8 Eylül, Kapodokya, Türkiye, 315-320
- [70] Sönmez, E., Özdağ, H., Savaş, M., 1996, Beneficiation of Emet tailings by water absorption + mechanical attrition + magnetic separation, Changing Scopes in Mineral Processing 6<sup>th</sup> International Mineral Processing Congress, Eds Kemal, Akar&Canbazoglu, 144-148

## **EKLER**

### **EKLER 1. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Analizi**

1. 0-3 mm ebadına getirilen kolemanit cevheri numunesi 105 °C' de etüvde 2 saat süreyle kurutulur. Kurutulan numune diskli öğütücüden geçirilerek pudra haline getirilir.

2. Pudra halindeki bu numuneden tartım anındaki nemi tayin etmek için 4±1 gr numune alınır.

3. Bu numuneden 250 mililitrelik erlen için 1±0,2 gr tartılır.

4. Erlenin içine 60-70 ml saf su eklenmesiyle bulamaç yapılır.

5. Tekrar erlenin içine 10±0,5 ml derişik HCl asit ilave edilir.

6. Erlenin üzerine bir huni yerleştirildikten sonra, kaynamaya başladığı andan itibaren 10 dk kaynatılır.

7. Kaynama bittikten sonra huni yıkanarak alınır.

8. Birkaç damla metil kırmızısı damlatılır (renk kırmızı, düşük tenörlerde turuncuya yakın olur). Renk sarıya dönüncye kadar azar azar sodyum karbonat-sodyum bikarbonat karışımı eklenerek +3 eğerlikli (Al, Ti, Fe) çöktürülür.

9. Ortam nötre yakın bazik olmalıdır. Karbonat fazla eklenmiş ise asitlendirilip (renk pembe olur) tekrar ayarlanır (sarıya döndürülür).

10. Birkaç dakika yeniden kaynatılır ve soğutulur (büyük kabarcıklar oluşmaya başlanınca alınır).

11. Süzülür ve üç defa sıcak su ile yıkanır.

12. Berrak çözelti hafif asitlendirilip (renk pembe olur), CO<sub>2</sub> yi ortamdandan atmak için 20-30 dk. arası kaynatılır ve soğutulur.

13. Soğuyan çözeltiye, faktörü belirlenmiş 0,5 Normal NaOH (renk sarıya dönüncye kadar devam edilir) eklenir. 8-10 damla fenolftalein eklendikten sonra (renkte değişiklik olmaz) üzerine 4-5 gr mannitol ilave edilir (renk pembe olur).

14. Faktörlenmiş 0,5 Normal NaOH ile (renk önce sarıya döner) titrasyona başlanır. (renk ilk önce sarı olur). Titrasyon renk soğan kabuğu rengi (pembemsi) oluncaya kadar devam eder.

15. Titrasyon kontrolü için, kullanılan mannitol kadar erleneye mannitol eklenir. Renkte değişiklik oluyorsa (sarıya dönerse) titrasyona devam edilir.

16. Titrasyon sonundaki sarfiyat dikkate alınarak aşağıdaki formülle B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüzdesi hesaplanır.

$$\% \text{B}_2\text{O}_3 = (0,017405 * \text{S} * \text{F}) / \text{T} * 100$$

**0,017405** = Eşdeğer miligram

**S** = 0,5 Normal NaOH sarfiyatı

**F** = 0,5 Normal NaOH faktörü

**T** = Numune tartımı

**Not:**

1. B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> analizlerinde sarfiyattan 0,1-0,2 gr düşülür. 0,1 gr 25 mm–100 mm elek boyutundaki numuneden, 0,2 gr 0,3-3,25 mm elek boyutundaki numuneden düşülür.

2. Numuneler karışmaması için kullanılan her kap ve erlen numaralandırılır.

3. Yapılan bütün kimyasal işlemler sırasında ellerin ve çevre şartlarının kuru ve temiz olmasına dikkat edilir, acele etmeden itina ile yapılır.

4. Bütün işlemler kaynar saf su ile yapılır.

#### **Faktör Hazırlama**

25 ml' lik erlene 0,4-0,5 gr H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> tartılır (8-10 adet erlene). Her bir numuneye 60-70 ml saf su ilave edilir. Kaynamaya başladığı andan itibaren 10 dk. Kaynatılır. Su banyosunda soğutulur. Soğutulan çözeltiliye 3-5 damla metil kırmızısı, 3-5 damla fenolftalein damlatılır. 4-5 gr mannitol ilave edilir. Renk soğan kabuğu rengine dönene kadar 0,5N NaOH ile titre edilir.

$$\text{F} = \text{T} / (0,03092 * \text{S})$$

F = Faktör

T = Tartım

S = Kullanılan NaOH miktarı

**NOT:** Borik asit tartılmadan önce 50 °C' de 6 saat tutulur. Bulunan tüm F değerlerinin ortalaması alınır ve çıkan sonuç 17,41 ile çarpılarak F değeri bulunur.

**% 0,1'lik Metil Kırmızısı Hazırlanışı**

1gr metil kırmızısı tartılır. 750 ml etil alkolde iyice çözülür. Sonra adi süzgeç kâğıdından süzülür. Kâğıt alkolle yavaş yavaş yıkanır. Saf su ile 1lt'ye tamamlanır.

**0,1'lik Fenolftalein Hazırlanışı**

1gr fenolftalein tartılır. 750 ml etil alkolde çözülür. Saf su ile 1lt'ye tamamlanır.

**0,5N NaOH Hazırlanışı**

1lt için 20 gr, 20lt için 400 gr NaOH eklenir. Havadan nem kapmaması sağlanır. Bir beherin içine 20 gr NaOH eklenir. Üzerine hemen 1lt saf su ilave edilir. Bir karıştırıcı yardımıyla NaOH' ın çözülmesi sağlanır. Daha sonra hazırlanmak istenen miktar kadar saf su ilavesi yapılır ve 0,5N NaOH hazır hale gelir.

## EKLER 2. Deney Sonuçlarının Tabloları

**Ek Çizelge 1.** Numunenin mekanik+kimyasal dağıtma+yaş elemeye göre elek analizi

Elek Aralığı (mm)	% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Miktar %	Kümülatif		
			% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Elek Altı	% Verim
-0,3+0,2	43,6	2,86	43,6	100	4,65
-0,2+0,1	43	3,1	43,28	97,14	9,63
-0,1+0,5	43,4	4,78	43,33	94,04	17,37
-0,500+0,425	42,9	12	43,26	89,26	36,58
-0,425+0,250	42,76	5,4	43,16	77,26	45,20
-0,250+0,212	42,1	6	42,98	71,86	54,63
-0,212+0,150	41,1	4,21	42,77	65,86	61,09
-0,150+0,125	36,7	5,1	42,06	61,65	68,08
-0,125+0,106	36,4	6,2	41,35	56,55	76,50
-0,106+0,075	36,6	5,1	40,91	50,35	83,47
-0,075+0,053	35,4	4,45	40,49	45,25	89,35
-0,053+0,038	34	2,8	40,2	40,8	92,90
-0,038	5	38	26,43	38	100

**Ek Çizelge 2.** Numunenin elek analizi

Elek Altı (mm)	% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Miktar %	Kümülatif		
			% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Elek Altı	% Verim
-0,3+0,2	38,18	2,68	38,18	100	3,97
-0,2+0,1	40,49	2,13	39,20	97,32	7,32
-0,1+0,5	40,4	4,2	39,76	95,19	13,90
-0,500+0,425	38,12	6,45	39,07	90,99	23,45
-0,425+0,250	42,67	12,06	40,65	84,54	43,42
-0,250+0,212	39,22	2,1	40,54	72,48	46,62
-0,212+0,150	27,64	20,76	35,23	70,38	68,90
-0,150+0,125	29,26	1,7	35,03	49,62	70,83
-0,125+0,106	32,2	6,19	34,73	47,92	78,56
-0,106+0,075	33,86	3,45	34,68	41,73	83,10
-0,075+0,053	35,82	2,64	34,73	38,28	86,77
-0,053+0,038	35,9	0,7	34,74	35,64	87,75
-0,038	8,79	35,9	25,51	34,94	100

**Ek Çizelge 3.** Mekanik+kimyasal dağıtımdan sonra -0,150 mm'lik elek beslemesine göre numunenin tane boyutuna bağlı kümülatif B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve elek altı değişimi

Elek Altı (mm)	% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Miktar %	Kümülatif		
			% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Elek Altı	% Verim
-0,3+0,150	42,2	43,6	42,2	100	68,68
-0,150+0,125	36,7	7,1	41,42	56,4	9,72
-0,106+0,075	35,4	6,3	40,76	49,3	8,32
-0,075+0,053	36	3,4	40,49	43	4,56
-0,053+0,038	37	1,6	40,40	39,6	2,2
-0,038	4,6	38	26,79	38	100



**Ek Çizelge 4.** Köpürtücüye bağlı olarak tenör-verim değişimi

Köpürtücü Miktarı (ppm)		Miktar (%)	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Verim (%)
60	Konsantre	76,65	42,13	89,33
	Artık	23,35	16,52	10,76
	Besleme	100	36,15	100
70	Konsantre	82,5	41,83	93,90
	Artık	17,5	12,8	6,10
	Besleme	100	36,74	100
80	Konsantre	82	41,5	94,27
	Artık	18	11,5	5,73
	Besleme	100	36,10	100
90	Konsantre	83	41,89	94,98
	Artık	17	10,8	5,02
	Besleme	100	36,60	100

**Ek Çizelge 5.** Köpürtücü miktarına bağlı olarak hold-up, kabarcık çapı ve köpük kalınlığı (J<sub>ys</sub>: 0,2 cm/sn, J<sub>h</sub>: 0,5 cm/sn)

Köpürtücü (ppm)	Hold-up (%)	Kabarcık Çapı (mm)	Köpük Kalınlığı
60	15,38	0,69	4,5
70	17,11	0,511	5,3
80	18,88	0,49	6,1
90	22,3	0,488	6,7

**Ek Çizelge 6.** Toplayıcıya bağlı olarak tenör-verim değişimi

Toplayıcı Miktarı (g/t)		Miktar (%)	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Verim (%)
1500	Konsantre	80	40,17	88,59
	Artık	20	20,07	11,41
	Besleme	100	36,27	100
2000	Konsantre	82,5	40,98	93,52
	Artık	17,5	13,38	6,48
	Besleme	100	36,15	100
2500	Konsantre	79,9	42,9	94,82
	Artık	20,1	9,31	5,18
	Besleme	100	36,15	100
3000	Konsantre	76,65	42,13	89,33
	Artık	23,35	16,52	10,67
	Besleme	100	36,15	100
3500	Konsantre	78,65	41,27	89,7
	Artık	21,35	17,28	10,21
	Besleme	100	36,15	100

**Ek Çizelge 7.** Bastırıcıya bağlı olarak tenör-verim değişimi

Bastırıcı Miktarı (g/t)		Miktar (%)	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Verim (%)
0	Konsantre	75,6	41,57	86,94
	Artık	24,4	19,35	13,06
	Besleme	100	36,15	100
500	Konsantre	75,8	41,52	86,72
	Artık	24,2	19,92	13,28
	Besleme	100	36,29	100
600	Konsantre	82,4	42,2	96,19
	Artık	17,6	7,825	3,81
	Besleme	100	36,15	100
700	Konsantre	80,6	42,34	94,4
	Artık	19,40	10,43	5,6
	Besleme	100	36,15	100
800	Konsantre	79,9	42,9	94,82
	Artık	20,1	9,31	5,18
	Besleme	100	36,15	100
900	Konsantre	80,15	41,72	92,53
	Artık	19,85	13,66	7,57
	Besleme	100	36,15	100

**Ek Çizelge 8.** Bias faktörüne bağlı olarak tenör-verim değişimi

Bias faktörü		Miktar (%)	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Verim (%)
0,1	Konsantre	79,57	45,4	99,81
	Artık	20,43	0,34	0,19
	Besleme	100	36,19	100
0,3	Konsantre	79,9	42,9	94,82
	Artık	20,1	9,31	5,18
	Besleme	100	36,15	100
0,9	Konsantre	63,27	45,02	78,79
	Artık	36,73	20,87	21,21
	Besleme	100	36,15	100

**Ek Çizelge 9.** Hava hızına bağlı olarak tenör-verim değişimi

Hava Hızı (cm/sn)		Miktar (%)	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Verim (%)
0,5	Konsantre	78,65	45,9	99,86
	Artık	21,35	0,23	0,14
	Besleme	100	36,15	100
1	Konsantre	79,57	45,4	99,81
	Artık	24,43	0,34	0,19
	Besleme	100	36,19	100
1,5	Konsantre	83,51	40,2	91,51
	Artık	16,49	18,88	8,49
	Besleme	100	36,68	100

**Ek Çizelge 10.** Hava hızı artışına göre köpük kalınlığı, hold-up ve kabarcık çapı değişimi (J<sub>ys</sub>: 0,2 cm/sn, Q<sub>K</sub>: 60 ppm)

Hava Hızı (cm/sn)	Hold-up (%)	Kabarcık Çapı (mm)	Köpük Kalınlığı (cm)
0,25	12,2	0,656	2,8
0,5	15,38	0,69	4,5
0,75	17,31	0,699	5,2
1	21,15	0,838	6,1
1,25	26,2	1,003	8,8
1,5	33,3	1,217	11,7

**Ek Çizelge 11.** Katı oranına bağlı olarak tenör-verim değişimi

Katı Oranı %		Miktar (%)	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Verim (%)
5	Konsantre	78,5	45,6	99,02
	Artık	21,5	1,64	0,98
	Besleme	100	36,15	100
10	Konsantre	78,65	45,9	99,86
	Artık	21,35	0,23	0,14
	Besleme	100	36,15	100
15	Konsantre	78,5	40,14	87,17
	Artık	21,5	21,58	12,83
	Besleme	100	36,15	100

**Ek Çizelge 12.** Yıkama suyu hızına bağlı tenör verim değişimi

Yıkama Suyu Hızı cm/sn		Miktar (%)	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Verim (%)
0,2	Konsantre	78,65	45,9	99,86
	Artık	21,35	0,23	0,14
	Besleme	100	36,15	100
0,3	Konsantre	77	45,4	96,20
	Artık	23	6	3,8
	Besleme	100	36,33	100
0,4	Konsantre	72,50	46,4	92,86
	Artık	27,50	9,4	7,14
	Besleme	100	36,22	100

**EKLER 3. Flotasyon Deney Şekilleri****Ek Şekil 1. DPÜ flotasyon kolonu**



**Ek Şekil 2.** Flotasyon kolonunda kolemaniti zenginleştirme deneyleri





**Ek Şekil 3.** Flotasyon kolonunda kolemaniti zenginleştirme deneyleri



**Ek Şekil 4.** Flotasyon kolonunda kolemaniti zenginleştirme deneyleri (Konsantre ve artık alımı)



**Ek Şekil 5.** Flotasyon beslemesi, konsantre, artık

## ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Kütahya'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kütahya'da tamamladı. 2002 yılında Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2007 yılında lisans eğitimini tamamlamış olup, 2008 yılında aynı üniversitede Cevher Hazırlama üzerine yüksek lisansa başladı. 2010 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı.