



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ULTRASONİK VE MİKRODALGA ENERJİLERİNİN
KOLEMANİT FLOTASYONUNDA ÖN İŞLEM OLARAK
KULLANMA OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI**

**Maden Müh. Can GÜNGÖREN
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Maden Mühendisliği Programı**

**Danışman
Prof.Dr. Şafak G. ÖZKAN
Haziran, 2009**

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ULTRASONİK VE MİKRODALGA ENERJİLERİNİN
KOLEMANİT FLOTASYONUNDA ÖN İŞLEM OLARAK
KULLANMA OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI**

**Maden Müh. Can GÜNGÖREN
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Maden Mühendisliği Programı**

**Danışman
Prof.Dr. Şafak G. ÖZKAN
Haziran, 2009**

İSTANBUL

Bu çalışma 22/06/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Maden Mühendisliği programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi



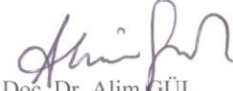
Prof. Dr. Şafak G. ÖZKAN (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



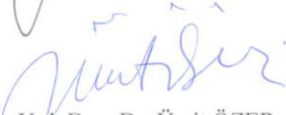
Prof. Dr. N.Enver ÜLGER
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Ataç BAŞÇETİN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Alim GÜL
İstanbul Teknik Üniversitesi
Maden Fakültesi



Yrd. Doç. Dr. Ümit ÖZER
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin T-2276 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bana bu çalışmayı yapma olanağı sağlayan, danışmanlığımı üstlenen ve çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana her zaman destek olan, danışmanım ve Bölüm Başkanımız Sayın **Prof. Dr. Şafak ÖZKAN**'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca her ihtiyaç duyduğumda değerli zamanlarını ayırıp bilgilerini paylaşan Sayın **Arş. Gör. Dr. Kenan ÇINKU** ve Sayın **Arş. Gör. Dr. M. Faruk ESKİBALCI**'ya teşekkür ederim.

Gerek numune temini gerekse analizlerde büyük kolaylık sağlayan Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne, Eti Maden A.Ş. Emet Bor İşletmesi Müdür Yardımcısı (Teknik) Sayın **Dr. Mehmet SAVAŞ**'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sırasında bana destek olan Sayın **Arş. Gör. İsmail DEMİR**, Sayın **Arş. Gör. Mehmet AKSOY** ve Sayın **Arş. Gör. Deniz ADIGÜZEL** başta olmak üzere beraber çalışma fırsatı bulduğum tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren ve bu seviyeye gelmemi sağlayan babam **Fethi GÜNGÖREN**'e, annem **Canan GÜNGÖREN**'e ve babaannem **Hediye GÜNGÖREN**'e teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran, 2009

Can GÜNGÖREN
Maden Mühendisi

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	vii
ÖZET.....	viii
SUMMARY	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. TANIM.....	1
1.2. MİKRODALGALAR	4
1.2.1 Mikrodalgalar Hakkında Genel Bilgiler.....	4
1.2.2 Mikrodalga İle Isıtmanın Teorisi.....	7
1.2.3 Mikrodalga Isıtmaya Etki Eden Parametreler	10
1.2.4. Mikrodalga Fırının Tarihçesi	13
1.2.5. Mikrodalga Fırınların Çalışması.....	14
1.2.6. Mikrodalga Fırının Bileşenleri	15
<i>1.2.6.1. Güç Ünitesi</i>	<i>15</i>
<i>1.2.6.2 Mikrodalga Üretici (Magnetron)</i>	<i>15</i>
<i>1.2.6.3. Dalga Kılavuzu</i>	<i>16</i>
<i>1.2.6.4 Karıştırıcı.....</i>	<i>17</i>
<i>1.2.6.5. Aplikatör (Fırın oyuğu).....</i>	<i>17</i>
1.2.7. Mikrodalga Gücü ve Isıtma Hızı	18
1.2.8 Mikrodalga Isıtmanın Avantaj ve Dezavantajları	18
<i>1.2.8.1. Avantajları</i>	<i>18</i>

1.2.8.2. Dezavantajları.....	19
1.2.9. Mikrodalga İle Yapılan Çalışmalar.....	20
1.2.10. Minerallerin ve İnorganik Ürünlerin Mikrodalga ile Isıtılması.....	20
1.2.11. Cevherlerin Mikrodalga Destekli Flotasyonu.....	22
1.3. ULTRASES.....	23
1.3.1. Ultrases Spektrumu.....	23
1.3.2. Ultrasonik Enerjinin Üretilmesi ve Algılanması.....	24
1.3.3. Ultrases Dalgalarının Elde Edilmesi.....	24
1.3.4. Ultrases Dalgaları.....	25
1.3.4.1. Dalga Hareketi.....	25
1.3.4.2. Dalga Çeşitleri.....	26
1.3.5. Kavitasyon (Oyuklanma) Etkisi.....	29
1.3.5.1. Kavitasyon Kabarcık Modelleri ve Tipleri.....	30
1.3.5.2. Kavitasyonun Katı Yüzeyindeki Etkileri.....	30
1.3.6. Ultrases Üretilmesi ve Kullanım Alanları.....	33
1.3.6.1. Ultrases Kaynakları.....	33
1.3.6.2. Ultrasesin Kullanıldığı Yerler.....	35
1.3.7. Ultrasesin Cevher Hazırlamada Kullanımı.....	38
1.4. FLOTASYON.....	54
1.5. BOR MİNERALLERİ.....	55
1.5.1. Bor Mineralleri Hakkında Genel Bilgiler.....	55
1.5.2. Bor'un Tarihçesi.....	56
1.5.3. Bor Mineralinin Özellikleri.....	56
1.5.4. Bor Cevherlerinin Kullanım Alanları.....	60
1.5.5. Dünya Bor Rezervleri.....	62
1.5.6. Türkiye' de Bor Yatakları.....	65
1.5.7. Bor Teknolojileri.....	67
1.5.8 Bor Üretiminden Kaynaklanan Çevre Sorunları.....	67
1.6. EMET BOR İŞLETME MÜDÜRLÜĞÜ.....	68
1.6.1 Tarihi ve Kuruluşu.....	69
1.6.2 Emet Bor İşletme Müdürlüğünde Bulunan Üretim Tesisleri.....	70
1.6.2.1 Hisarcık Açık Ocak Tesisi.....	70

1. 6.2.2 Hisarcık Konsantratör Tesisi	70
1.6.2.3 Espey Açık Ocak Tesisi	73
1.6.2.4 Espey Konsantratör Tesisi	74
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	77
2.1 DENEYSEL ÇALIŞMALARA ESAS OLAN NUMUNE	77
2.2. ZENGİNLEŞTİRME ÖNCESİ İŞLEMLER	79
2.2.1. Numune Nem Tayini.....	79
2.2.2. Tane Boyut Dağılımı Tespiti	82
2.2.3. Öğütme Deneyleri ve Optimum Öğütme Sürelerinin Bulunması	84
2.2.4. Serbestleşme Tane Boyutu Tespiti.....	87
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	88
3.1. KOLEMANİT MİNERALİNİN FLOTASYON KARAKTERLERİNİN İNCELENMESİ	90
3.2. KOLEMANİT MİNERALİNİN MİKRODALGA ÖNİŞLEMLİ FLOTASYON KARAKTERLERİNİN İNCELENMESİ	91
3.3. KOLEMANİT MİNERALİNİN ULTRASONİK ÖNİŞLEMLİ FLOTASYON KARAKTERLERİNİN İNCELENMESİ	93
3.4. 0,038 MM ALTI CEVHERDEN -0,010 MM'İN DEKANTASYONLA UZAKLAŞTIRILMASI.....	94
3.5. FLOTASYON DENEY SONUÇLARI.....	96
4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	103
KAYNAKLAR.....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	112

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1 1: Elektromanyetik spektrum.....	4
Şekil 1 2: Mikrodalga ve konvansiyonel ısıtma mekanizmaları	7
Şekil 1 3: Malzemelerin mikrodalga ile etkileşimi	9
Şekil 1 4: a,b Konvansiyonel ve mikrodalga fırınlarda ısıtma paternleri	10
Şekil 1 5: a,b Mikrodalga fırın içindeki sıcak-soğuk noktaların dağılımı.....	10
Şekil 1 6: Mikrodalga ısıtma sisteminin basitleştirilmiş diyagramı.....	14
Şekil 1 7: Bir mikrodalga fırının yapısı	14
Şekil 1 8: Sanayi tipi konveyörlü mikrodalga fırın.....	18
Şekil 1 9: Ultrases spektrumu	23
Şekil 1 10: (a) Ultrasonik banyo ve (b) ultrasonik prop.....	25
Şekil 1 11 (a-e) Titreşim hareketinin dalgasal gösterimi	26
Şekil 1 12: Ses ötesi dalga çeşitler	27
Şekil 1 13: Ses Dalgalarının Oluşturduğu Sıkışma ve Gevşeme Evreleri	29
Şekil 1 14: Sirenler.....	34
Şekil 1 15:Çözünabilir kirleticilerin ultrasonik sistem yardımı ile yüzeyden uzaklaştırma mekanizması.....	37
Şekil 1 16: Çözünmeyen kirleticilerin yüzeyden uzaklaştırılması.....	38
Şekil 1 17: Kolemanit kristalinin görünümü	55
Şekil 1 18: Bor bileşikleri ve kullanım alanları	62
Şekil 1 19: Dünya üzerinde bor rezervlerinin bulunduğu bölgeler	63
Şekil 1 20: Hisarcık konsantratör tesisi akım şeması.....	73
Şekil 1 21: Espey konsantratör tesisi akım şeması.....	76
Şekil 2 1: Kütahya-Emet Bor İşletmesi'nin bulunduğu bölgenin uydu fotoğrafı	78
Şekil 2 2: Espey numuneleri nem analizleri.....	80
Şekil 2 3: Hisarcık numuneleri nem analizleri.....	81
Şekil 2 4: Numunelerin elek analizleri.....	83
Şekil 2 5: Numunelerin öğütme sonrası elek analizleri	86

Şekil 2 6 a-d. Numunelerin öğütme sonrası d_{50} ve d_{80} boyutları	87
Şekil 3 1: Hisarcık ve Espey Ocakları'ndan alınan 0-3 mm numunelere uygulanan genel cevher zenginleştirme akım şeması.....	89
Şekil 3 2: Flotasyon Fotoğrafları.....	91
Şekil 3 3: Kolemanitin mikrodalgada zamana bağlı sıcaklık değişimleri.....	92
Şekil 3 4: Deneyleerde kullanılan Arçelik MD595 marka mikrodalga fırın	93
Şekil 3 5: Infrared termometre	93
Şekil 3 6: Deneyleerde Kullanılan Ultrasonik Banyo.....	94
Şekil 3 7: Espey Ocağı Numunelerinin Konvansiyonel, Ultrasonik ve Mikrodalga Önişlemlili Flotasyon % B_2O_3 Tenör ve Verimleri.....	97
Şekil 3 8: Hisarcık Ocağı Numunelerinin Konvansiyonel, Ultrasonik ve Mikrodalga Önişlemlili Flotasyon % B_2O_3 Tenör ve Verimleri.....	98
Şekil 3 9: Espey Ocağı Numunelerinin Konvansiyonel, Ultrasonik ve Mikrodalga Önişlemlili Flotasyon % Fe_2O_3 Tenör ve Verimleri	99
Şekil 3 10: Hisarcık Ocağı Numunelerinin Konvansiyonel, Ultrasonik ve Mikrodalga Önişlemlili Flotasyon % Fe_2O_3 Tenör ve Verimleri	100
Şekil 3 11: Espey Ocağı Numunelerinin Konvansiyonel, Ultrasonik ve Mikrodalga Önişlemlili Flotasyon % As_2O_3 Tenör ve Verimleri	101
Şekil 3 12: Hisarcık Ocağı Numunelerinin Konvansiyonel, Ultrasonik ve Mikrodalga Önişlemlili Flotasyon % As_2O_3 Tenör ve Verimleri	102

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 1: Elektromanyetik spektrumun genel sınıflaması.....	5
Tablo 1 2: ISMI uygulamaları için ayrılan frekanslar.....	6
Tablo 1 3: Ultrases uygulama alanları	35
Tablo 1 4: Ultrases Kullanan Bazı Endüstriler	36
Tablo 1 5: Ticari öneme sahip bor mineralleri (USGS, 2006).....	57
Tablo 1 6: En yaygın bor mineralleri ve özellikleri	58
Tablo 1 7: Ticari önemi olan bor mineralleri ve bileşiklerinin önemli kullanım alanları [49].....	61
Tablo 1 8: Dünya bor rezervleri (x1000)	63
Tablo 1 9: Dünya bor üretimleri	64
Tablo 1 10: 1999 Yılı dünya bor üretimi ve pazar payları.....	65
Tablo 1 11: Türkiye’de bulunan bor mineralleri ve B ² O ³ içerikleri.....	66
Tablo 2 1: Alınan numunelerin analiz sonuçları	79
Tablo 2 2: Numunelerin d ₅₀ -d ₈₀ boyutları	84

ÖZET

ULTRASONİK VE MİKRODALGA ENERJİLERİNİN KOLEMANİT FLOTASYONUNDA ÖN İŞLEM OLARAK KULLANMA OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

Bu tez çalışmasına konu olan numuneler, Kütahya’da bulunan Eti Maden A.Ş. Emet Bor İşletme Müdürlüğü’nden temin edilmiştir. Çalışmanın amacı yeterli tenörlerde olmayan ve yıllardır stoklanan bu cevherlerin zenginleştirilerek ülke ekonomisine kazandırılmasıdır. Zenginleştirme deneylerine konu olan numuneler konsantratör çıkışı fakat yeterli % B_2O_3 tenörüne ulaşamamış 0-3 mm fraksiyonundaki cevherleridir.

Cevherler İ.Ü. Maden Mühendisliği Cevher Hazırlama Laboratuvarı’na getirildikten sonra öncelikle nem elek ve öğütme analizleri yapılmıştır.

Flotasyon deneyleri mikrodalga ve ultrasonik ön işlemlerin kolemanit flotasyonundaki etkisini saptamak amacıyla 3 yöntem halinde yapılmıştır. İlk aşamada konvansiyonel flotasyon deneyleri yapılmıştır. Daha sonra ultrasonik ve mikrodalga ön işlemler görmüş numuneler flote edilmiştir. Ayrıca, şlamın flotasyon üzerindeki negatif etkisi bilindiğinden öncelikle 0,038 mm şlam olarak atılmış serbestleşme boyutunun altındaki -0,250 +0,038 mm; numunelere flotasyon yapılmıştır. Daha sonra şlama geçen kolemanitleri kazanabilmek için -0,038 +0,000 mm numuneler flotasyona tabii tutulmuştur. Son olarak ise şlama geçen kolemaniti kazanmak için, flotasyonu olumsuz etkilediği düşünülen kil minerallinin düşük tane boyutlarında toplanması sebebiyle, 38 mikron altındaki numunelerden 10 mikron altı dekantasyonla atılmış ve -0,038+0,010 mm numuneler elde edilerek bunların flotasyonu yapılmıştır. Her üç fraksiyon da konvansiyonel, ultrasonik ve mikrodalga ön işlemler olmak üzere 3 farklı yöntemle flote edilmiştir.

Her iki ocaktan alınan cevherler üzerinde yapılan çalışmalarda da ultrasonik önişlemin % B₂O₃ tenörü ve verimi açısından olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir.

Mikrodalga önişlem görmüş numunelere uygulanan flotasyon deneylerinde ise konvansiyonel ve ultrasonik önişlemlili flotasyona kıyasla biraz daha düşük % B₂O₃ tenör ve verim değerlerine ulaşılmıştır.

SUMMARY

INVESTIGATION OF USE OF ULTRASONIC AND MICROWAVE ENERGIES AS PRE-TREATMENT IN COLEMANITE FLOTATION

The samples which were studied in this thesis, were taken from Eti Mines Inc. Emet Boron Works in Kutahya Province of Turkey. The aim of this study is beneficiation possibility of 0-3 mm samples which has not adequate B₂O₃ % grades and have been stocked for years.

The samples were brought to I.U. Mining Engineering Department Mineral Processing Laboratory. Firstly, moisture, sieve and grinding analysis were carried out.

The flotation tests were carried out with three methods to determine the effects of microwave and ultrasonic pre-treatments. As a first step the conventional flotation tests were carried out. Then ultrasonic or microwave energy was introduced to the samples before flotation.

Furthermore, minus 0.038 mm was removed because of the negative sliming effect on flotation and consequently flotation tests were carried out on -0.250 +0.038 mm samples. The slimes, -0.038 +0.000 mm samples were tried to be floated to gain the very fine colemanite particles. Finally, -10 micrometer was decanted from -38 micrometer samples with siphoning in order to get a flotation feed at -0.038+0.010 mm. All of the three fractions were floated with three different methods which are conventional, ultrasonic pre-treatment and microwave pre-treatment.

It is clearly seen that the ultrasonic pre-treatment has positive effects on B₂O₃ % grade and yield for the both samples. Microwave pre-treatment has some negative effects on flotation.

1. GİRİŞ

1.1. TANIM

İlkçağlardan beri insan yer üstü ve yer altı kaynaklarından çeşitli yollarla faydalanarak yaşamını sürdürmektedir. Kendisine yeter olandan daha fazlasına sahip olan veya daha fazlasını üretenler bunları diğer insanların kullanımına sunarak onların ürettiklerine sahip olma şansını elde etmişlerdir. Bu insanların çeşitli nedenlerle oluşturdukları birlikler yani toplumlar için de doğrudur. Kendi öz kaynaklarından maksimum şekilde faydalanamayan toplumlar, kendi kendilerine yeter duruma gelemeyip, yok olmaya mahkûm olacaktırlar. Toplumların kalkınmışlık düzeyinin belirleyicisi olan enerji, tarım ve sanayi üretimlerinin hammaddelerini madenler oluşturmaktadır. Günümüzün gelişmiş ülkeleri önce maden kaynaklarını harekete geçirmişler, daha sonra da, endüstrileşerek bu günkü sanayileşmiş konumlarına ulaşmışlardır. Hammadde kaynaklarını elde etmek, ülkeler arasında başlıca politik antlaşmazlık ve sorunların kilidi olmakta, hatta savaş ve işgallerin bile ana sebeplerinden sayılmaktadır. Ülkemiz ise önemli maden kaynaklarına sahip olmasına karşın, bunları yeterince işletemediğinden endüstrileşememiştir. Anadolu'dan çok sayıda medeniyetin geçmiş olması antik çağlardan beri üretilmiş olan maden kaynaklarına dayanmaktadır. Özellikle altın, gümüş, bakır, kurşun, demir, kil ve mermerin çokça üretildiği bilinmektedir. Arama ve madencilik çalışmaları yetersiz olduğu halde, bor mineralleri, toryum, zeolit, selesit, trona, pomza ve mermer gibi madenlerin de dünya rezervlerinin büyük miktarı ülkemizde bulunmakta, bor mineralleri ve selesit üretiminde ilk sırada, krom, manyezit, barit, ve kil minerallerinde de söz sahibi bir ülke konumundadır.

Madencilikte yeni rezervlerin bulunması, maden yataklarının ekonomik olarak işletilmesi cevher hazırlama teknolojilerinin uygulanması ile mümkün hale gelmektedir. Ülkemizde, cevher hazırlama teknolojisinin yeterince gelişmemiş olması, madenlerin ekonomik olarak işletilmesini engellemektedir. Ülkemizin geleceği, katma değeri yüksek olan doğal kaynakların değerlendirilmesine ve madencilik üretimlerinin

geliştirilmesine bağlıdır. Bu süreçte cevher hazırlamanın önemi açıktır. Cevher hazırlama; bir cevherdeki çeşitli mineralleri endüstrinin gereksinimine uygun hammadde haline getirmek ve ekonomik değer taşıyanları ekonomik değeri olmayanlardan ayırmak için yapılan işlemleri kapsar. Ülkemizde bulunan cevher hazırlama tesislerinin önemli bir bölümü düşük performansla işletilmektedir. Bu duruma tesislerdeki teknolojinin çok eski olmasının yanı sıra cevher hazırlama bilgisinin eksikliği ve yetişmiş eleman azlığı neden olmaktadır. Ülkemiz rezervlerini daha ekonomik değerlendirebilmek için yeni cevher hazırlama yöntemlerinin araştırılması, mevcut yöntemlerin geliştirilerek işletilen cevher yatağının özelliklerine göre modifiye edilmesi gerekmektedir.

Bu amaca yönelik olarak mikrodalga ve ultrasonik dalga enerjilerinin cevher hazırlama işlemlerinde yeni bir yöntem veya yardımcı bir sistem olarak araştırılması düşünülebilir [1].

Dalgalar genel olarak, mekanik ve elektromanyetik dalgalar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Elektromanyetik dalgalar, yayılmak için bir ortama ihtiyaç duymazlar ve boşlukta da yayılabilirler. Mekanik dalgalar ise, enerjilerini aktarabilmek için ortam taneciklerine ihtiyaç duyarlar. Bu yüzden boşlukta (örneğin uzayda) yayılamazlar. Ses dalgaları da mekanik dalgalar olduklarından yayılmak için maddesel bir ortama ihtiyaç duyarlar.

Ses, nesnelere titreşiminden meydana gelen ve uygun bir ortam içerisinde (hava, su vb.) bir yerden başka bir yere, sıkışma (compressions) ve genişmeler (expansions) şeklinde ilerleyen bir dalgadır. Dolayısıyla ses, bir basınç dalgasıdır [2].

Eğer uyarılan salınımlar dalganın hareket yönüne paralel ise sözkonusu dalganın 'boyuna' (longitudinal), dik ise 'enine' (transverse) dalga olduğu söylenir. Örneğin ses dalgaları, yolları üzerindeki atom veya molekülleri hareketleri doğrultusunda salıncırdıklarından, boyuna dalgalardır [3].

Frekanslarına göre, boyuna mekanik dalgalar, üç gruba ayrılır:

İşitilebilir dalgalar, insan kulağının duyarlılık sınırları içinde olan ses dalgalarıdır. Bu dalgalar 20 Hz ile 20.000 Hz frekansları arasındadır. Bu sesler, müzik aletleri, hoparlör gibi değişik cihazlar ve ses telleri tarafından yaratılabilirler.

Sesaltı (infrasonic) dalgalar, işitilebilir mertebenin altındaki frekansta olan boyuna dalgalardır. Deprem dalgaları bu dalgalara örnektir.

Sesüstü (ultrasonik) dalgalar, işitilebilir mertebenin üstünde frekansları olan boyuna dalgalardır. Örneğin, bu dalgalar, bir kuvars kristaline, alternatif elektrik alanının uygulanmasıyla elde edilebilir [4].

Elektromanyetik dalgalar ise ses dalgalarından farklı olarak yayılmak için maddesel bir ortama ihtiyaç duymazlar. Yani havada, katıda ve hatta uzayda yayılabilirler. Elektrik ve manyetizma durgun (statik) halde olabilir. Ancak hareket halindeki elektrik ve manyetik yükleri elektromanyetik dalgayı oluşturur. Elektromanyetik dalgalar farklı dalga boylarına sahiptir ve dalga boylarına göre isimlendirilirler. Elektromanyetik spektrum, en uzun dalga boyundan en kısa dalga boyuna şu grupları kapsar:

- Radyo dalgaları,
- Mikro dalgalar,
- İnfrared dalgalar,
- Optik dalgalar,
- Ultraviöle dalgaları,
- X-ışını dalgaları ve
- Gama dalgaları.

Mikrodalgaların dalgaboyu yaklaşık 0,3-30 cm arasındadır ve hava, ışık, bulut, sis gibi maddesel ortamlardan etkilenmemeleri sebebiyle başta radarlar olmak üzere bilgi aktarımında kullanılırlar. Bundan başka mikrodalga fırınlarda ısıtma amaçlı kullanımına sıkça rastlanır.

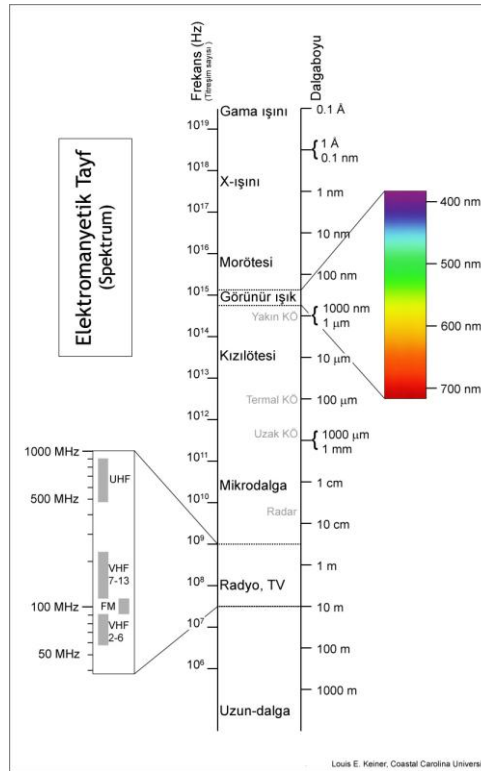
Flotasyon günümüzde, cevher hazırlama ve zenginleştirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Son yıllarda flotasyonu teknolojik ve ekonomik yönden geliştirmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaca yönelik olarak bu çalışmada öncelikle mikrodalga ve ultrasonik dalga enerjileri hakkında genel bilgiler verilerek bir

bor minerali olan kolemanitin flotasyonla kazanılması üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için flotasyon deneylerine bir ön işlem olarak uygulanmışlardır [5].

1.2. MİKRODALGALAR

1.2.1 Mikrodalgalar Hakkında Genel Bilgiler

Mikrodalgaların temelinde elektromanyetik dalgalar vardır. Elektromanyetik dalgalar ses dalgalarına benzemezler çünkü ortamda hareket etmek için moleküllere ihtiyaçları yoktur. Bu elektromanyetik dalgaların hava içinde, katı ortam içinde ve uzay boşluğu içinde seyahat edebileceği anlamına gelmektedir. Şekil 1.1'de bir elektromanyetik spektrumun dalga boyuna bağlı olarak aldığı isimler şematik olarak verilmiştir [6].



Şekil 1 1: Elektromanyetik spektrum [8]

Tablo 1.1'de Elektromanyetik spektrumun genel sınıflaması verilmiştir. Mikrodalga fırının frekansları 950 MHz ile 2450 MHz arasındadır. Radyo dalgaları 1 metreden başlayarak yüz hatta bin metrelerle ifade edilen dalga boylarına sahip iken gözle görebildiğimiz ışık 400 -750 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), mikrodalgalar ise 1 mm ile 1 m arasında dalga boyuna sahiptirler [7].

Tablo 1 1: Elektromanyetik spektrumun genel sınıflaması [7]

	Fotonun Bölgesi	Dalga Boyu	Frekans (Hz)	Foton Enerjisi
İyonlaştıran	Gama Işını	0.00005 nm	6×10^{21}	25 MeV
Radyasyon	X- Işını	0.05 nm	6×10^{18}	25 keV
	Ültraviyole	100 nm	3×10^{15}	12 eV
İyonlaştırmayan	Görünür	550 nm	5×10^{14}	2 eV
	Kızılötesi	10 μ m	3×10^{13}	120meV
Radyasyon	Mikrodalga	1 cm	3×10^{10}	120 μ eV
	Radyo Dalgası	1km	3×10^5	1 neV

Mikrodalgalar 300 MHz ile 300 GHz arasında yayılan elektromanyetik dalgalardır. Her elektromanyetik dalga gibi birbirine dik elektrik ve manyetik bileşenleri vardır. Mikrodalgalar ışık dalgaları, radyo dalgaları gibi diğer elektromanyetik dalgalardan dalga boyu ve frekanslarıyla ayrılırlar. Mikrodalgaların dalga boyları 0,025-0,75 m arasındadır ve radyo dalgalarıyla kızıl ötesi radyasyon arasında bulunurlar [2].

Mikrodalga ısıtma sistemlerinde elektromanyetik enerji madde içerisinde doğrudan ısıya dönüşmektedir. Bu nedenle mikrodalga ısıtma sistemlerinde ısı, konvansiyonel sistemlerin tam tersine maddenin içinden dışına doğru taşınır. Materyalin iç bölümleri yüzeyinden daha sıcaktır, bu yüzden suyun içten dışa buharlaşması ve difüzyonu daha basittir. Kurutma boyunca malzemede kabuk oluşumu görülmez ve su kolayca buharlaşır. Malzemenin ısıtılması kimyasal ve fiziksel yapısına bağlıdır. Bu tip ısıtma sistemlerinde ısı; su moleküllerinin rezonansa girmesi ve büyük kayıp açalarına sahip (dielektrik) maddelerin iletim kayıplarının oluşması ile açığa çıkmaktadır. Bu sistem ile konvansiyonel ısıtma sistemleri karşılaştırıldığında ısıtma veya kurutma süresinin çok daha kısa olduğu ve daha homojen bir ısıtma ve kurutma sağladığı görülür. Aynı zamanda bu yöntemle sadece malzeme ısıtılmaktadır. Ocağı, iletim grubunu ve

ortamdaki havayı ısıtmaya gerek yoktur. Mikrodalga enerjisi; genellikle ön ısıtma, kurutma ve dehidrasyon için uygulanmaktadır [7].

Mikrodalga enerjisi, 300 MHz ile 300 GHz arasında değişen frekansa sahip, iyonlaşmayan elektromanyetik dalgalardır. Mikrodalga frekansı,

- Ultra Yüksek Frekans (UHF: 300 MHz – 3 GHz)
- Süper Yüksek Frekans (SHF: 3GHz - 30 GHz)
- Aşırı Yüksek Frekans (EHF: 30 GHz – 300 GHz)

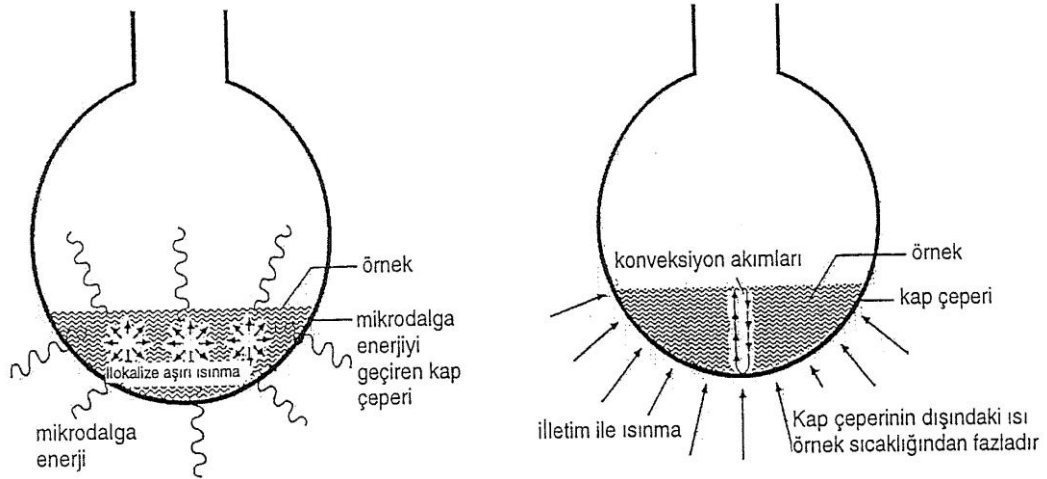
Olmak üzere 3 bant içerirler. İletişim alanında da yaygın uygulamaları olan mikrodalgalar, Federal İletişim Komisyonu (Federal Communication Commission, FCC) tarafından endüstriyel, bilimsel, tıbbi ve enstrümantasyon (ISMI) uygulamaları için belirli frekanslara ayrılmıştır. Tablo 1.2’de ISMI frekansları görülmektedir [1].

Tablo 1 2: ISMI uygulamaları için ayrılan frekanslar [1]

Frekans (MHz)	Frekans Toleransı (\pm)	İzin Veren Ülke
0,07	10 kHz	Rusya
13,56	0,05%	Tüm Dünya
27,12	0,60%	Tüm Dünya
40,68	0,05%	Tüm Dünya
42, 49, 56, 61, 66	0,20%	İngiltere
84,168	0,01%	İngiltere
		Avusturya, Hollanda, Portekiz, Almanya, İsviçre, Yugoslavya
432,92	0,20%	
896	10 MHz	İngiltere
915	13 MHz	Kuzey ve Güney Amerika
		Arnavutluk, Bulgaristan, Macaristan, Romanya, Rusya
2375	50 MHz	
		Tüm Dünya (2375 MHz'in kullanıldığı ülkeler hariç)
2450	50 MHz	
3390	0,60%	Hollanda
5800	75 MHz	Tüm Dünya
6780	0,60%	Hollanda
24150	125 MHz	Tüm Dünya

1.2.2 Mikrodalga İle Isıtmanın Teorisi

Konvansiyonel ısıtma sistemlerinde ısı transferi iletim, konveksiyon ve ışıma olmak üzere üç yolla gerçekleşmektedir. Örneğin, konvansiyonel bir fırındaki malzemenin ısınması için önce fırının iç duvarları ısınacak daha sonra ortamdaki ısı iletim, konveksiyon ve/veya ışıma yoluyla malzemeye iletilecek ve malzeme dış yüzeyinden merkezine doğru ısınacaktır. Mikrodalga ısıtma sistemlerinde ise mikrodalgalar, malzemedeki iyonların taşınması nedeniyle moleküler harekete ve/veya dipolar moleküllerin dönmesine ve iç sürtünmeye neden olurlar. Bu moleküler hareket sonucunda mikrodalga fırın içindeki malzemeler ısınır. Şekil 1.2.'de bir kap içerisindeki suyun ısıtılmasında mikrodalga ısıtma ile konvansiyonel ısıtma mekanizmaları arasındaki fark şematik olarak gösterilmektedir [5].



Şekil 1.2: Mikrodalga ve konvansiyonel ısıtma mekanizmaları [5]

Mikrodalgada kullanılan elektron tüplerinin tümünün dayandığı bir ana prensip vardır. Bir bataryanın uçlarındaki potansiyel enerji, hızla hareket eden bir elektron demeti veya ısı akısı içindeki elektronlara aktarılır. Bu elektron demeti uygun bir mikrodalga sisteminin zamanla değişen alanları ile girişim yapar. Eğer elektronların hızları alanla olan bu girişimden sonra yavaşlarsa kinetik enerji elektronlardan alınmış ve alana verilmiş olur. Yani sürekli rejimde tüp, mikrodalga alanını besler. Tüpler genel olarak iki sınıfta toplanabilir. Birincilerde elektron demeti ile alan arasındaki girişim sadece küçük bir bölgede olur. Buna klistron tüpü bir örnektir. İkincilerde ise girişim elektronların yolu boyunca olur. Magnetron ve yürüyen dalgalı tüpleri bu sınıftadır [4].

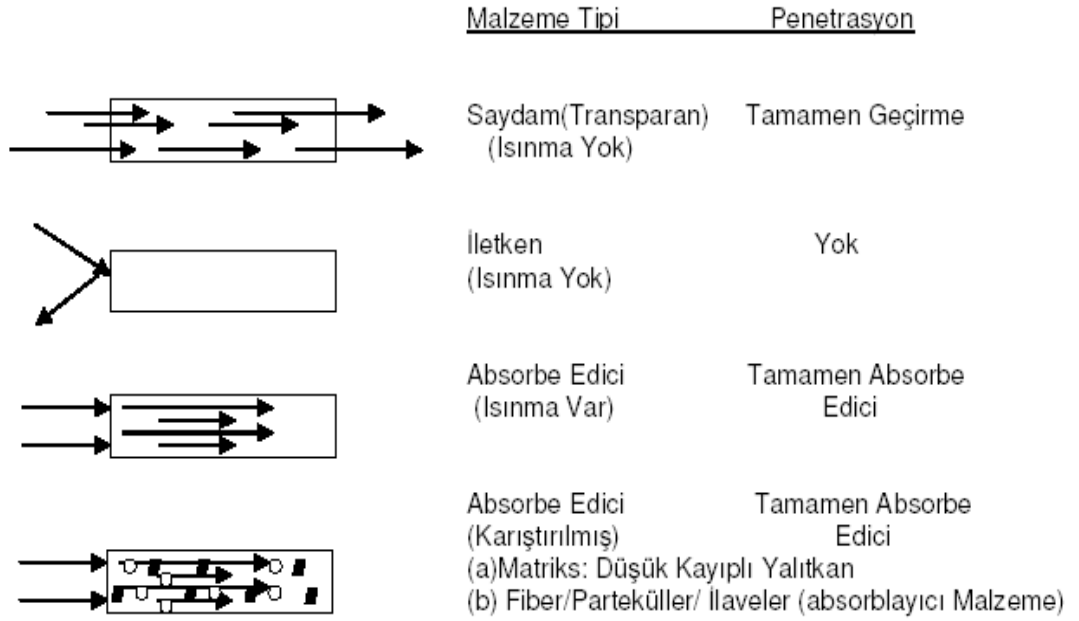
Magnetron geliştirilen ilk yüksek güçlü mikrodalga osilatörüdür. İkinci Dünya Savaşı'nda mikrodalga radarlarının kullanılması magnetron sayesinde mümkün olmuştur. Halen 1 GHz'i aşan frekanslarda en güçlü kaynaklar magnetron osilatörleridir. Kilowatlar mertebesinde sürekli güç üretebilirler [4].

Mikrodalgalar metal yüzeylerinden yansdııkları için metaller ısınmazlar. Genel olarak metaller yüksek iletkenliğe sahiptir ve bu yüzden iletken olarak sınıflandırılırlar. İletkenler, ısınma olmadığı için mikrodalga fırınlar içinde dalga kılavuzu amacıyla kullanılmaktadır.

Mikrodalgalar için saydam malzemeler ise yalıtkan olarak sınıflandırılmaktadır. Örneğin; cam, seramik ve hava gibi, bunlar mikrodalgayı geçirirler veya çok az ısınırlar. Yalıtkan malzemeler ise mikrodalga fırınlar içerisinde malzemenin ısınmasını desteklemek için sıklıkla kullanılmaktadır.

Mikrodalga enerjisinin en iyi absorblandığı malzemeler kolaylıkla ısıtılabilir ve bu malzemeler "dielektrikler" olarak sınıflandırılmaktadır. Su molekülleri içeren maddeler bunlara örnek olarak verilebilir.

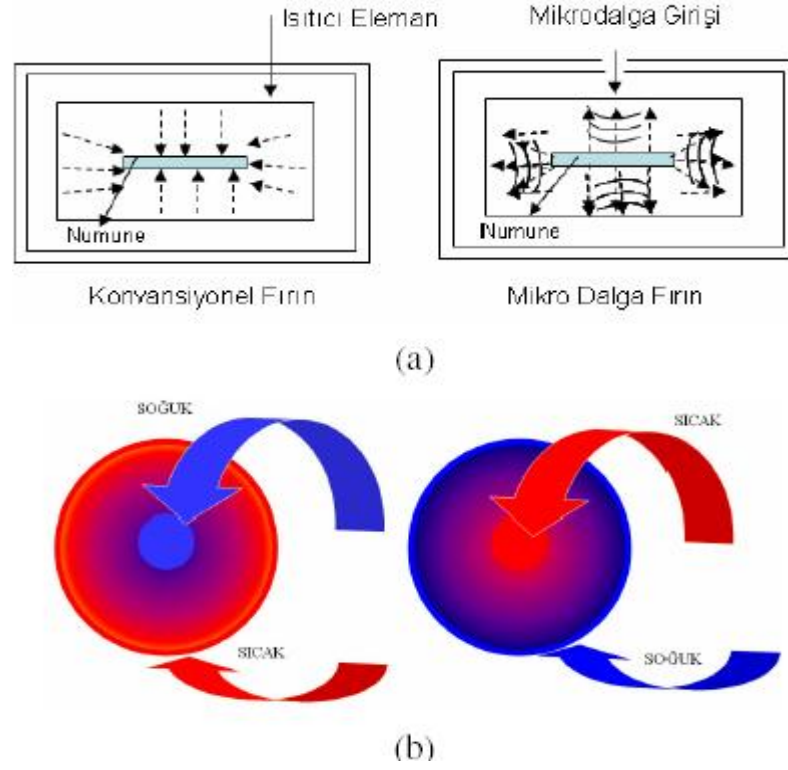
Dördüncü tip malzeme türü matriks yapı dediğimiz bir kısmı yüksek kayıplı malzeme iken diğer kısmı düşük kayıplı malzemedir. Bu tür malzemeler mikrodalga ısıtma teknolojisinde selektif ısıtma açısından önemli avantajlar sağlamaktadır ki, konvansiyonel yöntemlerde selektif ısıtma söz konusu olmamaktadır. Şekil 1.3'te malzemelerin mikrodalga enerji ile etkileşimi gösterilmektedir [7].



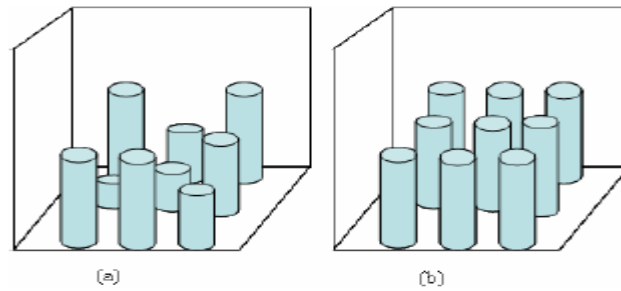
Şekil 1 3: Malzemelerin mikrodalga ile etkileşimi [7]

Dielektrik özellik bakımından homojen olmayan malzemeler düzenli ısıtma yapmazlar. Malzemenin bir kısmı diğer kısmından daha fazla ısınır. Bu olay genellikle ısı kaybı olarak bilinir. Bu durum, örneğin iyice karıştırılması ya da akıcı hale getirilmesi şartları sağlanarak minimize edilebilir.

Yarı iletken malzemelerde mikrodalga ısıtmanın verimliliği ilk sıcaklığına bağlıdır. Gerçekte belirli kritik sıcaklıkların üzerinde aynı yalıtkan malzemeler mikrodalga ısıtma için yanıt verir hale gelmektedir. Mikrodalga ısıtmanın büyüklüğü aynı zamanda malzemenin boyutuna da bağlıdır. Örneğin çok ince boyutlu metaller (iletken), bir mikroark prosesinden geçerek mikrodalga ile ısıtılabilir. Ek olarak manyetit, silikon karbid veya karbon gibi düşük kayıplı ya da yalıtkan malzemeler bir mikrodalga ısı kolaylaştırıcısı ile ısıtılabilir. Konvansiyonel ve bir mikrodalga fırında ısıtma paternleri Şekil 1.4’te verilmiştir. Fırın içerisindeki sıcak-soğuk noktaların dağılımı ise Şekil 1.5’te verilmiştir. Ölçümler 9 adet pyreks kap içerisine konan birer litrelik distile su ile gerçekleştirilmiştir. Fırın maksimum güçte iki dakika çalıştırılmış ve su sıcaklıkları ölçülmüştür [7].



Şekil 1 4: a,b Konvansiyonel ve mikrodalga fırınlarda ısıtma paternleri



Şekil 1 5: a,b Mikrodalga fırın içindeki sıcak-soğuk noktaların dağılımı

a) Karıştırıcı olmaksızın ısıtma (b) Karıştırıcı ile ısıtma [7]

1.2.3 Mikrodalga Isıtmaya Etki Eden Parametreler

Mikrodalga ile malzeme ısıtılmasına cihazın ve ısıtılan malzemenin birçok özelliği etki eder. Isıtma prosesi tasarlanırken bunlardan her biri dikkate alınmalıdır [2]. Bu parametreler:

-*Frekans*: Dielektrik özellikler uygulanan mikrodalganın frekansı ile etkilenmektedirler [7]. Mikrodalga ısıtmada 915 ve 2450 MHz olmak üzere 2 frekans mevcuttur ve bunların dalga boyları sırasıyla 0,33 ve 0,122 m dir. Mikrodalgaların frekansı malzemeye nüfuz etme derinliğine etki eder [2].

-*Mikrodalga Gücü*: Belirli bir kütleye verilen güç arttırıldıkça ısıtma süresi azalır. Güç genellikle mikrodalga ısıtmanın hızına etki eder. Malzemeleri ani olarak ısıtma; yüksek iç buhar basıncına dolayısıyla malzemenin patlamasına veya çatlmasına sebep olur.

Ani ısıtmayla karşılaşılabilecek bir diğer sorun da düzensiz sıcaklık dağılımıdır. Bölgesel ısınma çok hızlı olduğu takdirde ısının malzemenin daha soğuk kısımlarına iletilmesine yetecek kadar zaman kalmayabilir. Bu problem genellikle keskin köşeleri olan malzemelerde görülür [2].

-*Kütle*: Burada göz önünde bulundurulması gereken 2 parametre vardır:

- i- Isıtılacak toplam kütle
- ii- Her bir taneciğin kütlesi

Isıtılacak toplam kütle ile kullanılacak mikrodalga güç arasında direkt bir ilişki vardır. Büyük kütleleri tek seferde ısıtmak yerine kademeli olarak ısıtmak malzeme içinde düzenli bir sıcaklık dağılımı olması için önem taşımaktadır.

-*Nem İçeriği*: Malzemelerin bünyesindeki su içeriği genellikle mikrodalga enerjiyi ne kadar absorbe edeceklerini etkileyen başlıca faktördür. Genellikle malzemenin su içeriği arttıkça dielektrik kayıp faktörü artar. Böylece ısıtma daha verimli olur [2].

Nem içeriği ne kadar fazla ise ısınma o kadar hızlı olur, kritik nem yüzdesinden sonra malzemede bozulmalar başlar [7].

-*Yoğunluk*: Malzemenin yoğunluğu dielektrik sabitine etki eder. Havanın dielektrik sabiti 1,0 dır. Malzeme yoğunluğu arttıkça dielektrik sabiti de genellikle doğrusal (lineer) bir şekilde artar [2].

-*Sıcaklık*: Mikrodalga ısıtmada malzemenin ısıyı çeşitli şekillerde rol oynar. Sıcaklık ve nem seviyeleri değişimi dielektrik sabitine, dielektrik kayıp faktörüne ciddi olarak etki eder.

1. Dielektrik kayıp, malzemeye bağlı olarak sıcaklıkla artıp azalabilir.
2. Buz ve suyun dielektrik özellikleri çok farklı olduğundan, donmanın malzemenin ısıtılma özelliklerine etkisi büyüktür. Su mikrodalga enerjisi absorblayıp, ısıya dönüştürdüğü halde buz neredeyse tamamen geçirgendir ve enerjiyi absorblamamız dolayısıyla malzemenin ısınması oldukça güçleşir.
3. Mikrodalga ısıtmaya tabii tutulacak malzemenin başlangıç sıcaklığı bilinirse veya kontrol edilebilirse, mikrodalga ısıtma sonrasında düzenli bir ısı dağılımı elde etmek için mikrodalga güç ayarlanabilir [2].

-*Fiziksel Geometri*: Fiziksel geometrinin etkisi genellikle iki şekilde olmaktadır.

1. Boyut: Eğer tanecik boyutları dalga boyu ve nüfuz derinliğine kıyasla çok büyükse ısınma düzenli olmaz. Tane boyu nüfuz derinliğine yaklaştıkça ısınma daha düzenli olur.
2. Şekil: Düzgün şekilli parçacıklar daha düzenli şekilde ısınırlar. Keskin köşeler ve sivri kenarlı olanlarda ise yerel ısınma dolayısıyla aşırı ısınma gerçekleşir [2,3,4,6].

-*İletkenlik*: İletkenlik, malzemenin elektrik akımını elektron ve iyon değişimleriyle iletme yetisidir. Bununla birlikte dipolar rotasyon mikrodalga sistemlerde ısı iletmede rol aldığı için iyonik iletimin önemi büyüktür [2].

-*Isıl İletkenlik*: Mikrodalga ısıtmalarda ısıl iletkenlik etkisi azdır. Çünkü mikrodalga çok hızlı bir ısıtma yöntemidir. Nüfuz derinliği malzemenin her tarafı eşit ısıtmaya yetmeyecek derecede büyük boyutlardaki malzemelerin ısıtılmasında ya da ısıtma süresi uzun ise önem kazanır [2,7].

Mikrodalga ısıtmada enerji ısı dönüşümü aşağıdaki denklemle ifade edilir [2].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{Q}{qC_p} \quad (1.2)$$

(T= Sıcaklığın zamana göre fonksiyonu (t)

α = Isıl yayılma gücü

q= Yoğunluk

C_p = Malzemenin özgül ısısı

Q = Malzemenin birim hacmi başına üretilen enerjidir.

-*Elektrik İletkenlik*: Yüklü iyonların ortamda bulunması mikrodalga ısıtmada en kuvvetli etkidir. Kurutma sırasında buharlaşma sonucu konsantrasyon artışı, sona doğru ısıtma hızını hızlandırır [2].

-*Özgül Isı*: Mikrodalga ısıtmada genellikle ihmal edilen bir parametredir. Oysa oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Göreceli olarak düşük dielektrik kaybına sahip malzemelerin mikrodalga alanda iyi ısınmasına sebep olabilir.

Maddenin ısı kapasitesi C_p ; m gram maddenin t_1 ($^{\circ}\text{C}$) sıcaklığından, t_2 ($^{\circ}\text{C}$) sıcaklığına ısıtılması için harcanması gereken ısı Q olarak ifade edilirse C_p aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir [2].

$$C_p = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)} \quad (1.3)$$

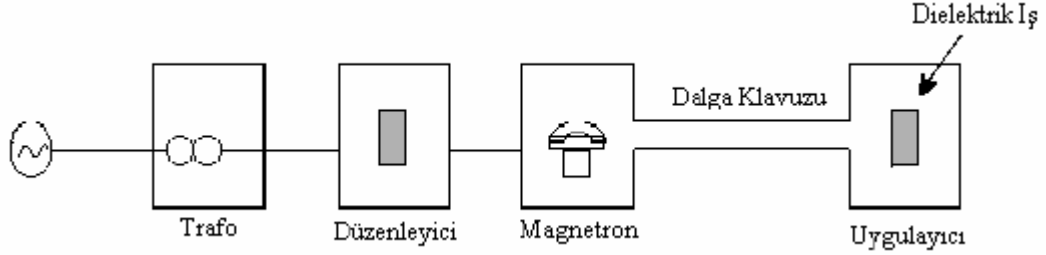
Dielektrik kayba ve zayıf mikrodalga absorblamaya rağmen düşük spesifik ısıya sahip maddeler mikrodalgalar ile kolaylıkla ısıtılabilir. Bunun nedeni sıcaklığı yükseltmek için birim ağırlık başına daha az kalori gerekmesidir.

1.2.4. Mikrodalga Fırının Tarihçesi

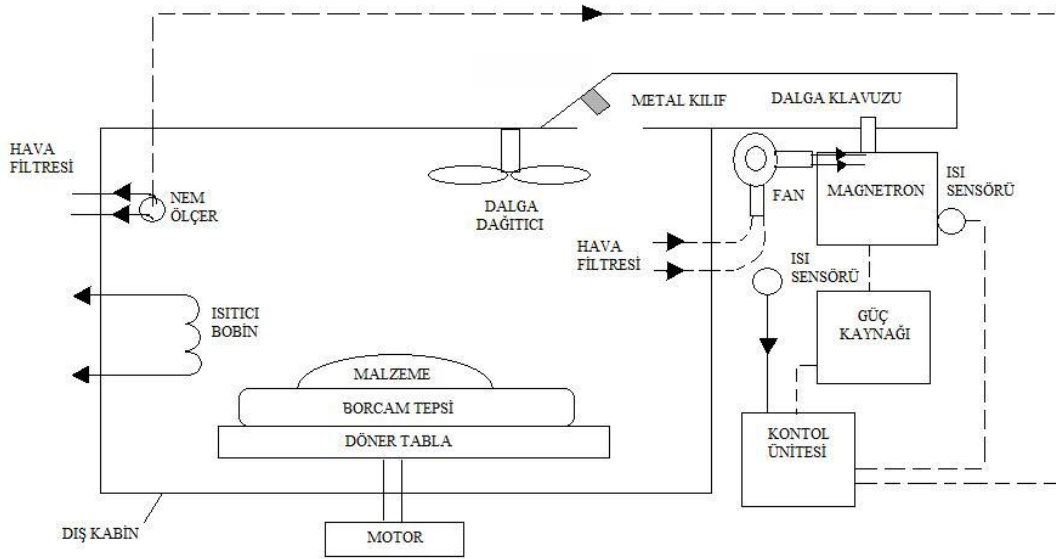
Mikrodalgaların ısı kaynağı olarak kullanımı II. Dünya Savaşı'ndan hemen sonra radar konusunda yapılan çalışmalar sırasında farkedilmiştir. Isı enerjisi olarak mikrodalga enerjisinden 1950'li yıllarda sanayide patates cipsi son kurutmasında yararlanıldığı, ilk ev tipi mikrodalga fırının Raytheon Lisansı ile 1955 yılında kullanıma sunulduğu belirtilmektedir. Bugün ise mikrodalga teknolojisi gıda sektörü de dahil olmak üzere endüstriyel, bilimsel ve tıbbi alanlarda geniş bir uygulama alanına sahiptir.

1.2.5. Mikrodalga Fırınların Çalışması

Mikrodalga fırınlarda ısıtma sistemi 4 temel kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; güç temini, magnetron, hedef malzemenin ısıtılması için uygulayıcı ve mikrodalgaların jeneratörden uygulayıcıya taşınması için kullanılan dalga kılavuzudur. Şekil 1.6'da mikrodalga ısıtma sisteminin basitleştirilmiş diyagramı, Şekil 1.7'de bir mikrodalga fırının yapısı verilmiştir [1].



Şekil 1 6: Mikrodalga ısıtma sisteminin basitleştirilmiş diyagramı [2]



Şekil 1 7: Bir mikrodalga fırının yapısı [1]

Mikrodalgalar ışık hızında yayılırlar. Mikrodalga kaynağı açılır açılmaz, ısıtılacak kütleye nüfuz eder ve derhal enerji dönüşümünü başlatır. Kaynak kapatıldığında ısıtma prosesi derhal durur. Polar olmayan maddeler (teflon, hava, kuvars, cam) mikrodalga enerjisini ısı enerjisine dönüştüremezler. Mikrodalgalar bu maddelerden geçerken zayıflamazlar. Genelde, enerji dönüşümünü yerine getiren ve ısı kaynağını temsil eden fırın, ısıtılacak maddeye mikrodalga gönderir. Metalik fırın muhafazası

(mikrodalga bölme) sadece maddeye enerji yöneltmek enerji kaybını önlemek ve personeli mikrodalga radyasyona maruz bırakmamak için kullanılmaktadır [1].

1.2.6. Mikrodalga Fırının Bileşenleri

Magnetronda üretilen mikrodalga, dalga kılavuzundan geçerek fırın oyuğuna gönderilmektedir. Fırın oyuğundaki ürünler bu etkiyle ısıtılmaktadır [6].

1.2.6.1. Güç Ünitesi

Mikrodalga fırınlarda bulunan güç ünitesinin görevi şebekeden alınan elektrik enerjisi ile magnetronun çalışması için gerekli olan voltajı üretmektir. Magnetronlar genelde birkaç bin voltluk potansiyel farklarında çalışırlar [6].

1.2.6.2 Mikrodalga Üreteci (Magnetron)

Mikrodalga fırınlarda, mikrodalgaları oluşturmak için magnetron adı verilen cihazlardan yararlanılır. Magnetron elektriksel gerilimi mikrodalga radyasyonuna çeviren diyot tipli bir elektron tüptür. 1921’de Albert Wallece Huli tarafından ilk defa yapıldığından beri günümüze kadar temelde bir değişikliğe uğramamıştır. Küçüklük ve ucuzlukları yüzünden magnetronlar cisimleri ısıtmak için ticari fırınların hepsinde ve endüstriyel fırınların büyük bir bölümünde kullanılan mikrodalga kaynağıdır. Günümüzde ticari fırınlarda kullanılan çok oyuklu magnetron ilk defa 1940’da J.T. Randall ve H.A.H Boot tarafından tasarlanmıştır. Bu magnetronlar 2450 MHz frekansında çalışmaktadır [6].

Magnetron, yansıtıcı kavite, yüksek ısı iletkenliğine sahip ve birçok kanattan oluşan bir anot ve elektron yayan, silindirin merkez ekseninde konumlandırılmış bir katottan oluşmuştur. Magnetron ayrıca, manyetik devre, demirden yapılmış iki kutup parçası ve boyunduruk, yansıtıcı kavitede depolanan mikrodalga enerjisi verimli bir şekilde ortaya çıkaran çıkış ünitesi, teli güç boyunca geçen filtre devresiyle giriş devresine çizgi iletimli ses kaçağını önleyen ve anot kayıplarıyla yayılan ısıyı dağıtan soğutma devresi içermektedir. Magnetronlar, anodu oluşturan kanatlar ve katot arasındaki etkileşim boşluğunda manyetik alan oluştururlar [3].

Genelde magnetronlar ekseninde silindirik içi boş bir anotla birlikte metalik katot bulunan dairesel simetrik tüplerdir. Metalik silindir ve içindeki kanatçıklar, bir sıra

trapezoid şekilli boşluk, katodu oluşturur. Oyuklardan birinin içine giren anten mikrodalga enerjisini magnetrondan alarak sabitlenmiş bir dalga kılavuzuna gönderir. Magnetron elektronların katottan anoda doğru akışını kontrol ederek çalışır. Bu işlem merkezde bulunan katot filamanının dışarıdan düşük gerilimli elektrik üreticiyle ısıtılması ve çalışma sıcaklığına ulaşması ile başlar. Sıcaklık artışı katottaki moleküler aktivite ile hızlanır ve elektronlar yer değiştirmeye başlar. Isıtılma anotla beraber uygulanan potansiyel elektronları katottan radyal olarak anoda doğru hareketlendirir. Doğal veya elektromıknatıslar tarafından üretilen ve eksene paralel, elektronların yoluna dik olarak etkileyen manyetik alan elektronları katodun etrafında sanki dairesel bir yörüngede harekete zorlar. Anot ve anotta bulunan oyuklar elektronların periyodik olarak sırasıyla hızlanmalarına ve yavaşlamalarına neden olarak bir elektron bulutunun oluşmasına olanak verirler. Elektron bulutunun sürekli dönme hareketi her oyukta artı yükleri meydana getirir. Anodun oyuklarında sırası ile olan şarj vedeşarj olayı bir alternatif akım oluşmasına yol açar. Bu sayede oluşan elektromanyetik dalga anten aracılığı ile dışarıya verilir [6].

1.2.6.3. Dalga Kılavuzu

Mikrodalga üretildikten sonra bu dalganın fırına verilmesi ve ısıtılacak maddeye yönlendirilmesi gereklidir. Genelde iki tane iletici cihazı bu iş için kullanılmaktadır. Bunlar iki adet tel ve bir koaksiyel kablodan oluşan iletişim hatları ve dalga kılavuzlarıdır.

İletim hatları ile yayma genelde düşük frekansta uygulanmakta ve iletişimde kullanılmaktadır. Yüksek güçte çalışıldığı durumlarda akım yoğunluğu yüksek olduğu için iletici kayıpları meydana gelmektedir. Bunu önlemek için kesit alanlarının daha büyük olduğu içi boş tüpler (dalga kılavuzları) daha yüksek frekansta çalışan cihazlar için kullanılmaktadır. Optik dalga kılavuzları gibi mikrodalga dalga kılavuzlarında mikrodalga yaymak için yüksek yansıtma özelliğine sahip duvarlar bulunmaktadır.

Dalga kılavuzları çok çeşitli şekil ve boyutlarda olabilirler. Bunlardan en çok kullanılanları dikdörtgen kesitli olanlardır. Silindirik olanlardan daha çok bilimsel uygulamalarda faydalanılmaktadır. Dalga kılavuzlarının kesit ölçüleri genelde sabittir ve bu değer kullanılan dalga boyunun en az 1/4'ü kadardır. Dalga kılavuzunun açık bölümü mikrodalga fırının, fırın bölümünün beslemesi gibi davranır. Bu bölüm fırına

mikrodalga yayınlamak için mikrodalga fırının karakteristiklerine göre özel olarak tasarlanmıştır. Fırın içine verilen dalgaların bir kısmı da geri yansiyarak magnetrona tekrar geri döner. Fırında bu dalgaların enerjisini soğuracak bir eleman yoksa yüksek enerjisi ile geri yansıdığında mikrodalga üreticine zarar verebilir. Şekil 1.12’de sanayi tipi mikrodalga fırınlar için kullanılan bir dalga kılavuzu görülmektedir [6].

1.2.6.4 Karıştırıcı

Karıştırıcılar genellikle fan biçiminde şekle sahip olup aplikatöre gönderilen mikrodalga enerjisini dağıtmak amacıyla kullanılırlar. Karıştırıcılar durağan dalga şablonlarını bozarlar ve böylelikle aplikatör içinde daha düzgün bir enerji dağılımı sağlarlar [6].

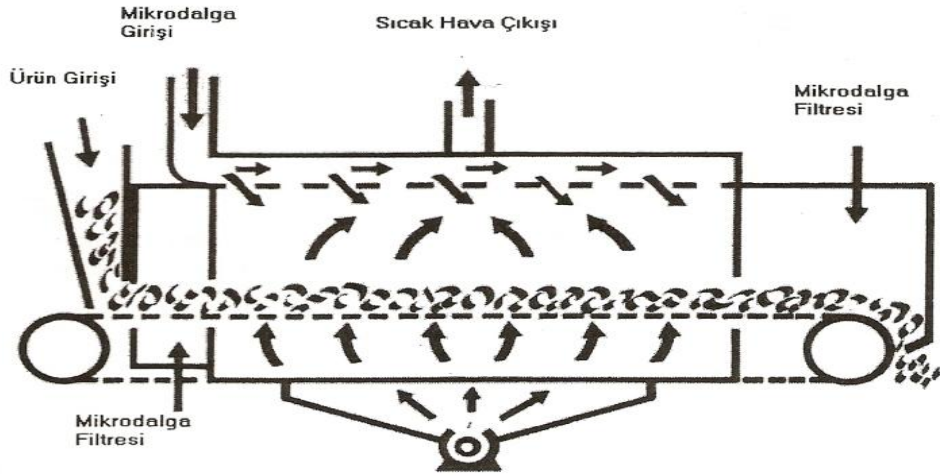
1.2.6.5. Aplikatör (Fırın oyuğu)

Aplikatörler elektromanyetik enerjiyi dalga kılavuzundan işlem görece maddeye geçirirler. İşlem gören maddenin içinde bulunduğu oyuk bu durumda aplikatör olarak tanımlanabilir. Aplikatörün büyüklüğü ve biçimi

- 1) İşlem yapılan frekansa
- 2) İşlem yapılan maddenin şekli büyüklüğü ve özelliklerine
- 3) İşlem tipine (sürekli, yığın gibi)

bağlıdır. Aplikatörler şekil olarak dikdörtgen veya dairesel olabilir; alüminyum, bakır ve paslanmaz çelik en çok kullanılan maddelerdir. Epoksi kaplı metaller ve refrakter astarlı metalik duvarlar bazı ticari uygulamalar için de kullanılmaktadır. Karıştırıcılar ve döner tabakalar ise düzgün dağılımlı ısıtma için kullanılmaktadır.

Şekil 1.8’de bir sanayi tipi konveyörlü mikrodalga fırın görülmektedir. Bu tip fırınlarda ürün beslemesi sürekli olarak yapılmaktadır. Başlıca çözülmesi gereken sorun mikrodalgaın sızdırmazlığıdır. Bunu sağlamak için mikrodalga filtreleri kullanılmaktadır [6].



Şekil 1 8: Sanayi tipi konveyörlü mikrodalga fırın [6]

1.2.7. Mikrodalga Gücü ve Isıtma Hızı

Birçok endüstriyel mikrodalga sistemi 5-100 kW arasında değişen mikrodalga gücünde çalışırlar. Güç akışının verilen kütle için yüksek olması, sıcaklığın hızla artmasına sebep olur. Bu gibi sistemlerde mikrodalga ısıtmanın hızı, güç çıkışının değişimi ile kontrol edilmektedir. Ancak, ısıtma işlemlerinde başlangıçta yükselen ısı etkisiyle bazı reaksiyonların hızlanması sonucu oldukça kompleks fizikokimyasal olaylar ortaya çıkar. Bu reaksiyonlar normal koşullarda uygun sırada ve sürede meydana gelirler. Ancak mikrodalga'nın hızlı ısıtması sonucu bu reaksiyonların oluşması için yeterli süre bulunmayabilir [3].

1.2.8 Mikrodalga Isıtmanın Avantaj ve Dezavantajları

1.2.8.1. Avantajları

Enerji Penetrasyonu:

- MD enerjisini madde yüzeyine bırakmaz, frekansına ve geliş açısına göre madde içinde belli bir işleme derinliği vardır.
- MD malzemeleri içten ısıtmaya başladığından yüzeyde yanma oluşmaz
- MD ısıtmada sıcaklık ve zaman ayarlaması kolaydır ve kısıtlama yoktur
- Cisimlerin iç bölgelerinde istenilen nokta hedeflenerek ısıtma yapılabilir

Enerji Absorpsiyonunda Seçicilik:

- Malzemeler mikrodalgayı yansıtıcı, absorplayıcı ve geçirici olarak sınıflandırılabilir.
- Mikrodalga ısıtmalarda polar ve küçük moleküllü solventler MD enerjisini fazla

emerler. Malzemeler kuruyunca veya polarite özellikleri azalınca MD absorplama seçicilikleri azalabilir.

Isıtma Prosesi Çok Hızlıdır:

- Isıtma hızı 30 000°C/s'den 1°C/asır'a kadar ayarlanabilir.
- Malzemenin cinsi, ısınma ısısı, dielektrik özellikleri, geometrisi, ısı kaybı mekanizması ve MD ısıtıcının özellikleri gibi parametrelerden ısıtma hızı etkilenir. Örneğin, ısıtma gücü 2 kat arttırılınca hızı da 2 kat artar.

Malzemenin Tümünde Homojen Isıtma Yapılabilir:

- Konvansiyonel ısıtmalarda olduğu gibi malzeme içinde büyük ısı değişimi oluşmaz, ısıtma istenilen bölgeye ve geometriye göre ayarlanabilir.
- Enerji dönüşüm verimi yüksektir.
- Doğrudan doğruya hedeflenen malzeme ısıtılabilir.
- Heterojen malzemelerde bazı bileşenler ısıtılıp, bazıları ısıtılmayabilir.
- Fırının duvarları, taşıyıcı bantlar ve içindeki havanın ısıtılmasına gerek yoktur.
- Fırının kendisi ısınmadığından, ayrıca soğutma ekipmanlarına ve izolasyona gerek yoktur.
- Isıtma hızla kontrol altına alınabilmektedir, ve daha hızlı proses kontrolü sağlar.
- Isıtmanın başlatılması ve kesilmesi çok hızlıdır.
- Cihazların kapladıkları alan ve hacim çok küçüktür.
- Mevcut tesislere kolaylıkla adapte edilebilir ve montajı kolaydır.
- Ürün kalitesini artırır ve kabuklaşmayı önler.
- Yüzeyde istenilmeyen fiziksel ve kimyasal değişiklikleri önler.
- Ürünün orjinal kokusu ve lezzetini muhafaza eder.
- Proseste daha az atık ürün oluşur.

Sıcaklığa Bağlı Pek Çok Kimyasal Reaksiyonu Başlatabilir

- Kataliz olarak kullanımı (Hot Spots) olabilir.
- Organik sentezlerde, polimerizasyonda, plastiklerde solvent gidermede, emülsiyon bozmada, ilaç sanayinde kullanılabilir.

1.2.8.2. Dezavantajları

- MD ısıtma ile ısı uygun dağıtılmazsa, bazı ürünler zarar görebilir.

- Ani ısıtma sonucu oluşan basınçla üründe patlama, kabarma ve dağılmalar olabilir.
- Giriş voltajındaki değişimler cihazda ve üründe problem yaratabilir.
- Kurutma işlemlerinde %50'den fazla su içeren sistemler için uygun değildir.
- Sabit yatırım 2500-3000 \$/kWh kadardır.
- Gıda ve kurutma sanayi dışındaki uygulaması yaygınlaşmamıştır [7].

1.2.9. Mikrodalga İle Yapılan Çalışmalar

Mikrodalgaların ısıtmada kullanılabileceği ilk olarak 1945 in sonlarına doğru Percy Spencer tarafından radar araştırmaları sırasında tesadüfen keşfedilmiştir ve bu amaçla kullanılan ilk magnetronun patenti alınmıştır. Minerallerin mikrodalga ile işlenmesinin teorisini araştıran az sayıda çalışma vardır. Yapılan çalışmalarda uygulanan dielektrik alanda minerallerin ısınma hızının belirlenmesi ve mikrodalga uygulanan mineral matriksindeki ısıl gerilmelerin modellenmesi olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadır [1].

Church ve arkadaşları (1988), mikrodalga'nın mineral kazanımına bir etkisinin olup olmadığını belirlemek için araştırmalar yapmışlardır. Bunun için dielektrik sabiti (ϵ_r) ve $\tan\delta$ 'yı hesaplayarak ısıtma süresince soğurulan mikrodalga yayılım miktarını belirlemek için teorik bir ısınma modeli geliştirmişlerdir. Model, farklı minerallerin farklı hızlarda ısınarak herhangi bir bileşenin fiziksel veya kimyasal özelliklerinin seçimli olarak etkilendiğini ve mikrodalga'nın mineral ayırımını iyileştirici bir potansiyele sabit olduğunu göstermek için kullanılmıştır.

Salsman ve arkadaşları (1996), mikrodalga ısıtma sırasında kalsit içerisindeki bir pirit tanesinin termomekanik davranımını belirlemek için sonlu elemanlar sayısal modelini kullanmıştır. İki faz arasında sıcaklık farkı oluştuğunu ve buna bağlı termomekanik gerilmelerin oluştuğunu ve bond iş indeksinin düştüğünü belirlemiştir. Çok yüksek güçte kısa süre mikrodalga uygulamanın, mikrodalga destekli öğütme verimini çok önemli oranda arttırdığı öne sürülmektedir [9].

1.2.10. Minerallerin ve İnorganik Ürünlerin Mikrodalga ile Isıtılması

Mikrodalga enerjinin cevher hazırlama endüstrilerinde bir potansiyel olarak kullanılmaları 1960'lardan sonra gelişmiştir. 1960 yılından itibaren seramik

endüstrisinde uygulanması çalışmalarına başlanmıştır. Genellikle seramiklerin sentezlenmesi, kurutulması, kalsinasyonu ve sinterlenmesinde mikrodalga enerji kullanım alanı bulmuştur. Bu çalışmalar arasında Derling ve Abicht (1996), BaTiO₃ bazlı seramiklerin 2,45 GHz mikrodalga frekansında ve 1 kW mikrodalga gücünde sinterlenmesi çalışmaları, Patil ve arkadaşları (1992) oksit bazlı Al₂O₃-MgO ve Al₂O₃ ZrO₂SiO₂ karışımlarının 2,45 GHz de sinterleme çalışmaları bulunmaktadır [7,10,11].

Ülkemizde bor mineralleri üzerinde mikrodalga enerjisine bağlı çok sayıda araştırma yapılmıştır. Yapılan çalışmaların özellikle kimyasal madde kurutma ve kalsinasyon ile üretim konularında yoğunlaştığı dikkati çekmektedir [12].

Kocakuşak ve arkadaşları, borik asitten mikrodalga enerjisi ile bor oksit üretimi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada 2450 MHz ve 700 W gücü olan bir mikrodalga fırın kullanılmış ve borik asitten %98 verim ile bor oksit üretmişlerdir [13].

Kocakuşak ve arkadaşları, boraks pentahidrat, boraks dekahidrat ve çeşitli boraks hidratların mikrodalga enerji ile dehidrasyonu ve susuz boraks üretimi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada 2450 MHz frekansta ve 650 W gücünde bir mikrodalga fırın kullanılmış ve 1 molden daha az kristal suyu içeren susuz boraks elde edilebilmiştir [14,15].

Kocakuşak ve arkadaşları, mikrodalga enerji desteğinde borik asitin dehidrasyonu ile bor oksit üretimi konusunda yaptıkları başka bir çalışmada ise 2450 MHz frekans ve 700 W gücünde bir fırın kullanmışlar ve 60 dakikadan daha kısa bir sürede %98 B₂O₃ içeren bor oksit üretimini gerçekleştirmişlerdir [16].

Kocakuşak ve arkadaşları [1995-1996-1998], tarafından yürütülen diğer çalışmalarda da; %5-10 nem içeren boraks pentahidratın mikrodalga enerjisi ile kurutulması incelenmiştir. 250 °C'de 20 dk mikrodalga enerjiye maruz kalma süresinde, %85 içerikli Na₂B₄O₇ toz formunda elde edilmiştir. Deney sonuçları konvansiyonel sistem ile de karşılaştırılmıştır ve mikrodalga kurutmanın konvansiyonel prosese göre çok daha ekonomik olduğu belirtilmiştir [17,18,19].

Eymir ve Okur [2005], üleksit mineralinin mikrodalga enerji ile dehidrasyonu üzerinde yaptıkları çalışmada Eskişehir Kırka bölgesinden aldıkları üleksit numunelerinin önce kil gibi safsızlıklarından temizlemiş ve daha sonra kırma ve öğütme ile 4 farklı boyut grubunda (-1180+850, -850+600, -600+425, -300+212 mikron) sınıflandırmışlardır. Yapılan deneyler ile 2450 MHz frekanslı ve maksimum 1000 W gücündeki bir fırında farklı güç seviyelerinin her bir boyut grubundaki üleksitin dehidrasyonu üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Mikrodalgaya bağlı elde edilen sonuçlar daha sonra konvansiyonel yöntem ile de karşılaştırılmış ve ısıtma mekanizması açısından mikrodalgaın çok efektif olduğu belirtilmiştir [20].

1.2.11. Cevherlerin Mikrodalga Destekli Flotasyonu

Son yıllarda yapılan araştırmalar göstermiştir ki, flotasyon işleminin farklı aşamaları bazı durumlarda mekanik titreşimler, mikrodalgalar ve bu iki fiziksel davranışın ortak etkisiyle olumlu olarak etkilenebilmektedir. Flotasyondaki bazı mikrodalga işlem uygulamaları, ön işlem olarak kurutmanın verimler üzerinde pozitif etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Geçmişte yapılan çalışmaların büyük bir kısmında flotasyon reaktiflerinin emülsifiye edilmesi ve minerallerin adsorbe olmuş reaktif tabakalarından uzaklaştırılması gibi ultrasonun flotasyon öncesindeki etkisi üzerinde durulurken, son yıllardaki araştırmalarda mikrodalga işlemin flotasyon esnasındaki ve/veya sonrasındaki etkileri incelenmiştir. Genel olarak, mikrodalga etki etkinliğinin minerallerin doğal yapıları ve mikrodalgaın uygulama yöntemine bağlı olduğu bulunmuştur.

Flotasyon minerallere, kimyasallara, tesise ve işletme koşullarına bağlı olarak çeşitli değişkenlerden etkilenebilir. Bu değişkenlerden sadece bir tanesinin değiştirilmesi flotasyonun başarısında, örneğin ürün kalitesi ve miktarı gibi çok etkin rol oynar. Mikrodalga işlemler şu anda flotasyonu geliştirmek için önemli bir işlem olarak kabul edilmektedir. Bu etki kavitasyon ile oluşur ve ortamın basıncı ve sıcaklığının artması olaya eşlik eder. Kullanılan kimyasalların etkilerinin artırılmasının yanı sıra bu reaktiflerin flotasyon ortamında üniform bir halde yayılması da bu etkiyi destekler [8].

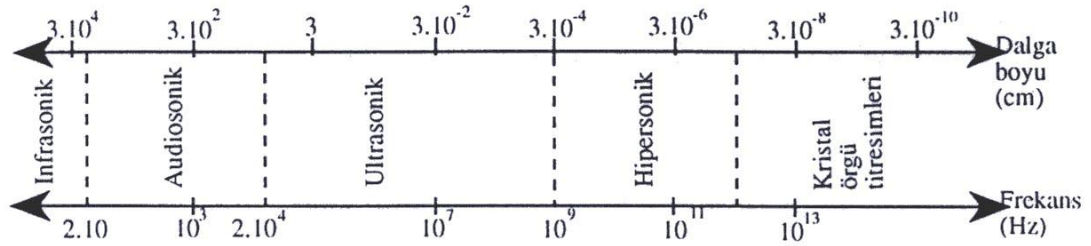
Orumwense, mikrodalga ön uygulamanın saf sülfür mineralleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Yapılan deneylerde mikrodalga güç seviyesi ve deney süresi arttıkça pirit, kalkopirit ve galenin yüzebilirliğinin azaldığı buna karşın sfaleritin yüzebilirliğinin

değişmediği tespit edilmiştir. Yapay mineral karışımlar ve cevherlerinin mikrodalga ön uygulaması ile etkilenmediği görülmüştür. Bununla birlikte bunların flotasyon verimlerinin %3-5 oranında arttığı gözlenmiştir [7].

1.3. ULTRASES

1.3.1. Ultrases Spektrumu

Ses maddesel ortamın titreşim hareketi olarak tanımlanmaktadır. Ses yalnızca maddesel ortamda vardır. Boşlukta ses veya ultrases oluşamaz. Ultrases, insan kulağı tarafından işitilmeyen ses demektir. Dalga boyu göz önüne alındığında kulağımızın duyarlılığı dışında kalan seslere ultrases ismi verilmiştir. Şekil 1.9.'da ultrases spektrumu verilmiştir.



Şekil 1.9: Ultrases spektrumu [21]

İnsan kulağı 16 Hz ile 20 kHz arasındaki frekanslara duyarlıdır. Kulak bu frekansların dışında kalan frekansları algılayamaz. Ses ötesi, aynen ses gibi bir titreşim hareketidir. Titreşim hareketi olarak doğar, titreşim hareketi olarak yayılır ve titreşim hareketi olarak algılanır. Atomların veya moleküllerin denge konumları etrafında titreşimidir. Dolayısıyla ses ötesi bir mekanik enerjidir. Aynı zamanda ışık, radyo dalgaları ve x-ışınlarıyla birçok ortak özelliklere sahiptir. Dalga boyları dikkate alındığında ultrases dalga boyunun, ışık dalga boyunun altında fakat çok yakınında olduğu görülür. Elektriksel olarak oluşturulabilmesi ve bir noktaya odaklanabilmesinin mümkün olması ışık dalgalarına benzer davranışlarıdır. Farklılığı moleküllerin mekanik titreşimleri ile ilerleyebilmesinden dolayı boşlukta ilerleyememesidir. İlerleyebilmesi için hava, sıvı, katı, doku gibi bir ortam gereklidir. Ultrasonik dalgalar ışık, x-ışını gibi elektromanyetik dalgaların tersine bir malzemenin atomal veya moleküler partiküllerinin denge pozisyonundan itibaren titreşimi ile meydana gelen mekanik dalgalardır ve katı, sıvı, gaz, elastik ortamlarda yayılabilirler [1].

1.3.2. Ultrasonik Enerjinin Üretilmesi ve Algılanması

Sesin bir titreşim enerjisi olduğu ve bir teli, bir zarı veya hava moleküllerini titreştirerek ses üretilbildiği herkesçe bilinmektedir. Sesi algılarken de aynı prensip söz konusudur. Havadan gelen ses dalgaları kulağın veya mikrofonun zarını titretir. Örneğin mikrofonda zarın titreşim enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülerek algılanır. Ultrasonik frekansları üretmek için yine bir titreşim hareketi üretmek ve algılamak için de titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek gerekir. Fakat oluşan fiziksel olaylar ve kullanılan araçlar çok farklıdır. Düşük frekanslarda ultrasonik enerji üretme de manyetostriktif olaydan yararlanılır. Bazı malzemeler, örneğin nikel, nikel alaşımları, kobalt, çelik ve ferritler manyetik etki ile boyut değiştirirler [21].

Boydaki değişim; maddenin cinsi ve manyetik alanın şiddetine bağlı iken yönüne bağlı değildir. Üzerinden alternatif akım geçen bir bobinin içine konan nikel çubuğun boyu akım yön değiştirdikçe uzar veya kısalır. Manyetik alan sinüzoidal olarak değişirse çubuğun serbest uçları frekansı alan frekansının iki katına eşit olan bir titreşim yapar. Çubuğa tatbik edilen akım yüksek frekansa çıktığında çubuk aynı frekansla titreşir. 20-40 kHz frekansları ve gittikçe azalan verimle 100 kHz 'e kadar olan frekanslar bu metodla üretilbilir. Malzemelerde manyetostriksiyon özelliği sıcaklık arttıkça zayıflar ve Curie ısı derecesinde tamamen kaybolur. Manyetostriktif problemler ucuz olurlar ve dış etkenlere dayanıklıdır. Bu nedenle betonun, kayaların muayenesinde denizaltı sonar sistemlerinde ve düşük ultrasonik frekanslar gerektiren diğer uygulama alanlarında manyetostriktif problemler tercih edilirler. Daha yüksek frekanslarda ultrasonik enerji üretimi için başka bir üretim metodu kullanılır [22, 23].

1.3.3. Ultrases Dalgalarının Elde Edilmesi

Ultrases dalgaları bir enerji türünü başka bir enerji türüne dönüştürücüler, yani transducerlar yardımıyla üretilir. Örneğin mikrofon, elektrik enerjisini ses enerjisine dönüştürür. Ultrases dalgalarının elde edilebildiği başlıca üç çeşit dönüştürücü mevcuttur:

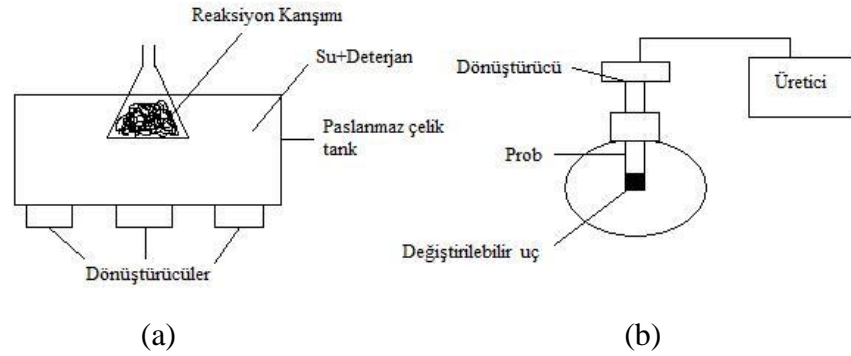
- Bir sıvının ince bir metal yüzeye hızla çarptırılmasıyla çalışan sıvı-sürücü dönüştürücüler,
- Bazı ferrometalik malzemelerin uygulanan manyetik alanda yön değiştirmesine dayanan manyetik dönüştürücüler,

- Bazı özel malzemelerin basınç uygulandığında ultrases dalgası üretmesiyle çalışan piezoelektrik dönüştürücüler.

Ultrases dalgaları iki tür cihaz yardımıyla proseslere uygulanır:

- Ultrasonik banyo,
- Ultrasonik prop.

Ultrasonik banyolar yüksek frekansta ultrases dalgaları üreten cihazlardır. Ultrases dalgasına maruz bırakılacak olan cihazın banyo içindeki konumu, ultrases dalgasını şiddetini etkiler, ayrıca banyonun cidarları dalga şiddetini azaltır. Buna karşılık ultrasonik prop düşük frekansta ses dalgaları üretmede kullanılır. Ultrasonik banyonun aksine malzemenin konumu, dalganın şiddetini etkilemez [24]. Şekil 1.10.'te bir ultrasonik banyo ve bir ultrasonik prop verilmiştir.



Şekil 1 10: (a) Ultrasonik banyo ve (b) ultrasonik prop

1.3.4. Ultrases Dalgaları

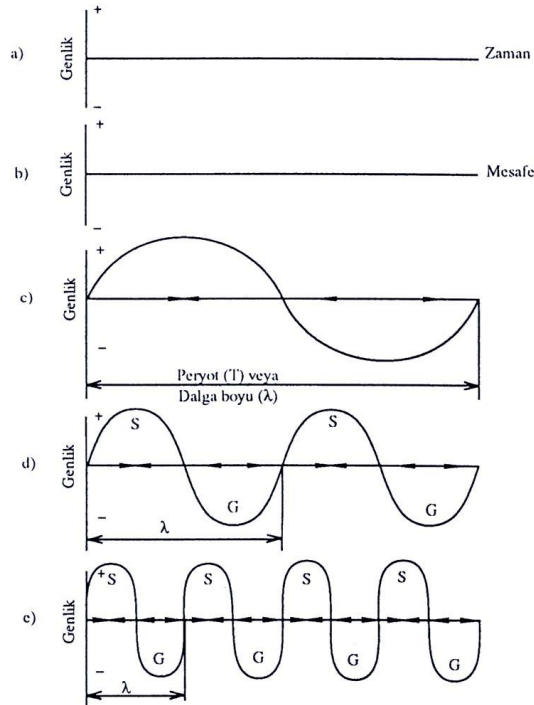
1.3.4.1. Dalga Hareketi

Ses, maddesel ortamın titreşim hareketidir. Ancak maddesel ortamda vardır. Boşlukta ses veya sesötesi yayılmaz. Sesi yaratabilmek için bir maddesel ortam titreşime zorlanmalıdır. Bir parçacığın titreşimi onun denge konumu etrafında gidip gelme hareketidir. Bu hareket zaman ekseninde açılarak bir dalga halinde resmedilir. Dalga hareketi, titreşen parçacığın zamana göre titreşim genliğinin bir maksimum ile minimum arasında salınımını yani zamanla değişimini gösterir.

Katı ve sıvı ortamlarda atomlar birbirine elastik kuvvetlerle bağlıdır. Dolayısıyla hiçbir atom komşularından bağımsız olarak titreşemez. Bir atomun titreşimi yanışık atomları da etkiler, ortam içinde başlayan bir titreşim hareketi bütün atomlara iletilir.

Bütün atomlar titreşime geçer. Bir doğru çizgi üzerine düşen atomların aynı andaki genlikleri çizilirse bir dalgasal hareket resmedilmiş olur [5].

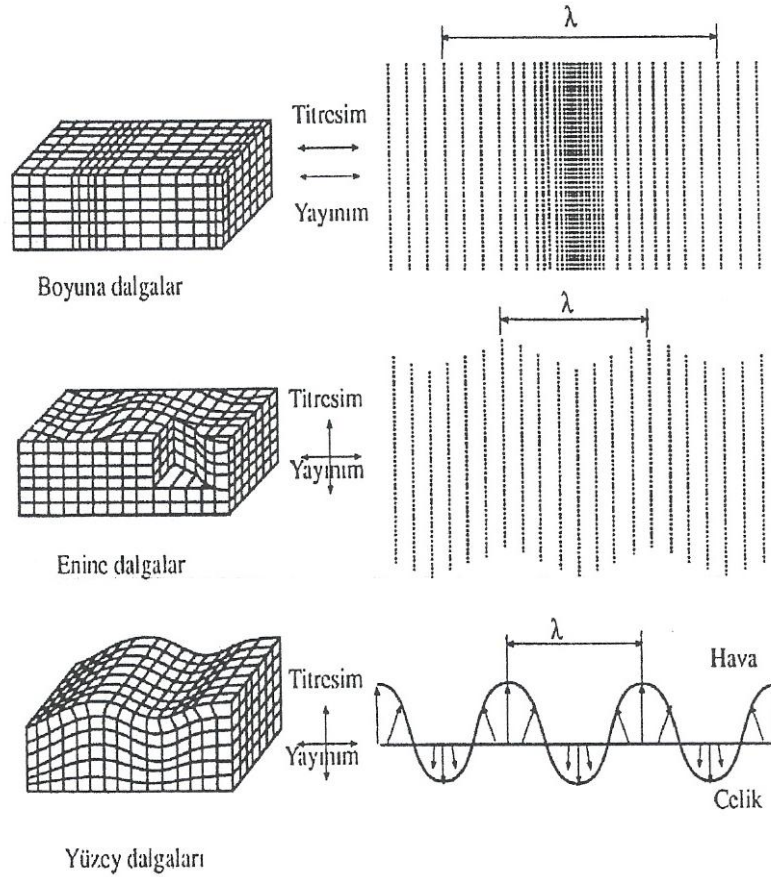
Tek bir atomun akıp giden zaman içerisindeki hareketini gösteren dalga eğrisi ile bir doğru çizgi üstünde yer alan çok sayıda atomun bir andaki genliklerini resmeden dalga eğrisi aynıdır. İki çizim arasındaki tek fark, yatay eksenin birinci halde zamanı ikinci halde ortam içinde doğrusal uzaklığı göstermesidir. Şekil 1.11-a'da tek bir atom için eksen takımı, 1.11.b'de çok sayıda komşu atom için eksen takımı, 1.11-c'de her iki eksen takımında titreşim hareketinin dalgasal görünümü, 1.11-d. ve 1.11-e'de ise frekansın iki kat artması halinde dalgasal değişimin görüntüsü verilmiştir [5].



Şekil 1.11 a-e Titreşim hareketinin dalgasal gösterimi [5]

1.3.4.2. Dalga Çeşitleri

Ultrases dalgaları bir ortam içerisinde yayılırken ortam parçacıklarını çeşitli yönlere de hareket ettirirler. Ultrases dalgaları; ilerleme yönüne ve ortam parçacıklarının hareket durumuna göre üç grupta ele alınır. Bunlar enine dalgalar, boyuna dalgalar ve yüzey dalgalarıdır. Şekil 1.12'de üç tür dalga gösterilmektedir.



Şekil 1 12: Ses ötesi dalga çeşitleri [21]

Boyuna Dalga: Ultrases dalgaları ortam içinde ilerlerken parçacıkları kendi ilerleme doğrultusu boyunca hareket ettiriyorsa bu tip dalgalara boyuna ultrases dalgaları denir. Yani boyunca ultrases dalgası için dalga yayılma doğrultusu ile parçacık hareket doğrultusu aynıdır. Bu tip dalgalara basınç dalgası da denir. Dalga ortamda ilerlerken ortamda sıkışma ve gevşemeler meydana gelir. İki sıkışma ve gevşeme arasındaki uzaklık λ dalga boyu kadardır. Boyuna dalganın yayılma hızı eşitlik 1.1'e uyar.

Ortamda yayılan ultrases dalgasının yayılma hızı sabit olursa frekansın değiştirilmesi ile dalga boyu değiştirilebilir. Boyuna dalgalarda parçacık titreşimleri dalga yayılma doğrultusu ile aynı olduğundan parçacıklar arası bağ ne kadar zayıf olursa olsun boyuna dalgalar sıvı, gaz ve katı ortamlarda yayılabilirler.

Boyuna dalgalara, "basınç dalgası" adı da verilir. Titreşen atomlar bir periyodun yarısında birbirlerine yaklaşarak sıkışır, periyodun diğer yarısında ise birbirlerinden uzaklaşarak kendi aralarında bir çekme kuvvetinin doğmasına neden olurlar. Böylece malzeme içinde, elastik sınırlar dahilinde kalan ve alternatif olarak

değişen basınç ve çekme kuvvetleri doğar insan kulağının nitelediği ses bu türdendir ve diğer dalga kuvvetlerine göre daha hızlı yayılır [5].

Enine Dalga: Bu türde ise titreşim doğrultusu yayılım doğrultusuna diktir. Buna aynı zamanda “kayma dalgası” adı da verilir. Atom düzlemleri birbirini sıkıştırarak değil birbirlerine göre kayarak titreşim hareketini iletirler. Atomları arasında bağ kuvveti olan atomlar yani katılar içinde kayma gerilmesi doğabilir. Dolayısıyla enine dalgalar ancak katı ortamlarda yayınabilirler, sıvı ve gaz ortamlarda yayınamazlar. Enine dalganın malzeme içinde yayınma hızı her malzemeye göre farklı olup aynı zamanda sabittir. Enine dalgaların katı ortamda yayınma hızı boyuna dalgaların yaklaşık yarısıdır. $V_e \approx V_b/2$

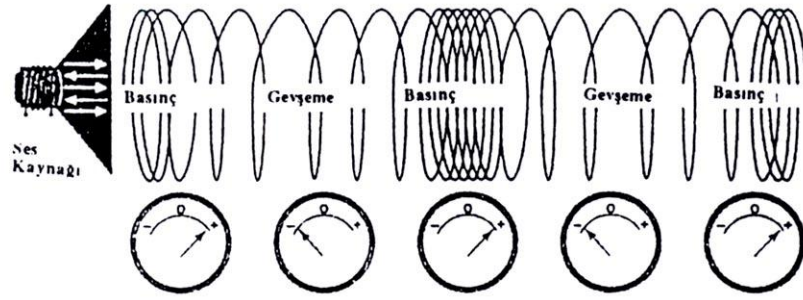
Dalga trendinin herhangi bir andaki statik durumunu ele alırsak kütle parçacık yüzeylerinin birbirlerinden eşit uzaklıkta bulunduğunu ve ayrıca yüzeylerin deney parçasının yüzeyine paralel olarak hareket ettiklerini görürüz. Yüzeye eş uzaklıkta olan noktalar birleştirilerek parça içinde tabakalar oluştururlarsa tabakaların yüzeyden muhtelif uzaklıkta olanları incelersek bazılarının tepecikler, bazılarının çukurlar halinde ortaya çıktıkları görülür. Dalga trendinin dinamik hareketi incelendiğinde dalga tepecik ve çukurlarının test parçası boyunca hareketleri süresinde sabit bir mesafeyi korudukları görülür. Birbiri ardına gelen iki dalga çukuru veya dalga tepeciği arasındaki mesafe enine dalganın dalga boyudur [5].

Yüzey Dalgaları: Enine ve boyuna dalgaların bileşimi olan yüzey dalgalarında ortam parçacıklarının hareketi dalga yayınma doğrultusuna dik elipsler şeklindedir. Boyuna dalgaların yüzeye paralel ve yayınma doğrultusunda, enine dalgaların yüzeye ve yayınma doğrultusuna dik hareket ettirmek istediği parçacık yayınma doğrultusuna dik eliptik hareket yapar.

Yüzey dalgalarının genliği yüzeyden itibaren aşağıya doğru üstel olarak azalır ve bir dalga boyunda sıfırlanır. Bu nedenle yüzey dalgalarıyla yalnız cisimlerin yüzeyleri incelenir. Sesötesi yüzey dalgalarına “Rayleigh dalgası” da denmektedir. Yüzey dalgalarının hızı enine dalgalardan biraz daha küçüktür. Çelikte $V_y = 0,92 \times V_e$ [5].

1.3.5. Kavitezyon (Oyuklanma) Etkisi

Güçlü ultrases dalgaları bir sıvı ortamda oyuklanma olarak bilinen bir etki meydana getirirler. İlk olarak geçen yüzyılın sonlarında Sir John Thornycroft ve Sidney Barby tarafından karakterize edilen bu olay gemi pervanelerindeki aşınmanın nedenleri araştırılırken gözlenmiştir. Pervanelerin su içinde hızlı hareketi sonrasında tarakların arka yüzeyinde büyük bir basınç düşmesi oluşarak küçük köpükler üretilmekteydi. Düzgün olarak yerleştirilen pervaneler bile oyuklanma etkisi nedeni ile erozyona maruz kalmaktaydı. Oyma o kadar güçlüydü ki pervanenin yapımında kullanılan en iyi pirinç alaşımlar bile normal kullanımda erozyondan etkilenmekteydi. Bu aynı oyuklanma köpükleri suyun güçlü ultrases ile muamelesi sayesinde üretilir. Bu kabarcıkların dağılması sonucu oluşan enerji kimyasal işlemlerde büyük çaptaki kimyasal hızlanma ve değişimlere sebep olabilir. Ses titreşimleri, herhangi bir sıvı içerisinde basınç ve gevşeme evrelerinden oluşan bir dalga olarak ilerlemektedir. Ultrases dalga kaynağı sıvı içerisine batmış çok küçük fakat oldukça hızlı vuruşları olan bir piston olarak düşünülebilir. Bu analogiden basınç dalgalarının, Şekil 1.13'te görüldüğü gibi, sıvı içerisine molekülse etkileşimler sayesinde iletilen ileriye doğru vuruş şeklinde olduğu anlaşılır [1, 5, 21].



Şekil 1 13: Ses Dalgalarının Oluşturduğu Sıkışma ve Gevşeme Evreleri [21]

Dalganın gevşeme kısmını üreten pistonun çekme hareketidir. Piston saniyede 20.000 vuruşluk bir hızla çalıştığı zaman ortamda ultrases oluşturulur. Eğer gevşeme evresi yeterince güçlü ise sıvıyı bağlayan moleküller arası kuvvetleri yenecek büyüklükte negatif bir basınç oluşur. Bu durumda moleküller ortam boyunca küçük mikro kabarcıklar oluşturmak üzere birbirlerinden ayrılır. Ultrases oyuklanması için gevşeme dönemini izleyen bir sıkıştırma döngüsü mevcuttur. Bu mikro kabarcıkların büyük miktarda enerji açığa çıkararak ani olarak dağılmasına yol açar. 25 °C sıcaklıktaki bir

suda güçlü ultrases tarafından yaratılan oyuklanma kabarcıklarının çökmesi yoluyla 5000 °K bir sıcaklık ve 1000 Atm'e varan basınçların yaratıldığı tahmin edilmektedir.

1.3.5.1. Kavitasyon Kabarcık Modelleri ve Tipleri

Kavitasyonu tanımlayan birçok model içinde Lord Rayleigh'in modeli en basit olanıdır. Bir kabarcık sıvı içinde yaratıldığı zaman hemen çökmeye başlar. Bu modelde kabarcık içindeki basınç çevre basıncından daha düşüktür. Kabarcık belli bir noktaya kadar büzülerek sabit basınçta kalmaktadır. Böyle bir harekette onun içindeki hareketi kesmek için oyuk içeriğinin sıkışmaya başlamasına kadar hızlıca artacaktır. Buna rağmen fiziksel bir kabarcığın hareketinin bir çökme olup olmadığını belirlemek zordur. Basınç değişimi ve büzülme hızı ölçülebilir büyüklükler değildir [5].

1.3.5.2. Kavitasyonun Katı Yüzeyindeki Etkileri

Teorik çalışmalarda kavitasyon olayının katı yüzeyinden uzakta sıvı içinde meydana geldiği kabul edilir. Fakat çoğunlukla sıvı içinde bulunan bir katının yüzeylerinde veya sınırlarında kavitasyonun şiddetli etkileri meydana gelir. Bir sıvıdaki ses ortamı; yüzeyde kalıcı değişiklik ve hasarı oluşturan (erozyon ve korozyon), tanecik ve yüzey filmlerini uzaklaştıran (temizleme) ve bazı yüzey etkilerini hızlandıran kabarcık ortamları oluşturabilir [5].

Akustik kavitasyonun teknik uygulamalarının çoğunda bu yüzey etkilerinden faydalanılmaktadır. Gemi pervanelerindeki aşınma problemini inceleyen Rayleigh; gözlemlenen ortam içinde gerçekleşen oyuklanma hasarının bir fiziksel olay olduğunu ve elektriksel, kimyasal ve mekanik faktörlerin bir bileşkesinden kaynaklanabileceğini düşünmüştür. Kavitasyon hasarının mekanik olarak açıklamanın mümkün olduğunu göstererek bu hasarın ana sebebinin kabarcık hareketinden meydana gelen mekanik bir stres olduğunu bulmuştur. Yüzeye hasar veren bu olay korozyon kelimesi ile ifade edilebilir. Geçici oyuklara benzeyen kabarcıkların varlığı erozyonun üretilmesi için yeterli olarak gözükse de, yüzey duyarsızlıklardan meydana gelen yüksek hızlı jetlerde erozyona sebep olabilir. Bu duyarsızlıklar geçici kavitasyonda olduğu gibi duraylı kavitasyon tarafından da oluşturulabilmektedir [1].

Araştırmalar oyuklanma hasarının birinci sebebi olarak bir kabarcığın hareketinden meydana gelen mekanik gerilme olduğunu göstermektedir. Ellis ve Plesset 18-24

kHz'lik ses ortamı ile polikristalin ve monokristalin materyaller üzerinde akustik dalgalar tarafından oluşturulan oyulma etkilerini çalışarak, x-ray difraksiyonu ve mikro fotoğraflarla kavitasyon hasarının var olduğu her yerde plastik deformasyon oluştuğunu bulmuşlardır. Genel mekanizma tekrarlanan stresler tarafından materyal yüzeyinin sertleştirilip zayıflatılarak yıpratılmasının sebep olduğu deformasyonun üretilmesidir. Bu çalışmalarda ayrıca farklı kimyasal özelliklere sahip maddelerin benzer plastik deformasyonlar gösterdiği bulunmuştur. Bu oyulma hasarı üzerine kimyasal etkilerin olmadığına bir delil olmuştur. Saf titanyum, nikel ve pirinç gibi bazı yumuşak materyallerde kavitasyon varlığında plastik deformasyon otaya çıkmıştır. Bu maddelerin oyuklanabilmesi için 3500 bar 'lık bir kuvvet gerekir. Tungsten ve titanyum alaşımları gibi materyallerde 10.000 bar 'lık bir çekme gerilmesine sahip olduklarından plastik deformasyon çok yavaş oluşmaktadır. Aynı araştırmacılar çöken geçici oyuklar tarafından bir yüzeyde 3.500-10.000 bar arasında gerilmelerin oluşturması gerektiğini önermişlerdir.

Çökelen bir kabarcığın bir katı yüzeyinde yüksek bir stres meydana getirilebilmesinin iki yolu vardır. İlki; oyuk yüzeyden çapının birkaç katı uzaklıkta sıvı içinde bir çekirdeğin büyümesi yoluyla çökmektedir. Böylece yüzeye ulaştığı zaman hasar meydana getiren bir şok dalgası yaymaktadır. İkincisi ise, oyuk yüzeyde büyümekte ve çöktüğü zaman içinde oluşan yüksek basınç ve yüksek sıcaklığın etkisiyle veya arayüzeyin bir darbe etkisi üretmesiyle yüzey hasarını oluşturmasıdır.

Araştırmalar yayılan bu şok dalgasının bu hasarı oluşturabileceğini göstermiştir. Yüzeyden çapının birkaç katı uzaklıkta oluşan oyuğun yaydığı şok dalgası yüzeye ulaştığında hala birkaç bin atmosferlik bir maksimum basınca sahip olacaktır. Yayılan şok dalgası uzaklıkla orantılı olarak zayıflayacaktır. Noud ve Ellis; katı yüzeyinden değişik uzaklıklarda sıvı içerisinde kıvılcımla çapı maksimum 0,4 cm olan kabarcıklar üreterek bu kabarcıkların çökmesi ile yüzeyde oluşturulan şok basıncını 90 bar olarak ölçmüştür. Bu kabarcıklar kavitasyon kabarcıklarından çok daha fazla gaz içerdiklerinden, bu kabarcıkların oyuklanma hasarının oluşmasında önemli bir rol oynayabileceğine ihtimal vermemişlerdir. Ayrıca içlerinde oluşan yüksek basınç ve sıcaklığın da bu işlemi yapamayacağını önermişlerdir.

Kornfeld ve Eisenberg yüzeyde oluşan kabarcığın simetrik olmayan çökmesinde arayüzeyde jetlerin oluşabileceğini ve maksimum boyuta ulaşmadan önce yüzeye vuracağını bulmuşlardır. Alüminyum üzerinde yapılan deneylerde bunun maksimum boyutun 1/16 kadarı olduğu bulunmuştur. Yüksek hızlı jetleri üreten yüzey duyarsızlıkları çökelen geçici oyuklarda olduğu kadar titreşen duyarlı oyuklarda da ortaya çıkmaktadır. Oyuklanma erozyonunun sıcaklığa bağımlılığı kimyasal reaksiyon ve lüminesans ile ortaya konabilmektedir. Sıvının sıcaklığı yükselirken oyuklanma erozyonu ilk önce artarak bir maksimuma ulaşmaktadır. Daha sonra sıcaklığın artmaya devam etmesi ile azalmaya başlamaktadır. Gazlarda sıcaklık artarken termal iletkenlik artacağından büzülme hızında da bir artış meydana gelecektir. Sıcaklığın daha da artması çözülmüş gaz içeriğini daha da azaltacak ve kavitasyonun oluşması için uygun çekirdek sayısındaki azalmaya sebep olacak ve oyuklanma hasarında azalmaya sebep olacaktır. Schumb ve arkadaşları 9 kHz'de çalışan manyetostriktif bir transduser ile alüminyumun erozyonunu çalışırken su ve karbon tetra klorür içinde benzer pikleri bulmuşlardır. Bebhuck; su, etil alkol ve karbon tetra klorür için de sekiz kHz'de alüminyum erozyonunu çalışırken çevre sıcaklığı artarken bütün bu sıvılarda bir maksimum pikinin meydana geldiğini bulmuştur (Şekil 1.30). Burada maksimum değer yaklaşık 50 °C'de oluşmaktadır. Bazı araştırmacılar bu maksimumu 10 °C daha aşağıda bulmuşlardır. Bebhuck, kavitasyon erozyonu tarafından gerçekleşen metaldeki ağırlık kaybının su içinde organik sıvılara göre daha büyük olduğunu bulmuştur. Su içindeki maksimum erozyon, etil alkol ve karbon tetra klorür içindekinin 8 katı kadardır. Bunun nedeni gaz çözünürlüğüdür. Gaz çözünürlüğü ne kadar yüksekse kavitasyon erozyonu o kadar az olmaktadır. Düşük gaz çözünürlüğüne ilave olarak su, etil alkolün 3 katı ve karbon tetra klorürün 6 katı termal iletkenliğe sahiptir. Hem termal iletkenliğin artışı ve hem de gaz çözünürlüğünün azalması geçici oyuğun daha şiddetli çökmesine sebep olur. Çözünürlük yalnızca büyüme için gerekli çekirdeklerin sayı ve boyutunu etkiler. Sıcaklıkla gaz içeriğinin değişmesi meydana gelen maksimumu açıklayabilir. Bebhuck ve arkadaşları alüminyumu kavitasyon ile aşınmaya maruz bıraktıklarında hasar miktarının yayılan ses basınç genliğinin karesi ile arttığını bulmuşlardır [5].

1.3.6. Ultrases Üretilmesi ve Kullanım Alanları

1.3.6.1. Ultrases Kaynakları

Ses, titreşim enerjisi yani mekanik bir enerjidir. Ses üretmek için titreşim enerjisi üretilmesi gerekir. Bir teli, bir zarı veya hava moleküllerini titreştirmek günlük hayattan bildiğimiz ses üretimi yöntemleridir. Bütün ses üretim araçları bu prensibe dayalı olarak çalışır. Bu yöntemler ve araçlarla işitilebilir frekans aralığında ses üretilebilir ve algılanabilir.

Yine bir titreşim hareketi olan ultrasonik frekansları üretmek ve algulamakta yararlanılan fiziksel olaylar ve araçlar daha farklıdır. Taşlama, delme, tornalama, fırçalama işlemleri sırasında duyulabilir frekansta seslerin yanı sıra ultrasonik frekansta titreşimler de oluşabilir. Bu titreşimler rastgele olduğu için faydalı bir işte kullanılamazlar [5].

Ultrases üretmek için kullanılan sistemler; kornalar, sirenler, mekanik, hidrodinamik, piezoelektrik, manyetostriktif, elektrostriktif titreştiriciler, alev sesi (ark) olarak sıralanabilir.

Ark Sesi: Bir ark üzerine hava içeren bir tüp yerleştirildiğinde tüp havasında ses dalgaları oluşmaktadır. Tüp üzerinde de dalgalar oluşabilir. Fakat bu gerekli değildir ve olay ark içinde gazın hareketini zamanın bir fonksiyonu olarak ortaya çıkarır. Yine bilinmektedir ki ses dalgaları alevin yer değiştirmesine neden olacağından sonik dalgaların varlığının basit bir göstergesi olarak da kullanılabilir. Yüksek elektrik voltajları ile kontrollü ve güçlü arklar oluşturularak böbrek taşlarının kırılmasında kullanılmaktadır [21].

Kornalar: Ses bir kenar üzerine veya bir delik boyunca sıvı veya gazın geçirilmesiyle üretilebilir. Bu aletler korna olarak bilinir ve uygun bir enerjinin üretimi için yeterlidir. Gazın geçişi bir ses dalgası gibi yayılan periyodik olarak aralıklı girdaplar oluşturur. Bir basit dairesel delik bu amaç için kullanılabilirken daha stabil sonuçlar farklı yollarla elde edilebilir. Bu aletlerde gaz veya sıvı kullanılabilir. İşaret edildiği gibi bir bıçak ağzı üzerinden veya bir açıklık boyunca akan gaz veya sıvı ile üretilen ultrasonik enerji onun

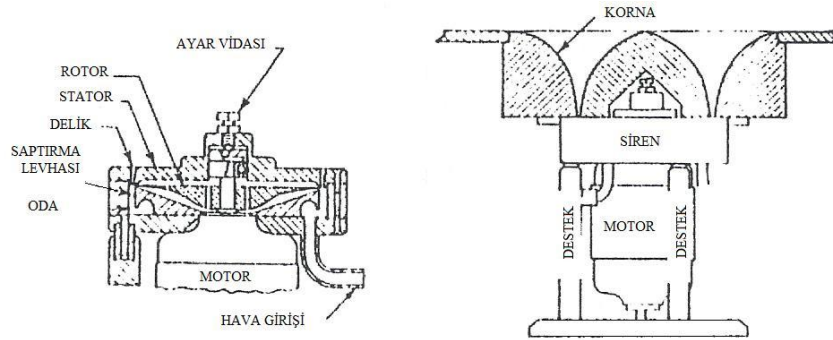
tarafından üretilen ve ortam boyunca hareket eden girdaplar tarafından oluşturulur. Bu girdaplar periyodiktir ve frekansları üretilen ses dalgalarının da frekansdır [21].

Dört çeşit korna mevcuttur:

- Galton Kornası
- Hartman Kornası
- Pohlman Kornası
- Vorteks Kornası

Sirenler: Çoğu standart tip ultrasonik üreteç, hava veya gazla yüksek basınç genlikli dalga üretmek için yeterli değildir. Bunu gerçekleştirmenin bir yolu sirenlerdir. Şekil 1.14'te görüldüğü gibi sirenler temel olarak hava kompresörü gibi, çalışan sabit bir stator ve gaz yolları boyunca havayı karıştıran bir rotordan oluşur.

300-1200 Watt'lık bir çıkış yaklaşık 133 devir/dak ile dönen rotor ile meydana getirilir. Frekans 3-30 kHz arasındadır, yaklaşık 60 ft³/dak'lık bir hava desteği gerekir ve eşit olarak kanallara verilir. Yüksek frekanslı sirenler maksimum etkinliğinin %50'si kadarına sahiptir ve temel olarak saf bir frekans üretir. Düşük frekansları üreten sirenler ise daha verimlidir (%81-%100) [5].



Şekil 1 14: Sirenler [1]

Diğer ultrases kaynakları:

- Mekanik Titreştiriciler
- Piezoelektrik Titreştiriciler
 - i. Kristal piezoelektrikler
 - ii. Seramik piezoelektrikler

1.3.6.2. Ultrasesin Kullanıldığı Yerler

Ultrasonik titreşim, malzemelerin fiziksel özelliklerini karakterize etmek amacıyla kullanımı çok yaygın olmakla birlikte tıbbi tasarımlarda malzeme test yöntemlerinde çatlak bulma, okyanus geometrisinde temizleme işlemlerinde, gıdaların korunması işlemlerinde akışkan akış ölçümleri alanında yüzey açma, kaynak (ergitme) ve plastiklerin montajı işlemlerinde, emülsiyonlarda partikül dispersiyon stabilitesini sağlamak amacıyla bir çok endüstri dalında kullanılmaktadır. Madencilik endüstrisinde ve özellikle cevher hazırlamada ise; iletim oluklarının boşaltılması, besleme, taşıma, eleme, öğütme, cevher yıkama ve sallantılı masalarda zenginleştirme işlemlerinde kullanım alanı bulmuştur. Vibroakustik kırıcılar, düz yüzey zenginleştiriciler, çimentolama araçları, üreteçler ve kurutucular gibi ekipmanlar da bu işlemlerden yaygın olarak yararlanmaktadır. Ultrases frekansına göre ortaya çıkan çeşitli uygulamalar Tablo 1.3.'te verilmiştir. Ultrasesi kullanma şekline göre bu uygulamaları; ultrasesten haberci (veri toplarken ultrasesten yararlanan) olarak yararlanan uygulamalar ve enerji olarak yararlanan uygulamalar olmak üzere iki temel gruba ayırmak mümkündür. Ultrases olarak tanımlanan alan kendi içerisinde frekans veya gücüne göre de yüksek frekanslı veya tını ultrasesi (2-10 MHz) frekans aralığında ve düşük frekanslı veya güç ultrasesi (20-100 kHz) olarak ikiye ayrılabilir [5].

Tablo 1 3: Ultrases uygulama alanları [5]

Frekans	Uygulama Alanı
03-10	Gaz Üretme, köpük söndürme, delme, gazsızlaştırma, kaynak
1-100	Metallurjik etkiler
20	Hırsız alarmı
20-100	Depolimerizasyon
20-40	Endüstriyel temizleme
300	Rezonans testi
100-500	Fotoemisyon ve emülsiyon
150	Su yağ karıştırma
300	Fiziksel ve biyolojik etkiler
330	Virüs muamelesi
450	Cıvanın bastırılması
500-15.000	Puls testi, katılaştırken çinko üzerine etkiler
200	Halojen-gümüş üzerine etkiler
1.000.000	Ulaşılabilen en yüksek frekans

Ultrasesten haberci olarak yararlanan uygulamalar genellikle boyut ölçümü, özelliklerinin tayini ve süreksizliklerin tayini gibi amaçlara yöneliktir. Ultrases dalgalarının geçtiği ortamlarda değişen özelliklerinden ve gidiş-geliş sürelerinin tespit edilmesiyle bu uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Denizaltı sonar sistemi, körler için kılavuz aletler, iç organların muayenesi ve herhangi bir metalürjik yapıdaki değişimlerin algılanması ultrasesten haberci olarak yararlanan uygulamalara örnek olarak verilebilir.

Tablo 1.4.'te ise güç ultrasesin bazı endüstriyel uygulama alanlarının özeti verilmiştir. Güç ultrasesinin en önemli ve yaygın uygulama alanı ise ultrasonik temizleme banyolarıdır. Yıkama tankı içerisindeki sıvıya 20-40 kHz frekanslı ultrases enerjisi verilerek kavitasyon etkisi oluşturulmaktadır. Meydana gelen şiddetli alternatif basınç kuvvetli bir ovma etkisi de yapmaktadır. Yıkanecek yüzeylerden pislikler, Kavitasyon ve aşınma yardımı ile uzaklaştırılmaktadır. Kimyasal temizleyiciler işlem hızlandırmaktadır [5].

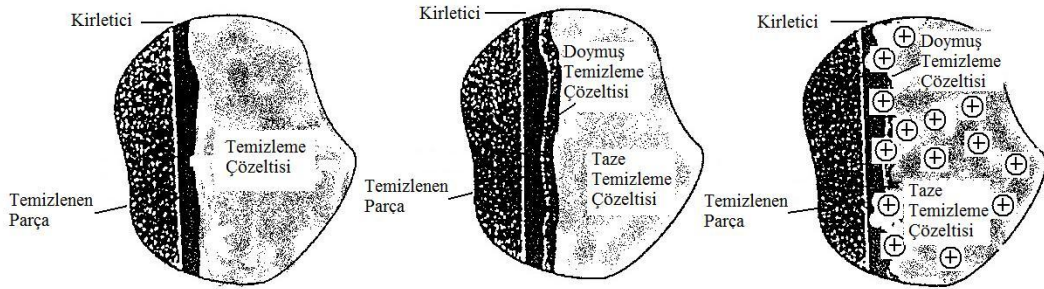
Tablo 1 4: Ultrases Kullanan Bazı Endüstriler [5]

Alan	Uygulama
Biyoloji, Biyokimya	Hücre içeriklerini serbestleştirmek için biyolojik hücre duvarlarını kırma, purifikasyonsuz enzimatik değişim
Mühendislik	Delme, kesme, öğütme, cam ve seramik gibi sert ve kırılğan malzeme üretimi, plastik ve metal kaynaklama, temizleme
Endüstri	Boya, mürekkep ve reçine içinde pigment ve katıların dağıtılması, parçaların banyo içinde temizlenmesi ve yağından arındırılması, akustik filtrasyon, kurutm, atomizasyon, kristallendirme, gazsızlaştırma ve elektro kaplama
Tıp	Teşhis ve tedavide görüntüleme, fizikoterapide masaj etkisi, kas gerilmelerinin özel muameleleri
Plastik Polimerler	ve Termoplastiklerin kaynağı küresel bir polimerizasyonu başlatmada, yeni oluşan polimerlerin önlenmesi

Makine parçalarının temizlenmesinde ultrasonik banyoların pek çok uygulaması mevcuttur. Seri üretim yapan fabrikalarda sürekli olarak kirlenen parçalarının kontrol ve

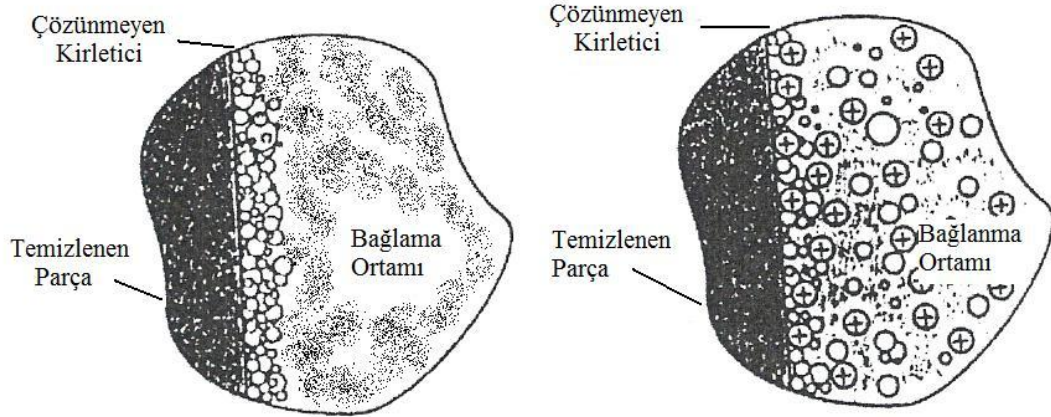
kullanım için temizlenmesi gereken uzay araştırma merkezlerinde gittikçe gelişen uygulama alanları bulunmaktadır. Ultrasonik temizleme geleneksel temizleme metodlarına göre daha ekonomik ve daha pratik olmasından dolayı tercih edilmektedir. Uygulamasının kolay olması hastane, laboratuvar gibi küçük birimlerde de kullanımına imkân vermektedir. Örneğin yüksek hızlarda çekilmesi gereken tellerin temizlenmesi üretimin aksamaması için 0,5-10 sn içinde temizlenmek zorundadır. Bu hıza, uygun dizayn edilmiş ultrases banyoları ile kolaylıkla ulaşılabilmektedir. Diğer ilginç bir örnek ise NASA ve KSC (Kennedy Space Center)'de parçaların temizlenmesindeki uygulamasıdır. Yakın zamana kadar çeşitli temizleyici kimyasalların kullanıldığı bu merkezler çok daha ekonomik ve pratik olmasından dolayı ultrases temizleme sistemlerine geçmişlerdir. Kullanılan reaktiflerin ozon tabakasına zararlı olması da bu tercihi etkilemiştir.

Temizleme işlemlerinde iki ayrı durum söz konusu olmaktadır. İlki parça yüzeylerindeki kirliticilerin bir temizleyici kimyasalıyla çözünebildiği durumdur. Bu işlemde yüzeyde kirlitici ile doymuş bir temizleyici tabakası oluşmakta ve temizleme işlemini zayıflatmaktadır. Ultrasesin uygulanması ile oluşan kavitasyon kabarcıkları oluşan bu tabakayı bozarak dağıtmaktadır. Kirliticilerin de aşınarak çözelti içine karışmasını sağlamaktadır (Şekil1.15).



Şekil 1 15: Çözünbilir kirliticilerin ultrasonik sistem yardımı ile yüzeyden uzaklaştırma mekanizması [21]

İkinci durumda ise çözünmeyen kirliticilerin yüzeylerde bulunması durumudur. Burada da ultrasesin kavitasyon etkisi ile yüzeyindeki kirliticiler sıvı ortama alınarak uzaklaştırılmaktadır. Bu işlemin etkin olarak gerçekleşebilmesi için temas eden sıvının uzaklaştırılacak kirliticileri ıslatabilme yeteneğine sahip olması gerekir (Şekil 1.16).



Şekil 1 16: Çözünmeyen kirleticilerin yüzeyden uzaklaştırılması [21]

Ultrasonik temizleme; sprej yıkama, fırçalama, çırpma ve elektro temizleme gibi bir çok sisteme göre çok daha avantajlı ve etkin bir sistemdir. Malzeme yüzeylerinin girintili olduğu bir çok durum için belki de vazgeçilmez bir tercih olarak ortaya çıkmaktadır [21].

1.3.7. Ultrasesin Cevher Hazırlamada Kullanımı

Ultrases dalgalarının teknik alanlara uygulamaları hakkında birçok literatür bulmak mümkündür. Cevher hazırlama işlemlerindeki uygulamaları, genellikle ultrases dalgalarının kaviteasyon etkisinden faydalanılarak gerçekleştirilmektedir. Burada günümüze kadar yapılmış araştırmaların bazıları hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

Ultrasonik işlemler maden ve metal endüstrilerinde genellikle yüzey temizleme işlemlerinde yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır. Ultrasonik temizlemenin yüzey kirleticilerin uzaklaştırılması için kullanılan diğer yöntemlere göre ana avantajları şöyle sıralanabilir; yüksek kaliteli temizleme, güce dayalı işçiliğin ortadan kalkması ve alev alabilen ve zehirli çözücülerin eliminasyonu. Prosesin basitliği ve sorgulanamaz teknolojik etkinliği Rusya, A.B.D., İngiltere, Almanya ve Japonya gibi birçok endüstri ülkesinde ultrasonik temizleme ekipmanları üretiminde hızlı artışlara yol açmıştır. Bununla birlikte ekipmanların dizaynı bir ülkeden diğerine farklılıklar gösterebilmektedir [25, 26].

Ultrasonik dalga uygulanan bir yüzey temizleme işleminin ivme kazanmasına yol açan ana etkenler, katı-sıvı arayüzeyi ve sıvının kendisinde oluşan kavitasyon ve akustik akış olarak ifade edilebilir. Ultrasonik işlem uygulandığında, malzeme yüzeyindeki film tabakası kavitasyonla oluşan hava kabarcıkları sonucu bozunarak ortamdan uzaklaşmaktadır. Kavitasyona ve oluşan hava kabarcıklarının oluşumuna sebebiyet veren etmenler literatürde detaylı bir şekilde incelenmektedir.

Bazen vibroakustik adıyla da bilinen ultrasonik işlemler kimya, inşaat, robotik ve ziraat endüstrilerindeki çeşitli proseslerde kullanılmaktadır. Bu işlemlerden yararlanan proseslerin önemli avantajları arasında daha yüksek verimlilik, daha kaliteli ürün eldesi, daha az enerji ve su tüketimi ve otomasyona olan uygunlukları sayılabilir.

Cevher hazırlamanın bir konusu olan minerallerin birbirlerinden ayrılması işlemlerinde vibroakustik veya ultrasonik tekniklerin kullanımı son yıllarda yaygın hale gelmiştir. Bu konuda yapılan birkaç araştırmada ses titreşimlerinin flotasyon üzerinde olumlu etkiler yaptığı vurgulanmıştır. Pülp ve reaktiflerin hazırlanması, köpüklerin oluşturulması ve davranışı, köpük tabakasındaki ikincil zenginleştirme, reaktiflerin daha etkin bir şekilde mineral yüzeylerine bağlanması, öğütme ve flotasyonun bir arada başarılabilmesi gibi flotasyon işleminin farklı aşamalarında ses titreşimlerinin olumlu etkilere yol açtığı bilinmektedir [26].

Vibroakustik etkileşimler maden ve metal endüstrilerindeki akla gelebilecek her türlü mekanik prosesin ses titreşimleri yoluyla verimli hale getirilmesini amaçlamaktadır. Proseslerde oluşan titreşimlerin sisteme olan etkileri dolaylı ya da doğrudan olmak üzere iki alt grupta toplanabilir. Titreşimleri dolaylı yoldan etkileri dikey graviteye bağlı yer değiştirme olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin kamyonların veya diğer malzeme taşınmasına yarayan araçların boşaltılmasında, yağ veya kuru malzemelerin kompaktlanmasında, eleme işleminde ve numune almak için kullanılan delicilerde mekanik titreşimler etkili olmaktadır. Titreşimlerin doğrudan etkileriyle ise kırma, öğütme, eleme, sınıflandırma, özgül ağırlığa dayalı cevher zenginleştirme yöntemleri, flotasyon, dozajlama, taşıma, kesme, karıştırma, kurutma, soğutma, kavurma ve yüzey aşındırma gibi proseslerde karşılaşılmaktadır [25].

Flotasyon, günümüzde cevher hazırlama ve zenginleştirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerin başında yer almaktadır. Birçok ülkenin mineral ekonomisi için özel bir önemi olan flotasyon yöntemi pek çok sayıdaki araştırmacıların çabaları sayesinde devamlı gelişmekte olup, bugün kolaylıkla tüm mineral karışımlarının ayırımında kullanılabilir hale gelmiştir. Günümüzde flotasyonu teknolojik ve ekonomik yönden geliştirmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu amacın başarılması için en yeni ve etkin yollardan biri flotasyon yöntemiyle minerallerin birbirlerinden ayrılmasında vibroakustik işlemlerin kullanılmasıdır. Bu konu üzerinde çalışan birçok araştırmacı, flotasyon işleminin farklı elemanlarının ya titreşimler ya ses dalgaları ya da bu iki fiziksel davranışın ortak etkisiyle olumlu olarak etkilendiğini göstermiştir. Bu araştırmalarda düşük ve yüksek frekanslardaki pozitif bir etkinin koşulları saptanmaya çalışılmıştır. Vibroakustik veya ultrasonik etkilerin sonuçları ne kadar olumlu olursa olsun, ses dalgalarını üreten cihazın yüksek enerji tüketmesi, yüksek frekanslardaki pratik uygulamaları kısıtlamaktadır. Bu yüzden geçmişte yapılan çalışmaların bir çoğunda düşük frekanstaki titreşimlerin flotasyon üzerindeki etkilerine ve ileriye ışık tutacak kesin sonuçlara yer verilmiştir [25].

Vibroakustik tekniklerden yararlanan flotasyon makinelerinin sabit bir eksen etrafında dönen mekanizmalarının olmayışı öğütme ve flotasyonun tek bir mekanik üniteye yapılmasına izin vermektedir. Stoev ve arkadaşları (1992) tarafından yürütülen çalışmalarda vibroakustik titreşimleri kullanan bir flotasyon cihazı dizayn edilerek, barit-demir cevheri üzerine denenmiş ve sonuç olarak flotasyon süresinin azaldığı, konsantre miktarı ve veriminin arttığı gözlenmiştir. Böylelikle, konvansiyonel flotasyon makinelerinde elde edilen sonuçlara oranla daha olumlu sonuçlara ulaşıldığı öne sürülmüştür.

Flotasyon ortamının pülple birlikte titreşime tabi tutulması sonucu (toplam titreşim) ise barit-demir cevherlerinin flotasyonundan laboratuvar ölçekte daha olumlu sonuçlar alınmıştır. Bununla birlikte, yüksek enerji tüketimi ve oluşan aşırı sesi ve gürültüyü önleme gereksinimi gibi ekonomik ve çevre ile ilgili koşullar göz önüne alındığında, toplam titreşimin mümkün gözükmemesi yüzünden bu çalışmalar laboratuvar çapında kalmıştır.

Bu bulguların ışığında titreşimi sağlayan cihazın püplün içerisinde yer alması halinde püpün titreşiminin daha etkin olacağı saptanmıştır. Bu yöntemle çalışan bir flotasyon hücresi içerisindeki püpün hava kabarcıklarıyla birlikte titreşimi dışarıya doğru oluşmakta ve böylece hücrenin titreşimi için enerji tüketimi ve gürültünün oluşumu engellenmektedir. Barit-demir cevherleriyle yapılan deneylerden olumlu sonuçlar alınması bu tür flotasyon makinelerinin kullanımının umut verici olduğunu ortaya koymuştur [25, 27]].

Hali hazırda kullanılan flotasyon makinelerinde hücrelere hava verilirken ses yaratılması yoluyla hava kabarcıklarının titreşiminin sağlanması da ses titreşimlerinin proses üzerinde olumlu etkilerini gözler önüne sermektedir. Talk, barit, kömür ve bakır cevherleri üzerinde yapılan denemelerde kazanma verimleri ve konsantre tenörleri bu yolla arttırılabilmektedir.

Vibroakustik işlemler aracılığıyla köpükte yüzebilen bileşenlerin ikincil konsantrasyonu, daha yüksek tenörde ara ve son ürün eldesine müsaade etmektedir. Köpüğün yeterli miktarda titreşiminin su püskürtme işleminde daha iyi sonuçlar verdiği ve ayrıca daha az sulu bir köpük eldesinin avantajlı olduğu saptanmıştır. Bulgaristan'daki Kırcaali cevher zenginleştirme tesisinde kurşun kazanımındaki köpüğün titreşime tabi tutulmasının olumlu etkisi üretim koşullarındaki laboratuvar deneyleriyle doğrulanmıştır. Araştırmalar ayrıca bakır-molibden kaba konsantresinin yeniden öğütülmesi ve reaktiflerin titreşim yoluyla verilmesi kombinasyonundaki olumlu etkileri ortaya koymuştur. Sonuçlar konsantrenin titreşimle buharlaştırılmasında da ultrasonik tekniklerin etkili olduğunu göstermiştir.

Kömür flotasyonunda reaktiflerin titreşimle emülsifiye edilmesiyle olumlu sonuçlar alınmasının yanı sıra, barit-demir, bakır ve polimetallik cevherlerin flotasyonunda kullanılan reaktif çözeltilerinin ses titreşimi yoluyla ortama verilmesinin yararlı olacağı saptanmıştır. Sonuçlar Bulgaristan'daki Tvarditsa (kömür), Kremikortsi (barit-demir cevheri), Mirkovo (bakır cevheri) ve Kırcaali (polimetallik cevher) zenginleştirme tesislerine de uyarlanmıştır.

Minerallerin flotasyon ile kazanılmasında ultrasonik işlemin etkisi hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Tüm bu çalışmalar sonucunda ultrasonik titreşimlerin flotasyon

pülpü üzerindeki etkisinin mineral türüne göre ve prosesi yürütme şekline bağlı olarak değiştiği bulunmuştur. Çalışmalarda flotasyonu kontrol eden birçok faktör göz önüne alınmamıştır. Bundan başka ultrasonik işlemin flotasyondaki etkilerini araştırmayı amaçlayan deneylerin birçoğu gerçekte sadece flotasyondan önceki koşullandırma üzerindeki etkisini incelemektedir.

Taggart (1927) dönen pervane kanatlarının arkasında oluşan gaz kabarcıklarının flotasyondaki etkisini incelemiş ve bu kabarcıkların mineral tanesi üzerine çökebileceğini belirtmiştir. Ancak, bu durumda çökelen kabarcıkların az miktarlarda olması nedeniyle flotasyon üzerine etkisinin ikincil olması gerektiğini düşünmüştür. Aynı kabarcıklar ultras es ortamlarının varlığında da kolaylıkla oluşturulabilmektedir.

Asai ve Sasaki (1958) flotasyon pülpünün ultrasonik işleminden geçirilmesiyle ince kömürün kazanma veriminin iyileştirildiğini rapor etmişlerdir. Fakat bu araştırmacılar normal kullanımdan çok daha fazla hidrokarbon toplayıcı kullanmışlardır. Zupkov ve Belov (1982) ultrasonik ön koşullandırmanın nadir metal cevherlerinin flotasyonundaki etkisi üzerine çalışmışlardır. Bu yazarlar artan flotasyon verimini reaktiflerin daha iyi dağıtılmasına bağlamışlardır. Raghavon ve Hsu (1982) ultrasonik ön işlemin molibden cevherinin flotasyonundaki etkisini incelemiş ve verimde küçük bir artış (%1-2) bulmuşlardır. Ne var ki yazarlar sonuçlarının herhangi bir mekanik yorumunu yapamamışlardır Stoev ve Kuzev (1966)'in çalışması daha önceki birçok çalışmadan daha değişiktir. Bu araştırmacılar hava kabarcıklarının ultrasonik dağılmanın etkisini direkt olarak bir flotasyon hücresinde araştırmayı denemişlerdir. Bu ultrasonik kornalar ile sağlanmıştır. İnce kömürde daha iyi verim sonuçları elde edilmiştir [25, 28].

Stoev tarafından yapılan bir çalışmada ise cevher hazırlamada havalı sınıflandırma olarak bilinen bir prosesin titreşimli ve sesli eylemlerin bileşimi kullanılarak, hava akışı olmadan 40 mikron ile 1,5 mm arasında sınıflandırma işlemini gerçekleştirebileceğine değinilmektedir. Tabakalı ve lifsi mineraller için üst sınır daha büyüktür. Aynı çalışmada, frekansı 25-150 Hz, genliği 0,25-1,5 mm olan bir titreşim uygulanarak havalı sınıflandırma işleminde %85'lik bir teknolojik verimin ekolojik sorun yaratmadan sağlanabileceği de vurgulanmıştır [25].

Stoev ve Martin (1992) tarafından da belirtildiği gibi ilmenit, rutil ve zirkon gibi minerallerin flotasyonunda kısa bir süre için bile olsa ultrasonik ön işleme tabi tutulmasının konsantre verim ve tenörlerinde olumlu değişikliklere yol açtığı bilinmektedir. Bu değişikliklerin mineral yüzeyinin şlam tabakasından etkin bir şekilde temizlenmesine bağlı olduğuna inanılmaktadır. Aynı çalışmalarda zinober-antimonit, kömür-kül, barit-flüorit, sfalerit-pirit-kalkopirit, galen-kuvars, manganez oksitler, jarosit, ilmenit-ferromolibdenit ve bakır-molibden konsantrelerinin flotasyonunda da ultrasonik ön işlem yardımıyla çok yüksek verimlere ulaşılabildiği belirtilmektedir [25].

Stoev ve arkadaşları (1992) tarafından ortaya atılan diğer ilginç bir durum ise flotasyon esnasında oluşan hava kabarcıklarının ses dalgalarından pozitif bir şekilde etkilenmeleridir. Flotasyon sırasında oluşan köpük yüzeylerinin fiziksel özellikleri, minerallerin oluşan bu köpüğe yapışmasını sağlayan önemli bir etkidir. Hidrasyon tabakalarının inceltmesi ve yok edilmesi enerji bariyerini azaltır ve bunun bir sonucu olarak yapışma olayı olur ve ivme kazanır. Bu yüzden ses dalgalarının etkisi ile köpük oluşumu özel bir öneme sahiptir. Burada amaç, titreşim yoluyla köpük yüzeylerini oluşturmak ve böylece parçacıkların yapışmasının gelişmesini ve köpük yüzeylerini mekanik olarak oluşmuş hidrofil tanelerden ve zayıf bağlanmış arayüzeylerden temizlemeyi başarmaktır [25].

W. Kowalski ve E. Kowalska (1978), hidrofobik minerallerin flotasyonunda polar olmayan toplayıcıların ultrasonik aktivasyonunu araştırmıştır. Araştırma sonucunda non-polar reaktiflerin ultrasonik etki ile çok daha iyi emüle edildikleri ve %89,3'ü 0,001 mm boyutundan daha küçük olarak oluştuklarını bulmuşlardır. Bu çalışmalarını bir fosfat cevheri üzerinde uygulayarak yüksek verimler elde etmişlerdir. Bu iyileşmenin nedenleri olarak da toplayıcının iyi dağıtılmasını, mikro kabarcık oluşturarak katı-sıvı-hava arayüzey çarpışma olasılığının daha fazla arttırılmasını göstermişlerdir. Ayrıca araştırmalarda frekansın daha da büyümesi durumunda bu faydalı etkilerin azaldığını bulmuşlardır. Bunu da elektriksel çift tabakadaki karışıklığa bağlamışlardır. Sonuç olarak ultrasoniğin kullanılması ile (25 kHz, 500 w), flotasyon zamanının azaltılması, kullanılan toplayıcıyı ve köpürtücülerin miktarının azaltılması, köpüklerin daha sonraki

aşamalarda söndürülmesi, reaktifin daha optimum çalışması gibi faydalarının olduğunu bildirmişlerdir [29].

Nicol, Engel ve Teh (1986) bir araştırmalarında akustik alan içinde ince tane flotasyonunu incelemişlerdir. Kendilerinden önce yapılan çalışmaların hatalı veya eksik yönlerini saf dışı bırakmak için doğal hidrofobik olan metilleştirilmiş silis yüzeyiyle çalışmışlardır. Örnek en büyük boyutu 20 µm olarak %50'si 8 µm altındadır. Ultrasonik alan 0,40 w/mm² ve 1,18 w/mm² olarak uygulanmıştır. Flotasyon işlemindeki bulunan artışın nedenleri araştırılarak meydana gelen 1°C ısınmanın etkili olmadığını, tane ufalanmasının meydana gelmediğini, hava kabarcıklarının değişmediğini ve temas açılarının değişmediği bulunmuştur. Bunun sonucu olarak ultrasesin sadece kendi etkisi ile sıvı içinde düşük ve yüksek basınçlı lokal rejim meydana getirerek lokal kaynama/kavitasyon (alçak basınçlı buhar boşluklarının meydana gelip çökmesi) olduğu noktadan hareket ederek sıvı içinde çözülmüş olarak bulunan 20ml/lt havanın çözelti dışına çökelti olarak tane üzerine çekirdeklenmesinin gerçekleştiği sonucunu çıkarmışlardır [30].

Araştırmacılar söz konusu teorilerinin ispatlanması için sıvı içinde çözünürlüğü düşük 0,36 ml/lt helyum gazı kullanarak deneylerini tekrarlamışlar ve daha önce başarılan flotasyon verim yükselmesinin yok olduğunu görmüşlerdir. Bu da onları doğrular niteliktedir. Eğer bu hipotez kanıtlanabilirse, ince tanelerin flotasyonunun gelişmesinde, bu alanda günümüze düşünüldüğü gibi yüzey gerilimini azaltan moleküller ile stabilize edilen ilave mikro emülsiyonlar kullanılmasından daha fazla etkili olduğu söylenebilir. Çünkü bu durumda mikro kabarcık ve tane yüzeyi arasında önemli olan elektriksel çift tabaka itişisi ortadan kalkar.

Bir barit-flüorit-kuvars cevherinden baritin flotasyonunun seçiciliğine ultrasonik alanının etkisi Slaczka (1987) tarafından incelenmiştir. Çalışmalarda 22 kHz'lik bir frekans 0,5 w/cm²'lik bir yoğunlukla kullanılmıştır. Deneylerde yüksek frekansın saf minerallerin flotasyonuna etkisi, şlam atmaya olan etkisi ve mineral üzerine toplayıcı absorpsiyonu üzerine etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak ultrasonik ön işlemin baritin seçiciliğini oldukça büyük oranda arttırdığı bulunmuştur. Bu baritin yüzeyinin daha kırılkan olduğundan çukurlaştırılarak absorblanma kabiliyetinin artırılması ve ters

şekilde daha sert olan flüorit yüzeyinin düzlenerek absorpsiyonu düşünerek seçimliliği arttırdığı sonucuna varılmıştır. Ön işlemin 3. dakikasından sonra önemli bir değişiklik olmaması, kısa süre içinde gerekli işlemlerin gerçekleştirilebilmesi bir avantajdır. Ayrıca şlam kaplamanın önlenmesinde oldukça önemlidir [31].

Djendova tarafından (1987) hidrodinamik olarak ultrases üreten bir cihaz tasarlanarak bakır cevheri flotasyonunda kullanılmıştır. Bu deneylerde metal veriminde %6 oranında bir düzelme gerçekleşmiştir. İşlem sulu ksantat solüsyonlarının sonikleştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Diğer bir çalışmada ultrasonik ön işlemin kömür ve galenin yüzdürülebilirlikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Oksitleyici ve indirgeyici maddeleri ile işlenmiş kömür yüzdürmeden önce sonik işlemde geçirilmesinin kömürün su iterliğini tümüyle eski durumuna döndürdüğü bulunmuştur. Toplayıcı yokluğunda sonik işlemde geçirme sonrası şlam giderme ve toplayıcı ile koşullandırma sonik işlem olmaksızın yapılan oranla, birkaç kez daha yüksek verim ile sonuçlanmıştır. Verimdeki iyileşmeyi açıklamak için temiz yüzeylerin oluşmasının ardından su iten katı üzerinde mikro kabarcıkların oluşması ve bundan kaynaklanan kabarcık-tane bağlanmasının çoğalmasından oluşan bir mekanizma önerilmiştir. Bu sonuçlar ayrıca, uygun koşullar altında yapılan ultrasonik işlemin galen/ksantat sistemindeki toplayıcı tüketimini en az %50 oranında azaltabileceğini göstermiştir. Çalışmalar 22 kHz'de ve 0,5 w/cm² gücünde yapılmıştır.

Mekanik flotasyon hücrelerinde gangin köpük içinde tutulma oranlarının azaltılmasında 55 kHz'de çalışan ve 0,4 w/cm² yoğunluklu dalga üreten bir kristal kullanılmıştır. Çalışmada gang tutulma oranının %30 azaltıldığı bulunmuştur. Ultrasonik dalga uygulaması köpük-pülp ara zonunun hemen üzerinde yapılmıştır. Ses dalgalarının iletimin çok önemli olan iletim alanı olarak köpük zonu yani hava kullanılarak verimli bir sonuç alınamamış olabilir. Belki de pülp zonuna uygulanması ile daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

Yerkoviç ve arkadaşları (1993) bakır cevherlerinin ultrasonik öğütmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada US öğütme merkezinin ultrasonik kısırtmalı çubuk

öğütücüsünde Şili porfirik bakır cevheri üzerinde çalışılmıştır. Öğütme sonuçları aynı boyut ve kapasitedeki bilyalı değirmen ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Ultrasonik öğütücü 15-16 kHz ultrasonik titreşimle hareketli bir tabla ile merdane arası mesafe 50 mikron olduğunda bilyalı değirmen sonuçları ile aynı olmakta aradaki açıklık 130 mikron olduğunda ise bilyalı değirmene ve elli mikron boyutuna göre daha düşük olmaktadır. Bu çalışma evvelki test edilen kömür ve kireçtaşı gibi yumuşak materyallere ek olarak bakır cevherleri gibi sert materyallerin öğütülmesi için ultrasonik merdaneli öğütücünün ümit vaat ettiğini göstermektedir. Halihazırdaki ultrasonik aletlerin dizayn sınırlamasının olması ve elektrik enerjisini ultrasonik enerjiye çevirme etkinliği en büyük sorunlardır [32].

Ultrasonikleştirme ile flokların ve agregaların boyutlarının duraylı parçalara bölünerek azaltılabileceği bulunmuştur. (Strengge, Pilgrimm, 1983). Ultrasonik dalgalar disperse sistem hazırlamak için uygun bir yöntem olarak görülmektedir. Ultrases dalgalarının dispersiyonu sağlayan etkisinin tam olarak açıklanamamış olmasına rağmen meydana getirilen kavitasyon olayından kaynaklandığı bilinmektedir.

Price ve Smith (1992) tarafından polimer solüsyonlarının dağıtılmasında ultrasoniğin kullanılmasında solüsyon konsantrasyonu ve çözücü değişikliğinin etkileri çalışılmıştır. Çalışmalarında 22 kHz, 17 w/cm²'lik bir ultrasonik prob kullanılmıştır. Çalışmalarda polistrinin tolüen ve metil butrat içinde çeşitli konsantrasyonlarda dağıtılabilişliğinin zamanla değişimi incelenmiştir. Sonikleştirme zamanının artışıyla molekül ağırlığının hızla azaldığı ve konsantrasyon azalırken molekül ağırlığındaki azalma hızının da arttığı bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar kavitasyon kabarcıklarının çökmesi çevresinde hasıl olan kayma gerilmeleri tarafında zincirler üzerindeki oluşturulan stresler tarafından doğan bir mekanizma ile uyumlu olduğu öne sürülmüştür. Dağılma hızı temel olarak çözücü buharlaşmasına bağılyken ulaşılmış limit molekül ağırlığı temel olarak şekil üzerine bağımlıdır. Konsantrasyon artışı, solüsyon viskozitesi ve zincir karmaşıklığını arttırdığından dolayı prosesin etkinliğini düşürmektedir.

Ultrases etkileri elektrokimyasal prosese yardımcı olarak kullanılırsa üç avantaj sağlanır:

- a) Elektroliz süresince akımın geçişi ile elektrot yüzeyinde gaz birikimi olur. Eğer bu tip bir elektroliz sonikleştirilirse, elektrot yüzeyinde oluşan her kabarcık kavite için bir çekirdek olur. Böylece kabarcıklar yüzeyden uzaklaştırılır. Ultrasesin gazsızlaştırma etkisinin bir sonucu olarak atmosfere salıverilir. Böylece elektrolizde elektrotta gaz kabarcıklarının birikimi önlenir.
- b) Elektrot yüzeyinde kaviteyoneel çökme elektrot çift tabakasının bozunmasına ayrılmaya sebep olur. Bu tüketimi düşürür ve elektro kimyasal prosesin devamı için iyon transferine yardım eder.
- c) Ultrases bir elektrot yüzeyini aktive eder ve temizler; bu elektrotun pislmesini önler ve özellikle elektro kaplamada faydalıdır.

Ultrasesin en büyük kullanım alanı elektro kaplamadır. Elektro kaplama sistemini sonikleştirmenin iki basit metodu vardır. İlki bütün kaplama banyosunun sonikleştirilmesi diğeri ise sadece elektrotların birisinin sonikleştirilmesidir. Nikel kaplama işlemi kaplama banyosunun sonikasyonu ile iyileştirerek birikme hızını artırır ve kaplama akımını artırır. Kaplama akımı polarizasyon sebebiyle proses esnasında normal olarak düştüğünden bu son etki önemlidir. Krom kaplamada ise ultrases direkt olarak katoda uygulandığı zaman proses iyileştirilebilir. Sonuçta kaplamanın mikro sertliğini düşürür (%100). Mikro kırık üretimini düşürür ve geleneksel metodlarla üretilene göre daha iyi parlaklık gösterir.

Nikel kaplama çalışmalarında ultrasonik banyonun kullanımıyla kaplamanın aşınma karakteristiklerinin daha da azaltıldığı görülmüştür. Ultrasonik dalgaların etkisi ile daha iyi yerleşen moleküllerin mikro sertliğinin arttığı ve aşınmaya karşı daha fazla dayanıklılık gösterdiği düşünülmektedir. Burada 22 kHz 500 w'lık bir ultrasonik banyo kullanılmış ve saçaklı büyümeyi azaltarak düzenli bir yüzey oluşturduğu optik olarak tespit edilmiştir.

Suslick ve arkadaşları (1987) inorganik katılar üzerine yüksek yoğunluklu ultrasesin etkisini (20 kHz, 20 w/cm²) incelemiştirlerdir. 60-90 µm çaplı örnekler birkaç dakika içinde 5-10 µm ye düşmüştür. 60-90 µm boyutlu TaS₂ yüzey alanı 15 dk sonra 1'den 11 m²/g'ye gelmiştir. 3-5 µm başlangıç boyutlu Ni tozlarının yüzey alanı 15 dk da 0,48 den 0,69 m²/g'ye çıkmış ve de 2 saat sonunda 1,00 m²/g'ye büyümüştür. Yüzey

morfolojisinde de önemli değişiklikler görülmüştür. Elektron mikroskobunda gözleendiğinde TaS₂ ve Na₂O₃'ün yüzeylerinin çok kötü aşınmış ve kabarcıklanmış oldukları, Ni tozlarının yüzeylerinin ise metalikleştiği görülmüştür. Bu iki katı tipinin sünebilirliklerindeki farklılıktan meydana gelmiştir. Yani tabakalı inorganik oksit ve sülfidler göreceli olarak kırılğan malzemelerdir. Buna karşın geçiş metalleri oldukça dövülebilirdirler [33, 34].

Swamy ve arkadaşları (1983) kurutma öncesi taneli örneklerin susuzlandırılması üzerine ses dalgalarının etkisini araştırmışlardır. Kullanılan örnekler manyezit, kalsiyum karbonat, kum ve talaştır. Susuzlandırma prosesi boyunca ultrases kullanıldığında nem içeriğinde bir düşme gerçekleştiği bulunmuştur. Çalışmalarda 9,8 kHz'de 138 dB'lik yüksek yoğunluklu ses dalgalarını üretmek için akslı bir korna kullanılmıştır.

Atık şehir sularının temizleme tesisinin organik atıklı çamurlarının ve metal endüstrisinin atık mineral çamurlarının susuzlandırılmasında ultrasesin etkisi Kowalska ve arkadaşları (1978) tarafından incelenmiştir. Çamurlar organik kolloidlerle muamele edilmeden önce 20 kHz'lik frekansta 900 watt'lık bir ultrases alanından geçirilmişlerdir. Uygulanan flokülantların türü ne olursa olsun örneklerin sesle muamelesi susuzlandırma etkinliğini arttırmıştır. Mineral çamurlarının filtreleme özelliklerini iyileştiren etki; ultrasesle oluşturulan kaviteşyon şartlarında oluşan dağıtıcı ve yıkıcı etkisinden kaynaklandığı sonucu çıkarılmıştır. Ultrasonik dalgaların diğer etkilerde suyun yüzey gerilimini, adhezyon ve kohezyon kuvvetlerini ve elektrokinetik potansiyeli düşürerek moleküller arasındaki kuvvetlerin oryantasyonunda değişimler oluşturmasıdır. Ayrıca ultrases dalgaları filtre yatağının dokusunu ve porozitesini değiştirerek filtreleme özelliklerini iyileştirmektedir [35].

1970'ler içinde akustik filtrasyonun avantajlarının raporlarından birkaçı yayımlanmıştır ve filtrasyonda 10-300 kat oranında iyileştirme sağladığı bulunmuştur. Güç ultrasesi filtre üzerindeki karışı veya filtrenin kendisine uygulanabilir. Temel olarak ultrasesin filtrasyonu iyileştiren iki etkisi vardır;

- a) Kek içinde çok ince tanelerin aglomerasyonu
- b) Kısmen asılı taneleri tutan kek için yeterli titreşim enerjisinin temini.

Böylece yıkama solventi için daha fazla kanallar üretilir. Özellikle etkileyici bir durum kömür pülplerindedir. Geleneksel filtrasyon teknikleri ile çoğu pülplerden suyu uzaklaştırmak zordur. Gerçekten vakum filtrasyonu %60 sulu solüsyonu sadece %40'a azaltacaktır. Maalesef, kömür solüsyonları %30'dan fazla nem içeriğinde yakılamaz. Fakat ultrases yardımlı vakum filtrasyonu %20 nem içerikli yanabilir bir ürünü direkt olarak üretebilir.

Filtrelerde çok ince parçalar, daha yavaş filtrasyon hızı ve tıkanmaya neden olur. Eğer membran kendi kendini temizleyebilirse bu ayırma teknolojisinde büyük bir ilerleme olacaktır. Bu ultrases duran dalgaların yardımı ile başarılabilir. İki transduser sıvı ortam içinde yerleştirildiği zaman, duran dalgalar, transduser frekansları aynı olduğu zaman üretilecektir. Bu durumda sıvı içinde bulunan her minicik tanecik ultrases ışınımının aksisi üzerinde yarım dalga boyu uzaklıktaki bölgede toplandığı görülür. Eğer transduserlere hafifçe farklı frekanslarda güç verilirse duran dalgalar yavaşça transduserin birine doğru göç eder ve parçacıkları taşır. Böylece, tanecikler bu transduserde toplanma eğilimindedir. Eğer transduserler arasındaki sıvı akıyorsa akışın bir yarısı parçalı maddelerce zenginleşecektir.

Slaczka (1986) tarafından karbonatlı çinko cevherinin amonyak liçi üzerine ultrasesin etkisini araştırmıştır. Ultrasonik bir alanın kullanılması liç edilen karbonatlı cevherin yüzeyi üzerindeki difüzyon tabaka kalınlığını düşürerek daha kısa sürede liç yapılabilmesine izin vermiştir. Ultrasesle birlikte gelen kavitasyon, yayılma basıncı ve kuvvetli türbülanslı akış gibi olaylar sıvı içine batırılmış katı yüzeyinde oluşmuş difüzyon tabakasının karakterini değiştirir. Süspansiyon içine katı-sıvı arayüzeyi üzerine ultrasonik yayılımdan dolayı mikro akımların ortaya çıkışı, süspansiyon kuvvetlice hareket ettirildiği zaman oluşan ile karşılaştırılabilecek kadar difüzyon tabaka kalınlığında kabul edilebilir bir düşmeye sebep olur. Kavitasyon etkileri ultrases uygulanan katı yüzeyi üstünde birçok mikro çatlakların ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Difüzyon hızı artarak solüsyon kapiler boşlukların içlerine kadar gider ve liç hızlanır. Çalışmalarda 22 kHz ve 100 w gücünde piezoelektrik transduserle bir üreteç tank içinde daldırılarak kullanılmıştır [36].

Mikro çatlaklı proseslerdeki ultrasesin etkisi üzerine yapılan araştırmalar göstermiştir ki 23,5 kHz ultrases frekanslı ve 1-2 w/cm² şiddet; kapilerler içine yağ penetrasyon hızını kabul edilebilir bir şekilde arttırmaktadır. Sulfirik asit içinde bakır cevherinden Cu liçi için ultrases kullanmışlardır. Sonuçta liç üzerine ultrasesin pozitif bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Knavskii (1979) ve Terenin (1982) şelitin liç prosesinde ultrasesi kullanmışlardır. Ultrasonik titreşimlerin tanelerin yzeyi üzerinde oluşmuş katı reaksiyon ürünlerinin filmlerini yıkadığını böylece reaktifin yeni bir alan ile kontakt kurmasına izin vermişlerdir.

Revnitzev ve Dmitriev (1965), minerallerin saflaştırılması için ultrasoniğin direkt uygulamalarını araştırmıştır. Ultrasonik kimyasal temizleme ve ultrasonik temizleme adı altında kromit konsantreleri, kayaç kristalleri, cam kumları ve de sentetik aşındırıcı gibi suni orijinli mineraller için uygulanmıştır. Bütün durumlarda ultrases, ikincil bir kimyasal olarak kullanılmıştır [37].

Ultrasonik temizlemenin tekniği bilinen frekansta yoğun ultrasonik titreşimleri veren bir hücre içinde %50-60 katılı pülpün geçirilmesinden oluşmaktadır. Normalde frekans 15-20 kHz aralığında ve 2 W/in²'den daha yoğundur. Yzey filmleri ve ayrı kısımlardan ibaret mineral inklzyonları, pul pul olup dökülür ve yıkanarak uzaklaştırılabilen ince bir şlam oluşturur. Küçük miktarlardaki bastırıcılar etkinliği daha da arttırmıştır. Ultrasonik temizleme, mineral impritelerini de çözebilen reaktiflerle yıkamadan farklıdır. Cam kumlarının muamelesinde demir hidroksit filmlerinin normal olarak gerekli zamanında onda biri kadarlık bir zamandan daha kısa bir sürede ultrasonik temizleme ile uzaklaştırılmıştır. Feldspat saflaştırılması, demiroksit filmlerinin ve kaolin kabuklarının uzaklaştırılmasını gerektirir. Yazarlar ultrasonik temizlemeyi veya en iyi sonuçlar için ultrasonik kimyasal temizlemeyi önermişlerdir. Mekanik temizleme testinde demir oksit içeriği yalnızca %0,27'ye düşürülebilmiştir. Fakat ultrasonik temizleme ile %0,20 Fe₂O₃ elde edilmiştir ve %10 HCl eklenmesi ile impürite %0,17 Fe₂O₃'den daha aza dşrlmştir. Kromit konsantrelerinden fosforun uzaklaştırılması için ultrasonik prosesin mkemmell sonuçlar verdiği bulunmuştur. Sentetik aşındırıcılardan demir oksitlerin uzaklaştırılmasında ultrasonik işlem mevcut metodlardan daha iyi sonuçlar vermiştir. Ultrasonik güç kil, şeyl ve kumtaşı gibi ince taneli sedimanter kayaçların dağıtılması için oldukça kullanışlıdır. Kronik şekilli

mekanik dönüştürücünün ucundan güç üreten bir ultrasonik alet tank tipi aletlerden çok daha etkilidir. Ultrasonik metot çok hızlı ve çoğu ince taneli sedimanter kayaçları için tatmin edicidir. Buna rağmen koyu siyah şeyller çok inatçıdırlar ve dağılmanın tamamlanması için hatırı sayılır derecede uzun zaman gerektirir. Krumbein ve Pettijohn (1938), iyi sonuç veren ve materyalin doğasına bağlı ince taneli sedimanter kayaçların ayrışmasında başarılı olmuş çeşitli metotları listelemişlerdir. Kuvvetli alkalilerle küçük ölçekli liç, uzun süreli sarsıntı ve katı fırça kullanımı analizlerde genellikle hoş olmayan etkilere sebep olabilmektedir. Olmtead (1931), toprak süspansiyonlarını bastırmada ultrasonik güç kullanmıştır [5, 21].

Mark Gibson (1963), şeyllerin ultrasonik dağıtılmasını incelemek amacıyla yaptığı çalışmalarda piezoelektrik bir elementten oluşan soğutmalı bir transduser, elde tutulabilen bir uçtan oluşan mekanik dönüştürücüden oluşmuş ultrasonik jeneratör kullanılmıştır (sonifier). Ultrasonik güç çapı 3-8 inç olan çelik bir çubuk sivrilterek konik şekle getirilmiş mekanik dönüştürücüden yayılmaktadır. Frekans 20 kHz civarındadır. Çalışmalarda 12 farklı şeylin karakteristik örnekleri bu sonifier ile muamele edilerek iki aletin performansları karşılaştırılmıştır. 10 dk ile 5 saat arasındaki bir zaman sonunda sonifier ile muamele edilen örnekler tamamen dağıtılmıştır. Tank tipi aletle ise 2'den 20 saate kadar muamele süreleri içinde örneklerin hiçbirisinden memnuniyet verici bir sonuç elde edilememiştir. Diğer 34 şeyl sonifier ile dağıtılmış ve sadece koyu-siyah karbonlu şeyllerin dağıtılmasında sonuçlar iyi çıkmamıştır [38].

Sonifier ile dağıtılmış şeyllerin uygulama metodu şöyledir. 25-50 gramlık orijinal kuru örnek yaklaşık 4-8 meş'e kırılarak 4-60 güne kadar periyotlarda N/100 sodyum oksalat içinde ıslatılmıştır. Sonra örnek üçte ikisi su ile doldurulmuş 150 cc cam bir kaba yerleştirilmiş sonifiyerin ucu su yüzeyinin altına 1,5 inç derinliğe kadar batırılmıştır. Jeneratör maksimum güce ayarlanmış ve örnek bulanık bir süspansiyon üretilene kadar kırılmıştır (yaklaşık 8-12 dk). Bulanık süspansiyon 1 litrelik bir behere dekante edilmiştir ve distile edilmiş taze besleme suyu dağıtılmamış materyaller için eklenmiştir. Bu işlem örnek tamamen dağıtılmaya kadar devam edilecektir. Oluşan ısı dekante edilen sıcak ikili süspansiyon yerine taze soğuk su ilavesiyle dağıtılmaktadır. Sonifier ile karıştırmanın tane boyundaki kabul edilebilir ufalama sonuçlarının olup olmadığını belirlemek için şeyllerde yaygın olarak bulunan birkaç kil dışı mineral

incelenmiştir. Bu testler mika, kalsit, feldspat ve kuvars taneleri üzerinde yapılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki sonifier ile karıştırma, çok az kuvars aşınması, biraz daha fazla feldspat aşınması, kalsit ve mika gibi kolay kırılabilen minerallerin oldukça büyük şekilde aşınması meydana getirmiştir. Mika çok gevrek olduğundan hızlıca parçalanmaktadır. Aşınmanın çoğu 0,175 mm'den daha büyük sınıflarda gerçekleşmiştir. Bu kumtaşı, kil ve şeyl gibi ince taneli sedimanter kayaların boyut dağılımını ciddi olarak etkilememiştir.

Djendova ve Mehandjski (1992), Nicol ve diğerleri (1986) tarafından yürütülen araştırmalar göstermiştir ki, yoğun ultrasonik titreşimler dispersiyon, koagülasyon ve emülsifikasyon, çözünme oranının değişmesi ve kristalizasyon, kimyasal dönüşümlerin oluşması ve çok fazlı kimyasal işlemlerin hızlanmasına yol açarak ses dalgalarına maruz bırakılan malzemenin durumunu etkin bir şekilde değiştirebilmektedir. Flotasyon işlemi genel olarak mineral yüzeyinin durumuna bağlıdır ve bu yüzden yukarıda sayılan faktörler flotasyon işlemi sırasında malzeme üzerinde değişikliklere yol açmaktadır. Ultrasonik enerjinin flotasyon sistemine verilmesi bu sistemdeki kalitatif ilişkilerde ve flotasyon kinetiğinde değişimlere yol açabilmektedir [39].

Çelik (1989) ise ultrasonik ön işlemlerin oksitlenmiş galen ve kömürün yüzebilirliğine etkisi üzerinde araştırmalarda bulunmuştur. Deneysel çalışmalarda kolektör konsantrasyonu, şlam atımı ve ultrasonik dalganın uygulama süresinin kömür ve galenin flotasyon davranışına olan etkisi üzerinde durulmuştur. Sonuçta ultrasonik dalgaların kimyasal etkisinin kavitasyona bağlanabileceği, basınç ve sıcaklık değerlerinde ultrasonik etkileşim sonucu artışlar olabileceğine değinilmiştir. Flotasyon denemelerinde kömür ve galen yüzeylerinde ultrasonik işlem sonucu reaktiflerin daha etkin bir şekilde absorplandığı saptanmıştır [40].

Özkan (2002) tarafından yapılan -38 mikronun altındaki manyezitlerin etkin olarak değerlendirilmesi çalışmaları kapsamında konvansiyonel, ultrasonik ve ön ultrasonik flotasyon yöntemleri kıyaslanmıştır. Elde edilen veriler ön ultrasonik işleme tabii tutularak 10 mikron altı tanelerin uzaklaştırıldığı flotasyonun, konsantredeki manyezit tenörü ve verimi açısından en iyi sonuçları verdiği saptanmıştır.

Yine Özkan (1996) tarafından yapılan araştırmalarda ülkemiz için çok önemli bir bor minerali olan kolemanitin flotasyonunda oluşan şlam kaplanmalarını önleyebilmek için uygulanan ultrasonik ön işlemler ve eş zamanlı ultrasonik işlemler iki ayrı kademedeyincelenmiş ve ultrasonik ses dalgalarının flotasyon üzerindeki etkileri saptanmaya çalışılmıştır. -0,020 mm tane boyutundaki şamlar klasik eleme yoluyla alınmış, -0,210 mm tane boyutundaki kolemanit cevher numunesine ultrasonik ön işlem uygulanmış ve şlam atılması işlemi tekrar edilmiştir. Sonuçta ultrasonik işlemden sonra şamları yeniden atılan kolemanit numunelerinin çok yüksek tenör ve verimle flote edilebileceği ve ayrıca uygulanan ultrasonik ses dalgaları artışının verimler üzerinde fazla bir değişikliğe yol açmadığı saptanmıştır. Ayrıca, AP825 (alkil sülfonat tipi kolektör), CA927 (alkil sülfosaksinamat tipi kolektör) ve AF70 (alkol tipi köpürtücü) gibi reaktiflerin kullanıldığı kolemanit flotasyonunda numunelerin eş zamanlı ultrasonik işleme tabi tutulması, konsantrelere ait verim ve tenörlerde olumlu artışlara yol açmıştır [41].

Gürpınar (1999) ve arkadaşları tarafından 35 kHz frekansında gerçekleştirilen ultrasonik flotasyon deneylerinde, kömürün %15'lik çözeltisi 15 g/ton MIBC ve 5 g/ton gazyağı ile işleme tabi tutulmuş ve %47,12 tenör değerine ulaşılmış, bu değer ultrasonik etki olmaksızın aynı koşullar altında %35,16 olarak elde edilmiştir. Kalsitin oleik asit ile ultrasonik flotasyonunda ise konvansiyonel flotasyona nazaran tenörde %13'lük artış sağlanmış son olarak kuvarsın katyonik kolektörler kullanılarak yapılan flotasyonunda ise ultrasonik işlem uygulanan numunelerde yüzen malzeme miktarında azalma olmuştur. Bu sonuç araştırmacılar tarafından mineral yüzeyi ve kolektörler arasında oluşan bağların ultrasonik dalgaların etkisiyle hidrodinamik sistemde oluşan türbülans yüzünden kopmasıyla açıklanmıştır [42].

Özer (2002) değişik çökme koşullarında kil numunelerinin çökme karakteristiklerini karşılaştırmak amacıyla doğal ortamda ve ultrasonik titreşim etkisinde çöktürme deneyleri yapmış, pülp te katı oranı, flokülant ilavesi ve ultrasonik titreşim uygulaması gibi parametreleri incelemiş, optimum çöktürme koşullarını tespit etmeye çalışmıştır. Özer tarafından ultrasonik titreşim uygulaması ile çöktürme süresinin yarı yarıya azaltılabildiği ve çöktürme sonucu pülp te katı oranının belirgin şekilde arttığı saptanmıştır [43].

Andaç (2002) ultrases dalgalarının zeolit A sentezi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla 50 ve 60 °C'de statik ve ultrasonik koşullarda olmak üzere deneyler gerçekleştirmiş ve ultrases dalgalarının zeolit A fazının oluşumunu ve diğer fazlara dönüşümünü hızlandırdığını ortaya koymuştur. Ultrasonik ortamda indüksiyon süresinin kısaldığı ve kristal büyüme hızlarının arttığı anlaşılmıştır.

1.4. FLOTASYON

Flotasyon ile zenginleştirme günümüzün en önemli ve en çok kullanılan zenginleştirme yöntemlerinden biridir. Bugün dünya üzerinde bulunan zengin maden yataklarının artık tamamıyla tükenmesi sonucu tenörleri düşük fakir cevher yataklarının değerlendirilmesi mecburiyeti ortaya çıkmıştır.

Fakir cevherlerin değerlendirilmesi esnasında ortaya çıkan diğer bir problem, bu cevherler içindeki minerallerin serbest hale getirilmeleri için çok ince tane boyutlarına öğütülmeleri gereğidir. Çoğu geleneksel yöntemin birkaç mikron mertebesindeki çok ince tanelerde başarılı olamaması nedeniyle diğer yöntemlerin arayışları içerisinde flotasyon uygun bir yöntem olarak bulunmuş ve son yüzyıl içerisinde geliştirilmiştir.

Flotasyon yönteminin avantajlarından biri de ayırım yapılacak mineraller arasında farklı fiziksel özelliklerin gerekli olmaması, minerallerin yüzeylerinin fiziko kimyasal özelliklerinden yararlanılmasıdır. En önemli avantaj ise, bu yüzeysel özelliklerin pülp içine katılan kimyasal reaktiflerle değiştirilebilmesi, ayarlanabilmesi daha doğrusu kontrol edilebilmesidir.

Flotasyon işleminde mineral tanelerinin hava kabarcıklarına yapışması veya yapışmaması bu mineral tanelerinin yüzeylerinin fiziko kimyasal özelliklerine bağlıdır. Bu özellikler pülpe verilen reaktiflerle kontrol edilir ve istenen minerallerin hava kabarcıklarına yapışması istenmeyenlerin yapışmaması sağlanır.

Flotasyon işlemi esnasında minerallerin yüzeysel fonksiyonlarını kontrol eden kimyasal reaktifler yaptıkları fonksiyonlara göre; kollektörler, köpürtücüler, canlandırıcılar, bastırıcılar ve pH ayarlayıcılar olarak sınıflandırılırlar [44].

1.5. BOR MİNERALLERİ

1.5.1. Bor Mineralleri Hakkında Genel Bilgiler

Bor yer kabuğunda 3 ppm konsantrasyon oranı ile en yaygın bulunan 51. elementtir. Atom numarası 5, atom ağırlığı 10,8, özgül ağırlığı: 2-2,5 g/cm³ arasında, ergime noktası 2300 °C, elektron dizilimi 1 s² 2 s² 2 p¹ şeklindedir. 1. i.e: 8,296 eV olan 3. grup elementidir [45].



Şekil 1 17: Kolemanit kristalinin görünümü [46]

Bor ülkemizin sahip olduğu en önemli zenginliklerden biridir. Bazı alanlarda konsantre bor ürünleri kullanılabildiği gibi genel olarak rafine bor bileşiklerine ve özel bor kimyasallarına dönüştürüldükten sonra geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Cam endüstrisinden, sabun ve deterjanlara, gübre ve tarımsal ilaçlardan, aleve dayanıklı malzemelere, yakıt pillerinden, nükleer uygulamalara kadar çok geniş bir kullanım alanı bulunan bor ürünleri günümüz teknolojisinde önemli bir yere sahiptir [7]. Şekil 1.17’de bir bor minerali görülmektedir.

1.5.2. Bor'un Tarihçesi

İnsanoğlu Bor'un varlığından 4000 yıl önce uzak doğuda Tibet'te haberdardı. Sümerler ve Etiler tarafından altın ve gümüş işçiliğinde, Babiller tarafından uzak doğudan getirilerek altın işlemede, Mısırlılar tarafından mumyalama işlemlerinde, Romalılar tarafından cam yapımında, eski Yunanlılar tarafından temizlikte, 9. yüzyılda Arap doktorlar tarafından ilaç yapımında, Çinliler tarafından seramik ve cam üretiminde kullanılmıştır.

Avrupa'ya Marco Polo tarafından Tibet'ten getirildi. Amerika'da ilk kez 18. yüzyılda And Dağları'nda bulundu.

Türkiye'de Bor Madenleri 1978 yılında devletleştirildikten sonra tamamen Eti Holding tarafından işletiliyor. Anadolu topraklarında bor ilk kez 1861 yılında çıkarılmaya başlanmıştır. Bor üretimi 1970 li yıllara kadar büyük ölçüde yabancıların elindeydi. Bor mineralleri, kamu yararı ve ulusal çıkarları korumak amacıyla 4 Ekim 1978 yılında 2172 sayılı yasa ile Bülent Ecevit in başbakanlığı sırasında devletleştirildi ve Etibank'a devredildi [47].

ABD'ndeki bor madeni yatakları İngiliz kökenli RTZ'ye ait olan US Borax ve North American Chemical Co. (NAC) (Overland Park- Kansas) tarafından işletiliyor. Güney Amerika'da Şili ve Arjantin'deki bor yataklarının büyük kısmı da US Borax'a ve NAC'ye ait [48].

1.5.3. Bor Mineralinin Özellikleri

Stratejik değere sahip bor mineralleri doğada yaklaşık 230 çeşittir. Bunlardan ticari değere sahip olanlar ise boraks (tinkal), kernit (razorit), kolemanit, üleksit, propertit, pandermit ve bor asittir [49].

Bor mineralleri bünyelerinde değişik oranlarda bor oksit (B_2O_3) içeren mineraller olup; ülkemizde yaygın olarak bulunan bor mineralleri; tinkal, kolemanit, üleksittir. USGS verilerine göre ticari öneme sahip bor mineralleri Tablo 1.5'te, en yaygın olarak bulunan bor mineralleri ve özellikleri ise Tablo 1.6'da verilmiştir [7, 50].

Tablo 1 5: Ticari öneme sahip bor mineralleri (USGS, 2006) [50]

Mineral	Kimyasal Bileşim	B₂O₃, Ağırlık Yüzdesi
Borasit (stasfurit)	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	62,2
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	50,8
Datolit	CaBSiO ₄ OH	24,9
Hidroborasit	CaMgB ₆ O ₁₁ ·6H ₂ O	50,5
Kernit	Na ₂ B ₄ O ₇ ·4H ₂ O	51
Pandermit	CaB ₁₀ O ₁₉ ·7H ₂ O	49,8
Probertit	NaCaB ₃ O ₉ ·5H ₂ O	49,6
Sassolit	H ₃ BO ₃	56,3
Szaibelyite (ascharite)	MgBO ₂ OH	41,4
Tinkal	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	36,5
Tinkalkonit	Na ₂ B ₄ O ₇ ·5H ₂ O	47,8
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ ·8H ₂ O	43

Tablo 1 6: En yaygın bor mineralleri ve özellikleri [7]

Mineral	Kimyasal Bileşim	B ₂ O ₃ %	H ₂ O %	Kristal Yapı	Sertlik	Özgül Ağırlık	Suda Çözünürlük
Boraks (Tincal)	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	36,51	47,24	Monoklinik	2,0-2,5	1,711-	Çok Yüksek
	Na ₂ O ₂ B ₂ O ₃ ·10H ₂ O					1,715	
Kolemanit (Borocalcit)	2CaO ₃ B ₂ O ₃ ·5H ₂ O	50,8	21,92	Monoklinik	4,0-5,0	2,42-	Çok Düşük
	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O					2,43	
	Ca[B ₃ O ₄ (OH) ₃] ₂ ·H ₂ O						
Uleksit (Boronatrocaltit)	Na ₂ O ₂ CaO ₅ B ₂ O ₃ ·16H ₂ O	42,95	35,57	Triklirik	2,5	1,955-	Orta
	NaCaB ₅ O ₉ ·8H ₂ O					1,961	
	NaCa[B ₅ O ₆ (OH) ₆] ₂ ·5H ₂ O						
Kernit (Rasorit)	Na ₂ O ₂ B ₂ O ₃ ·4H ₂ O	50,95	26,37	Monoklinik	2,5-3,0	1,906	Yüksek
	Na ₂ B ₄ O ₇ ·4H ₂ O						
	Na ₂ [B ₄ O ₆ (OH) ₂] ₂ ·3H ₂ O						
Propertit (Kremarit)	Na ₂ O ₂ CaO ₅ B ₂ O ₃ ·10H ₂ O	49,56	35,65	Monoklinik	3,0-3,5	2,13-	Düşük
	NaCaB ₅ O ₉ ·5H ₂ O					2,14	
	CaNa[B ₅ O ₇ (OH) ₂] ₂ ·3H ₂ O						
Priceit (Pandermit)	4CaO ₅ B ₂ O ₃ ·7H ₂ O	49,83	18,06	Triklirik	3,0-3,5	2,41-	Düşük
	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ ·7H ₂ O					2,48	
	Ca ₂ [B ₅ O ₇ (OH) ₅] ₂ ·H ₂ O						
Datolit (Gadolinit)	4CaO ₂ B ₂ O ₃ ·4SiO ₂ ·2H ₂ O	21,76	5,63	Monoklinik	5,0-6,0	2,97-	Düşük
	Ca ₂ B ₂ Si ₂ O ₉ ·H ₂ O					3,02	
	Ca ₄ [B ₄ (SiO ₄) ₄ (OH) ₄]						
Sassolit (Doğal borik asit)	B(OH) ₃	56,29	43,71	Triklirik	1	1,48-	Çok Yüksek
	B ₂ O ₃ ·3H ₂ O					1,50	
	H ₃ BO ₃						
Hydroborasit	CaOMgO ₃ B ₂ O ₃ ·6H ₂ O	50,53	26,16	Monoklinik	2,0-3,0	2,167-	Yüksek
	CaMgB ₆ O ₁₁ ·6H ₂ O					2,173	
	CaMg[B ₃ O ₄ (OH) ₃] ₂ ·3H ₂ O						
Szaibelyit (Ascharit)	2MgOB ₂ O ₃ ·H ₂ O	41,38	10,71	Monoklinik	3,0-3,5	2,60-	
	Mg ₂ B ₂ O ₅ ·H ₂ O					2,76	
	Mg ₂ (OH)[B ₂ O ₄ (OH)]						
Boracit (Stassfurit)	5MgOMgCl ₂ ·7B ₂ O ₃	62,15		Ortorombik kübik >265 °C	7,0-7,5	2,80-	
	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl					2,87	
	Mg ₃ [B ₃ O ₅] ₂ [BO ₃] ₂ Cl						
Tincalconit (Mohavit)	Na ₂ O ₂ B ₂ O ₃ ·5H ₂ O	47,8	30,93	Hekzagonal	2,5	1,88-	
	Na ₂ B ₄ O ₇ ·5H ₂ O					1,91	
	Na ₂ [B ₄ O ₅ (OH) ₄] ₂ ·3H ₂ O						

BORAKS (TİNKAL) ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) [$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$]

Renksiz ve saydam olmasına rağmen, bileşimindeki çeşitli safsızlıklar nedeniyle pembe, sarımsı, gri renklerde bulunabilir. Sertliği 2-2,5, özgül ağırlığı 1,7'dir. B_2O_3 içeriği %36,5'dir. Tinkal çabuk bozunur. Suyunu kaybederek tinkalkonit'e dönüşebilir. Kille arakatlı tinkalkonit ve üleksit ile birlikte bulunur. Türkiye'de Eskişehir-Kırka yatağında bulunmaktadır [9].

KERNİT ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) [$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$]

Renksiz, saydam beyaz, uzunlamasına bireysel iğne şeklinde küme kristaller halinde bulunur. Sertliği 3, özgül ağırlığı 1,95'dir. Atmosferik koşullarda tinkalkonit'e dönüşür. Soğuk suda yavaş çözünür. B_2O_3 içeriği % 51,0'dir. Kırka'da Na-borat kütlelerinin derin kısımlarında bulunur. Dünya'da ise Arjantin ve A.B.D.'de bulunur [7].

ÜLEKSİT $2(\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O})$ [$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$]

Masif, karnabahar, lifsi ve sütun şeklinde bulunur. Sertliği 1, özgül ağırlığı 1,96'dır. Saf olan beyaz olup, gri renk tonlarında da bulunabilir, ipek parlaklığında olanları da vardır. Kolemanit, hidroborasit ve probertitle birlikte bulunur. B_2O_3 içeriği %43,0'dir. Türkiye'de Kırka, Bigadiç ve Emet'te, dünyada ise Arjantin'de bulunmaktadır.

PROBERTİT $2(\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ [$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$]

Kirli beyaz, açık sarımsı renklerde olup ışınal ve lifsi şekilli kristaller şeklinde bulunur. Sertliği 3,5 özgül ağırlığı 2,14'dür. Kristal boyutları 5 mm ile 5 cm arasında değişir, B_2O_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.

KOLEMANİT ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot \text{H}_2\text{O}$) [$2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$]

Monoklinik sistemde kristallenir. Sertliği 4-4,5 özgül ağırlığı 2,42'dir. B_2O_3 içeriği % 50'dir. Suda yavaş, HCl'de hızlı çözünür. Bor bileşikleri içinde en yaygın olanıdır. Killer içinde cevher boşluklarında iri, parlak, saydam kristaller halinde bulunur. Türkiye'de Emet, Bigadiç, Kestelek yataklarında ve dünya'da A.B.D'dedir.

PANDERMİT ($\text{Ca}_2\text{B}_{10}\text{O}_{17} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) [$2\text{CaO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$]

Beyaz renkte ve yekpare olarak gözükmektedir. Sertliği 3-3,5, özgül ağırlığı 2,4'dür Kireçtaşına benzemektedir. Sultançayırı ve Bigadiç yataklarında gözlenmektedir. Zaman içinde kolemanit ve kalsite dönüşmektedir. B₂O₃ içeriği % 49,8'dir.

HİDROBORASİT (CaMgB₆O₁₁.6H₂O) [CaO.MgO.3B₂O₃.6H₂O] Bir merkezden ışınal ve iğne şeklindeki kristallerin rastgele yönlenmiş ve birbirini kesen kümeleri halinde bulunur. Lifsi bir dokuya sahiptir. B₂O₃ içeriği % 50,5'dir. Beyaz renkte, bazen içerisindeki safsızlıklara bağlı olarak sarı veya kırmızımsı renklerde (arsenik içeriğine göre) ve kolemanit, üleksit, probertit, tunelit ile birlikte bulunur. Türkiye'de en çok Emet-Doğanlar-İğdeköy sahasında ve Kestelek'te rastlanır [45].

1.5.4. Bor Cevherlerinin Kullanım Alanları

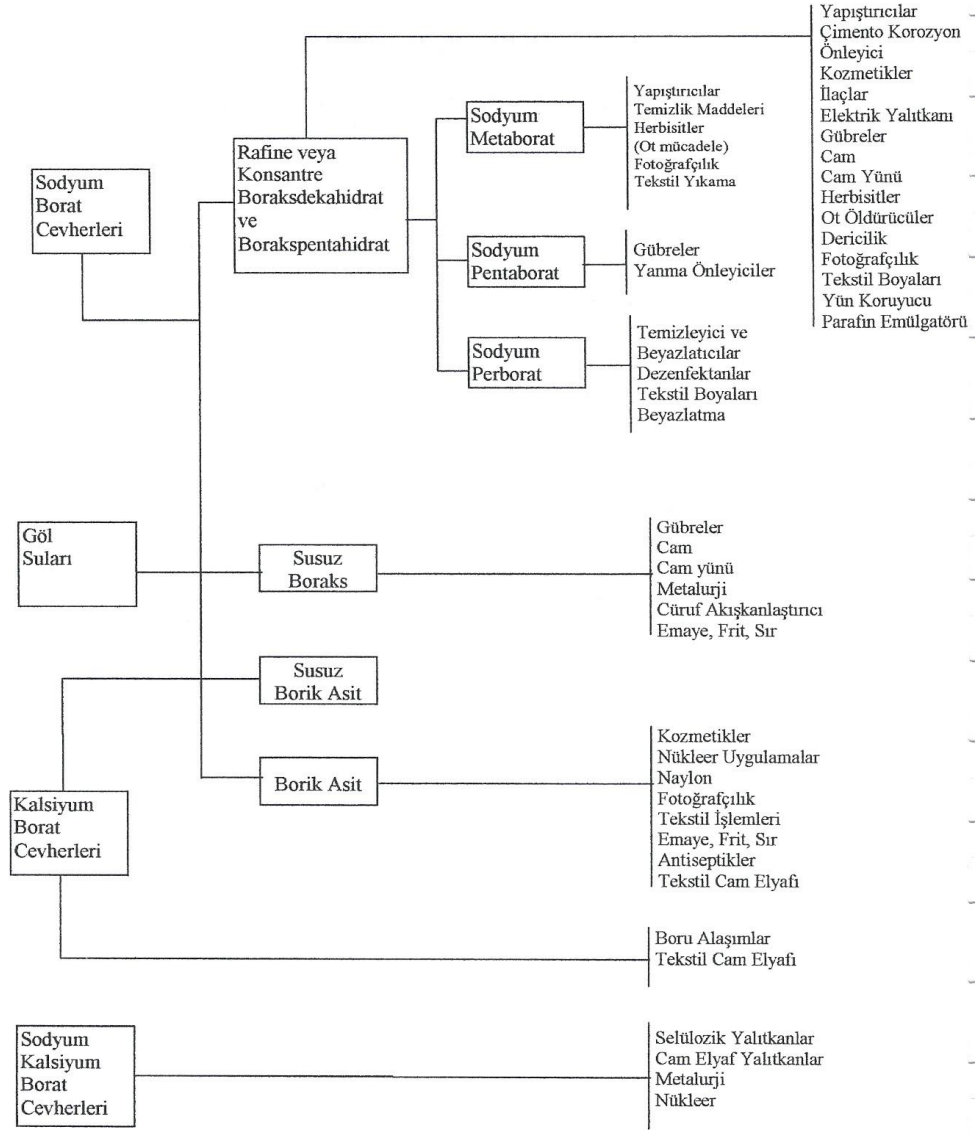
Üretilen bor minerallerinin % 10'a yakın bir bölümü doğrudan mineral olarak tüketilirken, geriye kalan %90 oranındaki kısmı bor cevherlerinden üretilen borat ürünleri elde etmek için kullanılmaktadır.

Dünyada bor tüketimi yüksek olmasına karşın tüketim alanları ülkelere göre çarpıcı şekilde sektörel bazda değişim göstermektedir. A.B.D'de ana tüketim sektörü izolasyon ve cam sanayi iken Avrupa ülkelerinde ise sabun ve deterjan sektörü, Japonya'da fiberglas ve tekstil sektörüdür. Belli başlı tüketim alanlarını; Cam ve seramik sanayi, yanmayı önleyici maddeler, sabun ve deterjan sanayi, metalurji, tarım, nükleer sanayi, diğer sanayi sektörleri oluşturur [7]. Ticari önemi olan bor mineralleri ve bileşiklerinin önemli kullanım alanları Tablo 1.10'da ve bor bileşikleri ve kullanım alanları Şekil 1.7'de verilmiştir.

Tablo 1 7: Ticari önemi olan bor mineralleri ve bileşiklerinin önemli kullanım alanları [49]

Kullanım alanı		Mineral/bileşik*
Cam	İzolasyon cam elyafı	Tinkal, üleksit, probertit, BDH, BPH, SB, BA
	Tekstil cam elyaf	Kolemanit
	Borosilikat camlar	Tinkal, üleksit, probertit, kolemanit, BPH, SB, BA
	Özel camlar	BDH, BPH, SB, BA
Cam seramikleri		Tinkal, üleksit, BDH, BPH, SB, BA
Emaye, sır, frit		Tinkal, üleksit, kolemanit, BDH, BPH, SB, BA, BO
Temizleme ve ağartma	Sabun, deterjan	Sodyum perboratlar
	Kağıt hamuru	Sodyum borhidrür
Zirai uygulamalar	Gübre	BDH, BPH, SB, BA, kolemanit
	Yabani ot öldürücüler	BDH, BPH, BA, bakır metaborat, sodyum Metaborat
	Böcek öldürücüler	BDH, BPH, BA, disodyum oktaborat, glikol Boratlar
Ahşap emprenyesi		BDH, BPH, BA
Alev geciktiriciler	Selülozik izolasyon malzemeleri	BDH, BPH, SB, BA
	Plastik malzemeler	Çinko boratlar, amonyum fluoborat, baryum metaborat, sodyum pentaborat
Metallurjik uygulamalar	Borürleme	Bor halojenürler
	Demir esaslı ve demir dışı borlu	Susuz boraks, bor oksit, boratlar
	Alaşım lar	
	Flakslar	Susuz boraks, bor oksit, boratlar

BDH: Boraks dekahidrat, BPH: Boraks pentahidrat, SB: Susuz boraks, BA: Borik asit, BO: Bor oksit



Şekil 1 18: Bor bileşikleri ve kullanım alanları [51].

1.5.5. Dünya Bor Rezervleri

Borat cevheri yatakları yeryüzünde bazı bölgelerde yoğunlaşmıştır. Kaliforniya, And Dağları, Türkiye ve Orta Asya en büyük rezervlerin olduğu bölgelerdir.

Ülkemiz ise dünya bor rezervlerinin büyük bir bölümünü topraklarında bulundurmaktadır. Buna rağmen toplam bor üretimi ve pazar payı son yıllardaki çıkışına rağmen olması gereken yerde değildir. Şekil 1.19'da dünya üzerinde borun bulunduğu bölgeler, Tablo 1.8'de dünya bor rezervleri gözükmektedir. Tablo 1.9 ise dünya bor üretimini yansıtmaktadır [49].



Şekil 1 19: Dünya üzerinde bor rezervlerinin bulunduğu bölgeler [49]

Tablo 1 8: Dünya bor rezervleri (x1000) [47]

ÜLKE	GÖRÜNÜR EKONOMİK REZERV	MUHTEMEL MÜMKÜN REZERV	TOPLAM REZERV	TOPLAM REZERVDEKİ PAY (%)
Türkiye	227.000	624.000	851.000	72,2
A.B.D.	40.000	40.000	80.000	6,8
Rusya	40.000	60.000	100.000	8,5
Çin	27.000	9.000	36.000	3,1
Arjantin	2.000	7.000	9.000	0,8
Bolivya	4.000	15.000	19.000	1,6
Şili	8.000	33.000	41.000	3,5
Peru	4.000	18.000	22.000	1,9
Kazakistan	14.000	1.000	15.000	1,3
Sırbistan	3.000	0	3.000	0,3
TOPLAM	369.000	807.000	1.176.000	100

Tablo 1 9: Dünya bor üretimleri^{1,2} [50]

(Bin ton)					
ÜLKE	2002	2003	2004	2005	2006 ^e
Arjantin	516	512	821	633	^r 650
Bolivya, Üleksit	40	110	68	63	^r 60
Şili, üleksit	431	401	594	461	^r 460
Çin ^{e, 3}	145	130	135	140	145
Almanya, boraks ^e	--	^r --	^r --	--	^r --
İran, boraks ⁴	2	3	2	3	^{r, e} 3
Kazakistan ^e	30	30	30	30	30
Peru	7	9	10	^r 10	^r 10
Rusya ^{e, 6}	1.000	1.000	500	400	400
Türkiye ⁷	1.368	1.377	1.697	2.200	^{r, e} 2.500
ABD ⁸	1.050	1.150	1.210	1.150	W
Toplam	4.580	^r 4.720	^r 5.070	5.090	^r 4.260

^eTahmini. ^pÖn Hazırlık. ^rYenilenmiş. W Şirket verilerini ifşa etmemek için toplama dahil edilmemiştir.

¹Dünya toplamı, ABD verileri ve tahmini veriler 3 haneye yuvarlanmıştır

²Tablo 20 Mayıs 2007 verilerine kadar içerir.

³Bor okside (B₂O₃) eşdeğeri.

⁴Data are for years beginning March 21 of that stated.

⁵Rapor edilen şekilde.

⁶Harmanlanmış Rus datolit cevheri, tenörü %8,6 B₂O₃.

⁷Cevher elde edilen konsantre.

⁸Satılan veya üreticiler tarafından kullanılan mineraller ve bileşikler, günlük maden üretimi ve pazarlanabilir ürünlerin ikisini de içermektedir.

Belirttiğimiz gibi bu üretim seviyelerine son yıllarda ulaşılmıştır. Oysa 1999 yılı verilerine göre elde edilen sonuçlar Tablo 1.10'da gösterildiği gibidir. Bu durumda bize

bor ve türevlerinin değerinin her geçen gün artmakta olduğunu ve ilerleyen teknoloji ile birlikte kullanımının da yaygınlaşacağını göstermektedir.

Tablo 1 10: 1999 Yılı dünya bor üretimi ve pazar payları [46]

		MİKTAR	
	ÜLKE	(bin ton)	PAY
US BORAX	ABD	560	37
BORAX			
ARGENTİNA	ARJANTİN	27	20
ETİ BOR	TÜRKİYE	475	31
KAMU			
KURULUŞLARI	ÇİN	140	9
JSC BOR	RUSYA	73	5
NACC	ABD	60	4
QUİLBORAX	ŞİLİ	60	4
SUCERSAL			
ARGENTİNA	ARJANTİN	30	2
SQM SALAR	ŞİLİ	16	1
INCABOR	PERU	13	1
DİĞER		57	4
TOPLAM		1511	100

1.5.6. Türkiye' de Bor Yatakları

Türkiye bor yatakları BALIKESİR-Bigadiç-Susurluk, BURSA-Kestelek, ESKİŞEHİR-Kırka, KÜTAHYA-Emet ilçelerinde bulunmaktadır. Bu yataklardan Eskişehir-Kırka bor yatağı bugüne kadar tespit edilen dünyanın en büyük bor yatağıdır. Türkiye' de bulunan bor minerallerinin bulunduğu yerler ve bor içerikleri Tablo 1.11'de verilmektedir [47].

Tablo 1 11: Türkiye’de bulunan bor mineralleri ve B²O³ içerikleri [47]

Mineral	Kimyasal Bileşimi	%B ₂ O ₃	Bulunduğu	
			Yatak	
İnyoit	2CaO.3B ₂ O ₃ .13H ₂ O	37,62	Kırka, Bigadiç	
Meyerhoferit	2CaO.3B ₂ O ₃ .7H ₂ O	46,72	Kırka, Emet, Bigadiç	
Kolemanit	2CaO.2B ₂ O ₃ .5H ₂ O	50,81	Kırka, Emet, Bigadiç, Susurluk, Kestelek	
Terşit	4CaO.5B ₂ O ₃ .20H ₂ O	37,32	Bigadiç	
Pandermit	4CaO.5B ₂ O ₃ .7H ₂ O	54,59	Bigadiç, Susurluk	
Uleksit	Na ₂ O.2CaO.5B ₂ O ₃ .16H ₂ O	42,95	Kırka, Emet, Bigadiç, Kestelek	
Probertit	Na ₂ O.2CaO.5B ₂ O ₃ .10H ₂ O	49,72	Kestelek	
Tinkal	Na ₂ O.2B ₂ O ₃ .10H ₂ O	36,51	Kırka	
Tinkalkonit	Na ₂ O.2B ₂ O ₃ .5H ₂ O	47,8	Kırka	
Kernit	Na ₂ O.2B ₂ O ₃ .4H ₂ O	51,02	Kırka	
Hidroborasit	CaO.MgO.3B ₂ O ₃ .6H ₂ O	50,53	Kırka, Emet, Bigadiç	
Inderborit	CaO.MgO.3B ₂ O ₃ .11H ₂ O	41,49	Kırka	
Inderit	2MgO.3B ₂ O ₃ .15H ₂ O	37,32	Kırka	
Kurnakovit	2MgO.3B ₂ O ₃ .15H ₂ O	39,89	Kırka	
Tunellit	4SrO.3B ₂ O ₃ .4H ₂ O	54,32	Kırka, Emet, Bigadiç	
Vicit-A	4SrO.11B ₂ O ₃ .7H ₂ O	58,16	Emet	
Howlit	4CaO.5B ₂ O ₃ .2SiO ₂ .5H ₂ O	44,49	Bigadiç, Susurluk	
Terujit	4CaO.MgO.6B ₂ O ₃ .AsO ₅ .4H ₂ O	32,76	Emet	
Kahnit	4CaO.B ₂ O ₃ .AsO ₅ .4H ₂ O	11,69	Emet	

1.5.7. Bor Teknolojileri

Bu konuda yapılan çok sayıda AR-GE çalışması vardır. Özellikle enerji yataklarının tükenmeye başladığının görülmesiyle birlikte dünya yeni enerji kaynağı araştırmalarına ivme kazandırmıştır. Ülkemiz bu çalışmalara gerekli alt yapı yatırımını şimdiye kadar yapmadığı için bu konuda gelişmiş ülkelere nazaran geri kalmıştır. Ancak son yıllarda umut verici çalışmalar yapılmaktadır. Ülkemizin sahip olduğu kaynaklarını ve özellikle önemi gün geçtikçe artan bor madenini gerçek bir kazanca dönüştürmesi yolunda hızlı ver sağlam adımlar atması gerekmektedir ve beklenmektedir.

Tübitak'ın 2002 yılında yayınladığı "Bor Raporu" bu yönde atılmış güzel bir adım ve aydınlatıcı bilgiler içermektedir. Bu rapora göre hazırlanan "Bor Master Planı" da atılması gereken öncelikli adımları detaylı bir şekilde işlemiştir. Burada detaylarına girmeyeceğimiz bu plana göre tüm işlem adımları tek tek gösterilmiş ve bu yolda izlenecek rota çizilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda kurulan Boren Enstitüsü çalışmalarına devam etmektedir [49].

Türkiye'de bor konusu özellikle son yıllarda güncellenmiş, pek çok kurum ve kuruluş bu konuda çalışmalar yapmaya başlamıştır.

1.5.8 Bor Üretiminden Kaynaklanan Çevre Sorunları

Bor ürünlerinin çevresel etkileri diğer sanayi sektörlerinininkine oranla çok daha düşük düzeyde ve daha az zararlıdır. Hatta; kemoterapi sonrası radyoaktif maddelerin etkisini azaltmak üzere kullanımı, insan ve canlılara gerekliliği nedeniyle çevre dostu sayılabilecek elementlerdendir. Birçok ülkede mineral takviyesi amacıyla insanlar için bor tabletleri üretilmeye başlanmıştır. Tarımda kullanımı da aynı şekilde gelişime çok açık görülmektedir. Bor, insanlarda beyin gelişiminden kemik gelişimine, menapozdan alerjiye ve metabolizmanın çalışmasına kadar birçok işlevinden dolayı günlük olarak alınması gereken elementlerden birisidir. İnsanlar günlük bor ihtiyacını sularından ve yiyeceklerden karşılamaktadırlar. İnsanlar tarafından günlük alınan bor miktarı 1.2 mg/gün olarak tahmin edilmektedir. Global düzeydeki içme sularında kabul edilebilir bor seviyesi ise 0.1 - 0.3 mg/lt.'dir (WHO,1998). Yetişkinlerin insanların; güvenilir olarak günlük alabileceği bor miktarı ise 1-13 mg/gün olarak kabul edilmektedir (Nielsen,1997). İnsanlarda akut toksitesisi hakkında kesin bilgi olmamasına rağmen

günlük alınabilir bor dozu 0.4 mg/kg olarak verilmektedir (WHO,1998). Borların insan ve hayvanlarda; kanserojen etkisi ise yoktur.

Bitkilerde ve hayvanlarda eksikliği de bazı sorunlara yol açmaktadır. Dolayısıyla, tüm canlıların bora hayati ihtiyacı vardır. Bor, ağızdan alındığında düşük toksitite değerine sahiptir.

Borun insan sağlığına etkileri konusunda araştırmalara devam edilmektedir.

Buna karşılık çevre konusunda aynı duyarlılık içerisinde aşağıda belirtilen noktalara önem verilmelidir:

- Bor ürünlerinin nakliyesinde kullanılan tüm vasıtaların sızdırmaz, tozlaşmaya ve dökülme gibi, hem kirlenmeye hem de zayiata neden olmayacak şekilde seçilmelidir.
- Cevher zenginleştirme ve rafinasyon işlemleri esnasında oluşan bor içeren sıvı atıkların sızdırmaz gölet veya barajlarda depolanması, katı atıkların ise yine çevreyi kirletmeyecek şekilde muhafaza edilmesine aynı özen içerisinde devam edilmelidir.
- Sulu bor gübre ve tarım sektöründe kullanılan en önemli bir bor ürünü olup borik asit ve boraks'tan üretilmektedir.
- Tarım Ülkesi ve borik asit-boraks üreticisi durumunda olduğumuz göz önünde bulundurularak katma değeri yüksek bu ürünün üretilmesi için girişimlerde bulunulmalıdır.
- Atık barajlarında toplanan bor atıklarının sanayide kullanımı için gerekli araştırmalar yapılmalı ve ilgili endüstri dalları ile ortak projeler geliştirilmelidir.
-

1.6. EMET BOR İŞLETME MÜDÜRLÜĞÜ

Bu tez kapsamında deneysel çalışmalarda kullanılan kolemanit numuneleri Eti Maden A.Ş. Kütahya Emet Bor İşletmesi'ne bağlı Hisarcık ve Espey ocaklarındaki konsantratör çıkışı ürünlerden ve atık barajlarından temin edilmiştir. Bu bağlamda ilgili işletme hakkında gerekli bilgiler aşağıda verilmiştir.

1.6.1 Tarihi ve Kuruluşu

Emet Bor İşletme Müdürlüğü, Kütahya ilinin Güneybatısındaki Emet ilçesinde kurulmuş olup, Kütahya ili merkezine 100 km. uzaklıktadır. İşletmenin kuruluş gayesi; ülkemizin yeraltı zenginlikleri içerisinde önemli bir yeri olan bor cevherini aramak, işletmek, zenginleştirmek ve gerektiğinde bunlardan kimyasal işlemlerle bor bileşiklerini üretmektir. Türkiye'nin bor mineralleri rezervinin önemli bir bölümünü oluşturan Kütahya-Emet yatağı 1956 yılında M.T.A. jeologu Dr. Gawlik tarafından bulunmuştur. 12.08.1958 tarihinde bölgedeki bor tuzu sahaları M.T.A. tarafından Etibank'a devredilmiştir.

Emet Bor İşletme Müdürlüğü; 1958 yılında Etibank Emet Kolemanit Maden İşletmesi Şantiye Şefliği olarak kurulmuş ve daha sonra geçici Müdürler Kurulunun 10.06.1961 tarih ve 1910/9 sayılı kararı ile Müessese haline getirilmesine karar verilmiş, Sanayi Bakanlığının 01.02.1962 tarihli onayını müteakip, Türkiye Ticaret Sicili Gazetesinin 24.02.1962 tarih ve 1500 sayılı nüshasında yayınlanarak Emet Kolemanit İşletmesi Müessesesi Müdürlüğü haline gelmiştir [52].

M.T.A. tarafından Etibank'a devredilen sahalar; güneyde Hisarcığa 4 km. mesafedeki Hamamköy ile kuzeyde Emet'e 4 km. mesafedeki Espey bölgesini içine almaktadır.

Espey bölgesinin 1 km. kuzeybatısında yer alan Killik mevkiinde 1957 yılında özel sektörde madencilik faaliyetlerine başlanmış ve 1979 yılındaki devletleştirmeye kadar sürdürülmüştür. Espey Bölgesinde Etibank tarafından yapılan sondajlı aramalar sonucunda 1969 yılının Nisan ayında yeraltı üretim metodu ile madencilik faaliyetlerine başlanmıştır. 1979 yılında özel sektörden devir alınan Yeni Espey Ocağı ile birlikte kapalı işletme olarak sürdürülen üretim faaliyetleri 1990 yılında açık işletmeye dönüştürülmüştür.

1970 yılında hazırlanan proje ile Rudis (Yugoslavya) firmasına anahtar teslimi olarak verilen Hisarcık konsantratör tesisinde 18.01.1973 tarihinde deneme çalışmalarına başlanılmıştır.

1987 yılına kadar roş olarak satılan Espey kolemanit cevheri 1987 yılından itibaren Hisarcık konsantratörüne taşınarak zenginleştirilmiştir. 1987 yılından itibaren

Hisarcık'ta bulunan Mobil yıkama tesisi Espey'e taşınarak Espey tüvenan cevheri burada işlenmeye başlanmıştır. 1997 yılında yapımına başlanan, Espey konsantratör tesisi devreye alınarak Espey cevheri burada zenginleştirilerek satışa hazır hale getirilmektedir.

1997 Yılında yapımına başlanan ve 27/02/2004 tarihinde resmi açılışı yapılan Borik Asit Fabrikası yıllık 100.000 ton üretim kapasitesine sahiptir. Üretim için gerekli olan sülfirik asit Bandırma Bor ve Asit Fabrikaları İşletme Müdürlüğünden temin edilmektedir. Üretilen Borik Asit % 90-95'lik kısmı yurt dışına geri kalan kısmı yurt içi piyasalara satılmaktadır [52].

1.6.2 Emet Bor İşletme Müdürlüğünde Bulunan Üretim Tesisleri

1.6.2.1 Hisarcık Açık Ocak Tesisi

Tüvenan cevher basamak üzerleri dekapaj işini yapan müteahhit tarafından temizlendikten sonra üretim faaliyetlerine başlanmaktadır. Tüvenan cevher üretimi 0., 1., 2. ve 3. zonlarda yapılmaktadır. Delme patlatma yöntemiyle gevşetilen cevherler, ekskavatörler aracılığıyla kamyonlara yüklenmektedir. Cevherler arsenikli ve normal cevher olmak üzere uygun yerlerde stoklanır.

1.6.2.2 Hisarcık Konsantratör Tesisi

Hisarcık konsantratör tesisi esas itibari ile kırma-yıkama-sınıflandırma ve triyaj yöntemleri ile çalışan fiziksel bir zenginleştirme tesisidir. Tesis akım şeması Şekil 1.20'de sunulmuştur.

180 t/h teorik kapasiteli konsantratör tesisine açık oaktan veya tüvenan cevher stoğundan ağır iş kamyonları ile yüklenen cevher, ızgara açıklığı 60*90 cm olan 90 m³ kapasiteli siloya beslenir. Tüvenan cevher silosuna dökülen cevher, 5° eğimli ve 180 t/h kapasiteli çelik paletli besleyici vasıtası ile kalibreli ızgaralı eleğe beslenir. 13°eğimli ve 180 t/h kapasiteli olan kalibreli eleğe dökülen tüvenan cevher eleme işlemine tabii tutulur. Elek açıklığı 75*75 mm olan bu ekipmandan eleme sonrası +75 mm ve -75 mm boyutlarında iki ürün elde edilir. Bunlardan +75 mm'lik ürün, 100 t/h kapasiteli çeneli ve merdaneli kırıcıda iki kademeli boyuta küçültülerek sırasıyla, -200 mm ve -100 mm'lik çıkış açıklığına indirgenir. En son -100 mm'lik boyut grubuna indirilmiş olan cevher, bant konveyörler vasıtası ile yıkama ünitesine nakledilir. -75 mm'lik ürün ise bant konveyör vasıtası ile elek açıklığı 25 mm olan ikinci bir kalibreli eleğe beslenir.

Kapasitesi 100 t/h olan 14° eğimli bu elekten –25 mm’lik ince pasa ve +25 mm’lik ürün elde edilir. +25 mm boyut grubuna sahip cevher bant konveyör vasıtası ile yıkama ünitesine gönderilir

Merdaneli kırıcı çıkışlı ürün (-100 mm), 100 t/h kapasiteli ve 2° eğimli çift tüplü titreşimli yıkayıcı ile yıkanarak cevher içindeki kilin bünyeden arındırılması sağlanır. Ürün içerisinde ince taneler, yıkayıcı gövdesinde bulunan ve 8 mm çapındaki deliklerden geçmek suretiyle 5 m³ kapasiteli büyük toplama kutusuna aktarılır. İri parçalarla yıkayıcıdan geçerek çift katlı titreşimli eleğe dökülür. 2° eğimli ve 100 t/h saat kapasiteli çift katlı titreşimli elekten yıkama sonrası üç ürün elde edilir [52].

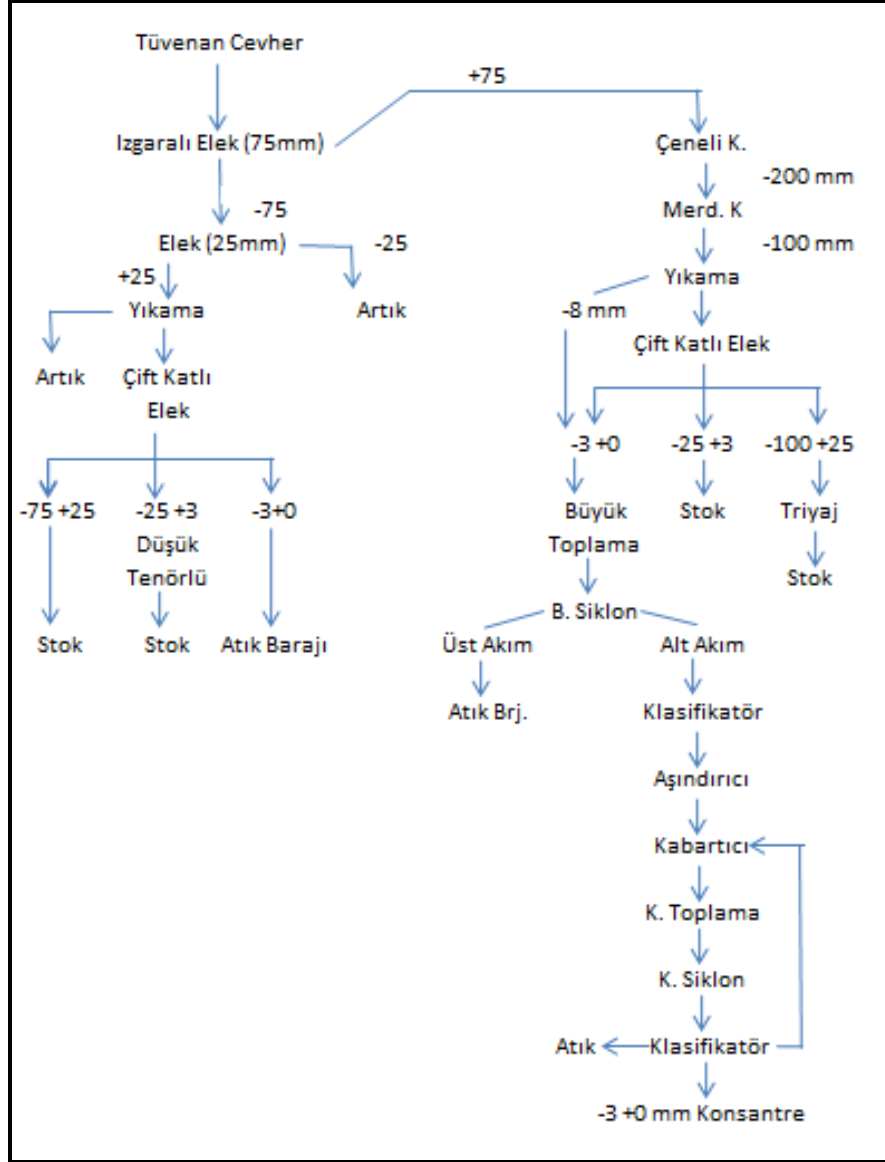
Birinci ürün 25-100mm boyut gurubuna sahip olup bant konveyörler ile seçme işlemi için triyaj ünitesine nakledilir. Triaaj ünitesinde cevher içermeyen parçalar seçilerek ayıklanan 25-100mm’lik iri ve zengin konsantre cevher stok sahasına nakledilerek satışa hazır hale getirilir.

3-25mm’lik boyut grubundaki ikinci ürün ise çift katlı titreşimli elekte yıkandıktan sonra hiçbir işleme girmeden bant konveyörler vasıtasıyla stok döküş yerine nakledilir. Bu ürün satış koşullarına uygun özellikleri taşıdığı için, Satış yapıldığı zamanlarda müşteri firmalara nakledilir. Çift katlı titreşimli elekte elendikten sonra elde edilen son ürün 0-3 mm boyut grubundaki cevherde çift tüplü titreşimli yıkayıcıda elde edilen -8 mm ‘lik ürünün döküldüğü, büyük toplama kutusuna, pülp halinde gönderilir.

Büyük toplama kutusundan çamur pompaları (8"*6" ve 5"*4") vasıtasıyla büyük siklon (180 m³/h) grubuna basılan bu üründen siklon üst akımı şlam içeriğinden dolayı atık barajına, alt akım ise klassifikatöre (15 t/m³ eğim 20°) gönderilir. Klassifikatörde yine şlam içeren tanecikler atık barajına, daha yoğun ve zengin içerikli kısımlarda skraber’lara (kapasite=75t/h) giderler. Tamamı altı adet olan aşındırıcılarda kil, kalker, marn vb. gang mineralleriyle kolemanit cevherleri arasında sekiz köşeli selüllerde çarpma ve sürtünme etkisiyle tane, boyut ve yoğunluk farkı yaratılır. Böylece zenginleşmiş olan katı sıvı karışımı buradan kabartıcı (70 t/saat) ünitesine gönderilir. Pervaneli kabartıcıda bünyedeki mevcut pülpün karıştırılması işlemi yapıldıktan sonra ürün, küçük toplama kutusunda (kapasite 1,5m³) biriktirilir. İkinci grup çamur pompaları (8"*6" ve 5"*4") vasıtasıyla küçük siklon gurubuna (kapasite =70 m³/h)

basılan üründen siklon üst akımı, kapalı devre yaparak büyük toplama kutusunda birikir, daha zengin ve daha yoğun olan siklon alt akımında ikinci klassifikatore (kapasite=10 t/h) akar. Bu klassifikator de biriken pülp içindeki yoğunluğu ve tenor içeriği az tanecikler atığa, biraz zengin içerikli olanlar kapalı devre yaparak pervaneli karıştırıcıya, şlamı olan konsantre de bant konveyor vasıtasıyla -3 mm'lik ürün stokuna gönderilir.

107 kalibreli elek çıkışlı ürün (25 – 75 mm) bant konveyorler ile kütüklü yıkayıcıya (kapasite=100 t/h, eğim=10°) akar. Kütüklü yıkayıcıda zenginleştirme işlemine tabi tutulan üründen şlam içerikli, az yoğun ve B₂O₃ açısından fakir kısımlar atık barajına, daha iri, daha yoğun ve tenörce daha yoğun kısımlarda ,ikinci bir çift katlı titreşimli eleğe (120 t/h,eğim=2°) beslenir. Çift katlı titreşimli elekten, titreşim hareketi basınçlı suyun etkisi ile boyuna sınıflandırma işlemi yaparak üç ürün elde edilir. Birinci ürün 25 – 75 mm boyut gurubunda olup seçme ünitesinde triyaj edilerek satış için stok sahasına gönderilir. 3 – 25 mm boyut gurubundaki ikinci ürün ise satış baz tenörüne sahip olmadığı için düşük tenörlü 3 – 25 mm ürün olarak adlandırılır ve ikinci bir yıkama operasyonuna tabi tutulmak üzere kendine ait stok yerine nakledilir. Son üründe 0 – 3 mm boyut gurubunda olup ekonomik değer taşımadığından artık barajına gönderilir. Ancak mevcut olan by – pass sistemi sayesinde zengin içerikli cevherlerle çalışıldığı zamanlara da -3 mm'lik ürünlerde küçük toplama kutusuna gönderilerek kırıcı ünitesinden gelen -3 mm cevherlerle birlikte zenginleştirilip 0 – 3 mm'lik konsantre ürün elde edilmektedir [52].



Şekil 1 20: Hisarcık konsantratör tesisi akım şeması [52].

1.6.2.3 Espey Açık Ocak Tesisi

Tüvenan cevher basamak üzerleri dekapaj işini yapan müteahhit tarafından temizlendikten sonra üretim faaliyetlerine başlanmaktadır. Tüvenan cevher üretimi Mayıs- Eylül ayları arasında yapılmaktadır. Tüvenan cevher üretimi 0., 1., 2. ve 3. zonlarda yapılmaktadır.

Delme patlatma yöntemiyle gevşetilen cevherler, ekskavatörler aracılığıyla kamyonlara yüklenmektedir. Cevherler arsenikli ve normal cevher olmak üzere uygun yerlerde stoklanır.

1.6.2.4 Espey Konsantratör Tesisi

Espey konsantratörü kırma, yıkama, sınıflandırma ve triyaj yöntemleriyle çalışan fiziksel bir zenginleştirme tesisidir. Cevher aşağıdaki şekilde işlenerek zenginleştirilmektedir. Tesis akım şeması Şekil 1.21'de sunulmuştur. Stoklara alınmış tüvenan cevher, konsantratör silosuna beslenmektedir. Silo altındaki paletli besleyici aracılığıyla 75 mm açıklığa sahip kalibreli eleğe beslenen –500 mm boyutlu tüvenan cevher ikinci bir elemenden geçirilerek –75 mm ve +75 –500 mm boyutlarına ayrılmaktadır. +75 mm tane boyutuna sahip tüvenan cevher, çeneli kırıcıda –100 mm tane boyutuna kırılarak, bant konveyör ile tromel yıkayıcıya beslenmektedir. –75 mm boyutuna sahip tüvenan cevher bir bant vasıtası ile 25 mm aralıklı kalibreli eleğe beslenerek, +25- 75 mm ve –25 mm olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. –25 mm elek altı kil, atık stokuna çekilmektedir. 25-75 mm tüvenan cevher ise bir bant konveyör ile kütüklü yıkayıcıya beslenmektedir.

25- 75 m boyutuna sahip tüvenan cevher kütüklü yıkayıcıda yıkanmaktadır. Kütüklü yıkayıcıdan çıkan cevher, elek açıklığı 3 mm ve 25 mm olan çift katlı titreşimli elekte sınıflandırılarak, 0-3 mm, 3-25 mm , ve 25- 75 mm olmak üzere üç kısma ayrılmaktadır [52].

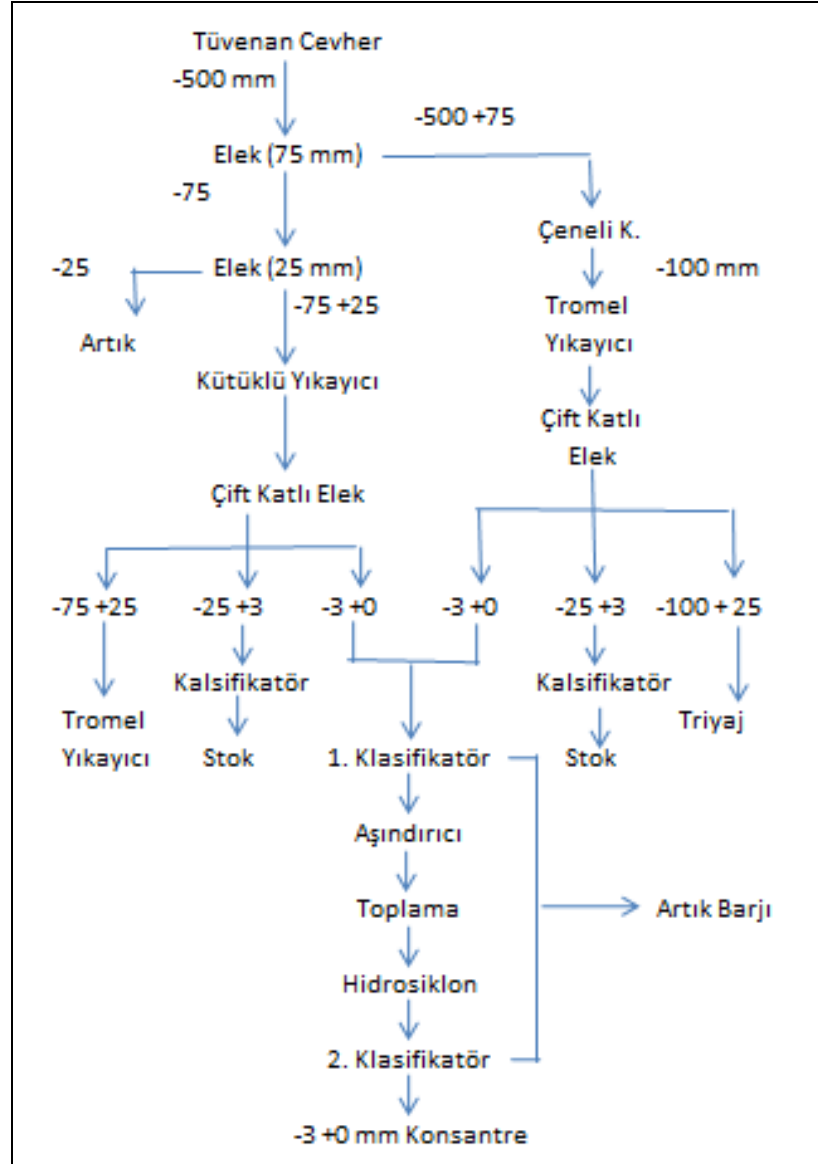
0-3 mm tane boyutlu kısım, 0-3 devresindeki birinci spiral klasifikatöre verilip, klasifikatörde tromel devresindeki 0-3 mm kısım ile birleşmektedir.

3-25 mm tane boyutlu kısım, bant ile 3-25 mm konsantre ürün olarak alınmaktadır. 25-75 mm tane boyutlu kısım ise bant konveyör ile tromel yıkayıcıya beslenmektedir.

Çeneli kırıcıdan gelen –100 mm boyutlu tüvenan cevher ile kütüklü yıkayıcıdan gelen 25-75 mm boyutuna sahip cevherler tromel yıkayıcıda yıkanmaktadır. Yıkanmış –100 mm boyutundaki cevher, tromel yıkayıcı önündeki elek açıklıkları 3 mm ve 25 mm olan çift katlı titreşimli elekte 0-3 mm, 3-25 mm, ve 25-100 mm olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır.

0-3 mm tane boyutuna sahip kısım 0-3 mm devresindeki birinci klasifikatöre gelmektedir. Kütüklü yıkayıcı devresinden gelen 0-3 mm kısım ile birleşerek birinci klasifikatörde şlamından arındırılmaktadır. Daha sonra aşındırıcı hücrelere gelen cevher biraz sulandırılarak, sertliği kile göre daha fazla olan cevherin kilinin

aşındırılması sağlanmaktadır. Cevher buradan toplama kutusuna, daha sonra çamur pompası aracılığıyla hidrosiklona verilmektedir. İkinci klasifikatörde şlamından ayrılan cevher 0-3 mm konsantre cevher olarak alınmaktadır. 3-25 mm tane boyutuna sahip kısım, 3-25 mm klasifikatörüne verilmektedir. Burada şlamından arındırılan cevher, 3-25 mm konsantre cevher olarak alınmaktadır. 25-100 mmlik kısım ise triyaj işleminin yapılabilmesi için bir bant konveyör ile triyaja gönderilmektedir. 25-100 mm tane boyutuna sahip yıkanmış cevher triyaj ünitesinde ayıklanarak son zenginleştirme işlemi yapılmaktadır. Cevher içindeki kil, kalker ve kalsit gibi gang mineralleri kaba atık olarak tanımlanmış olup, konsantre cevher içersinde bulunması istenilmeyen minerallerdir. Ayrıca bünyesinde arsenik bulunan cevherler, renk farkı nedeniyle kolemanit cevherinden kolaylıkla ayrılabilir [52].



Şekil 1 21: Espey konsantratör tesisi akım şeması [52]

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1 DENEYSEL ÇALIŞMALARA ESAS OLAN NUMUNE

Bu tez kapsamında deneysel çalışmalara esas olan kolemanit numuneleri Eti Maden A.Ş. Kütahya Emet Bor İşletmesi'ne bağlı Hisarcık ve Espey ocaklarındaki konsantratör çıkışı ürünlerden ve atık barajlarından çeşitli boyut fraksiyonlarında ayrı ayrı ve temsili olarak alınmıştır.

Alınan numuneler, Hisarcık için;

- 3-25 mm konsantre
- 3-25 mm düşük tenörlü (DT) konsantre
- 0-3 mm konsantre
- Atık barajı (-0,2mm)

Espey için ise;

- 3-25 mm konsantre
- -10 mm konsantre
- 0-3 mm konsantre
- Atık barajıdır. (-0,2.mm)

Alınan numuneler İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarı'na getirilmiştir. Numunelerin alındığı bölge Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2 1: Kütahya-Emet Bor İşletmesi'nin bulunduğu bölgenin uydu fotoğrafı

Çalışmaya konu olan numunelerin komple kimyasal analizleri ilk olarak Eti Maden A.Ş. Kütahya Emet Bor İşletmeleri Laboratuvar'ında yaptırılmıştır. Aynı analizlerdeki bazı bileşenlerin doğrulanması amacıyla numuneler İstanbul Üniversitesi İleri Analizler Laboratuvarı'na da gönderilmiştir. Daha sonra kimyasal analiz değerlerinin tam olarak doğru bir şekilde yorumlanması için bazı numuneler Eti Maden A.Ş. Genel Müdürlüğü Merkez Laboratuvar'ına gönderilmiş ve nihai analiz değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2 1: Alınan numunelerin analiz sonuçları

Numune Adı	% B ₂ O ₃	% SiO ₂	% MgO	% CaO	% TiO ₂	% Al ₂ O ₃	% SrO	% K ₂ O	% Fe ₂ O ₃	As ppm	% K.K 900 °C, 15 dk.
Espey Atık Barajı	25,61	23,67	6,17	13,9	0,27	4,55	0,72	1,7	2,36	1535	20,2
Espey 0-3 mm	39,28	8,72	2,68	22,1	0,15	2,28	1,41	0,83	1,24	350	21,04
Espey -10 mm	26,91	20,07	8,44	16,5	0,15	2,72	0,64	1,16	1,29	1530	21,29
Espey 3-25 mm	43,22	5,06	2,03	23	0,08	1,78	1,11	0,57	0,71	755	21,89
Hisarcık Atık											
Barajı	26,61	18,98	8,65	18,72	0,13	2,13	0,79	0,99	1,17	2960	20,57
Hisarcık 0-3 mm	32,64	11,35	7,61	21,44	0,06	1,14	0,57	0,55	0,54	750	23,47
Hisarcık 3-25 mm											
DT	32,2	11,52	5,56	21,43	0,09	1,28	0,52	0,68	0,61	6560	23,49
Hisarcık 3-25 mm	42,33	7,54	3,04	22	0,05	0,86	0,67	0,42	0,36	275	22,35
Kristal Orpiment	1,7	6,7	0,02	5,68	G	0,45	0,35	0,11	0,21	15,00%	54,25
Kristal Realgar	G	1,32	20,17	31,2	G	0,25	0,02	0,03	1,45	134	45,13

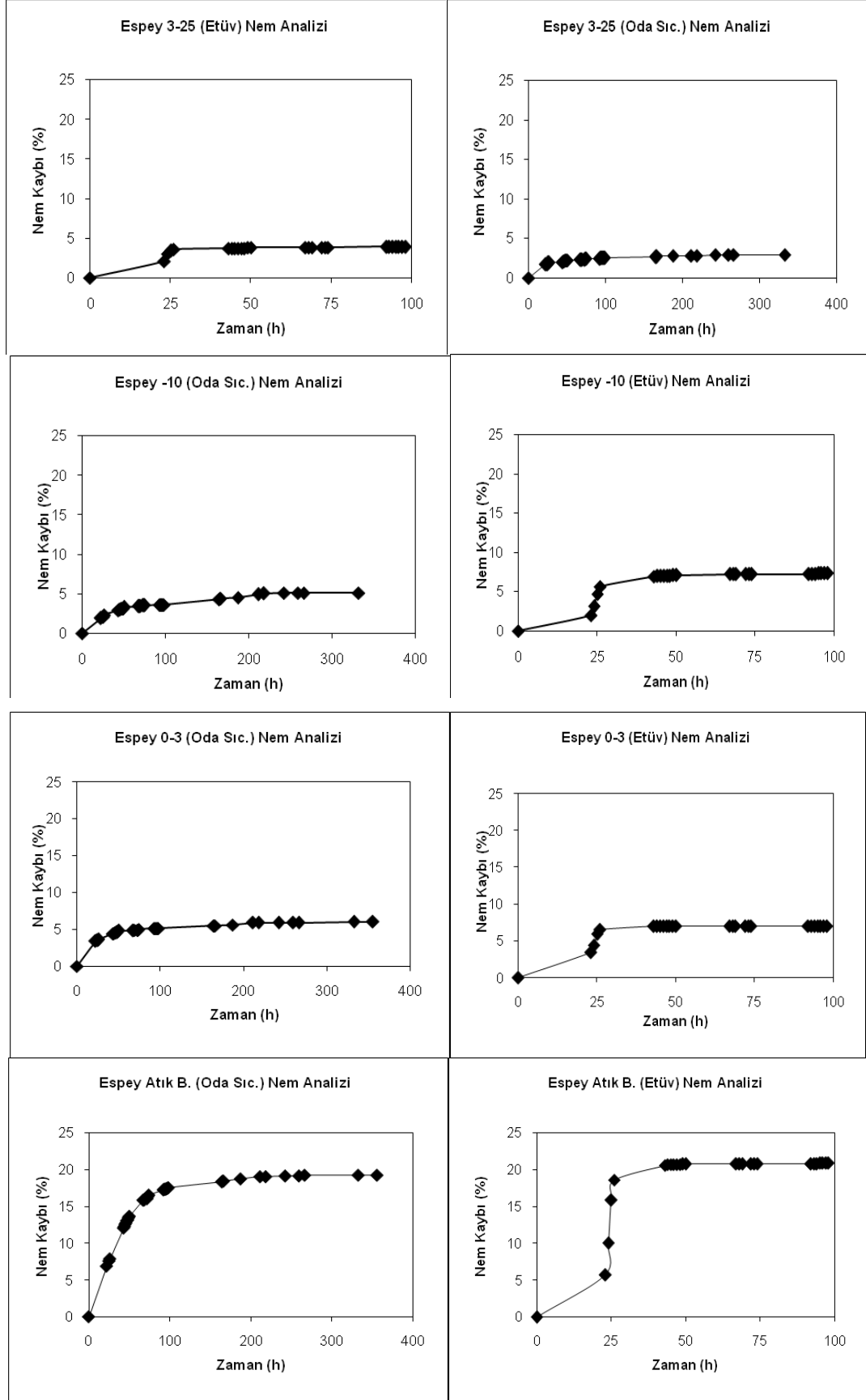
*K.K: Katı Kaybı

*G: Görülmedi

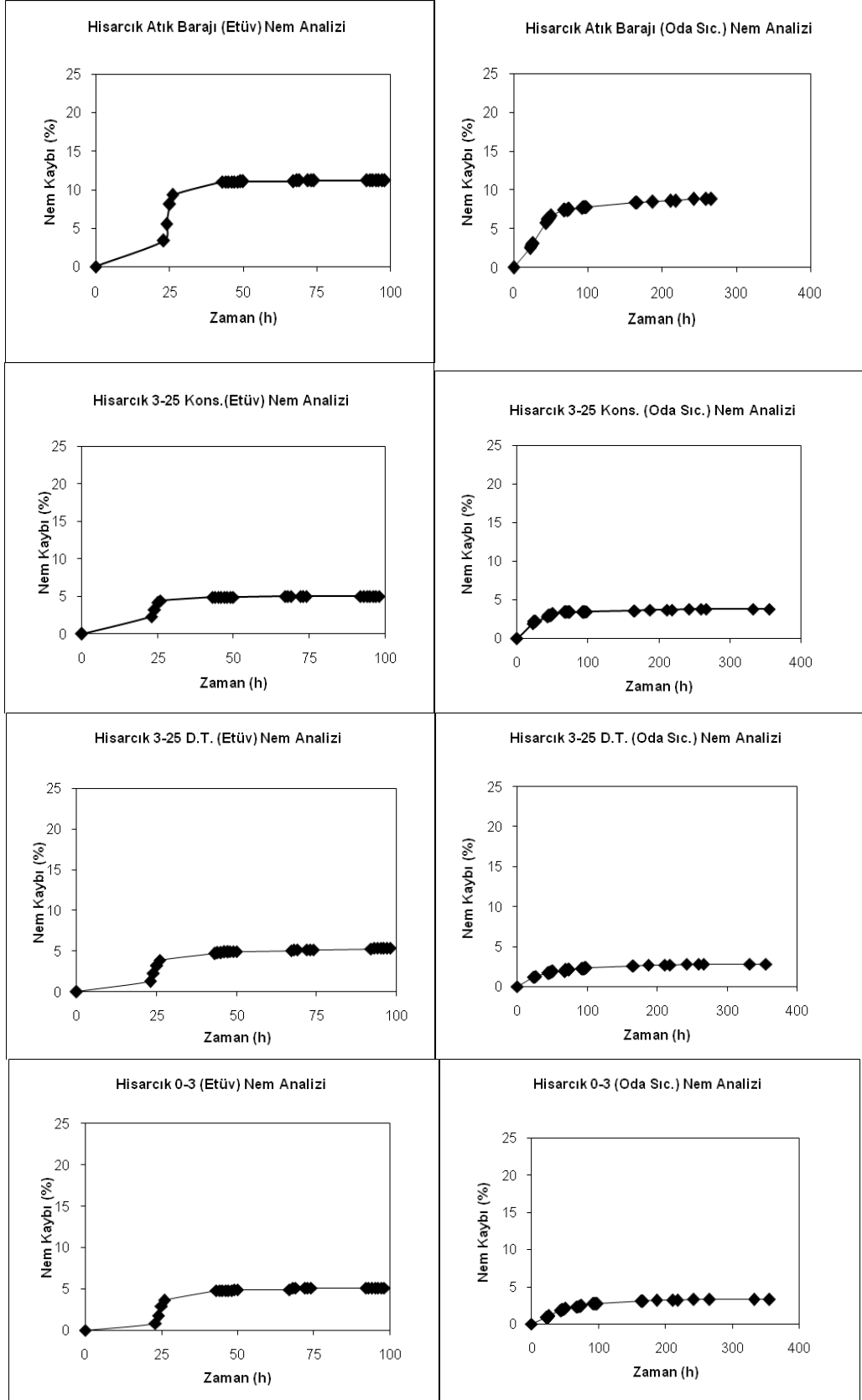
2.2. ZENGİNLEŞTİRME ÖNCESİ İŞLEMLER

2.2.1. Numune Nem Tayini

Numunelerden öncelikle 1'er kg'lık temsili numuneler alınarak oda sıcaklığında 21 °C'de ve etüvde 65°C'de ayrı ayrı kurutma deneyleri yapılmıştır. Böylelikle her fraksiyonun yüzey neminin bulunması amaçlanmıştır. Zamana bağlı nem kayıpları Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de gösterilmektedir.



Şekil 2 2: Esprey numuneleri nem analizleri



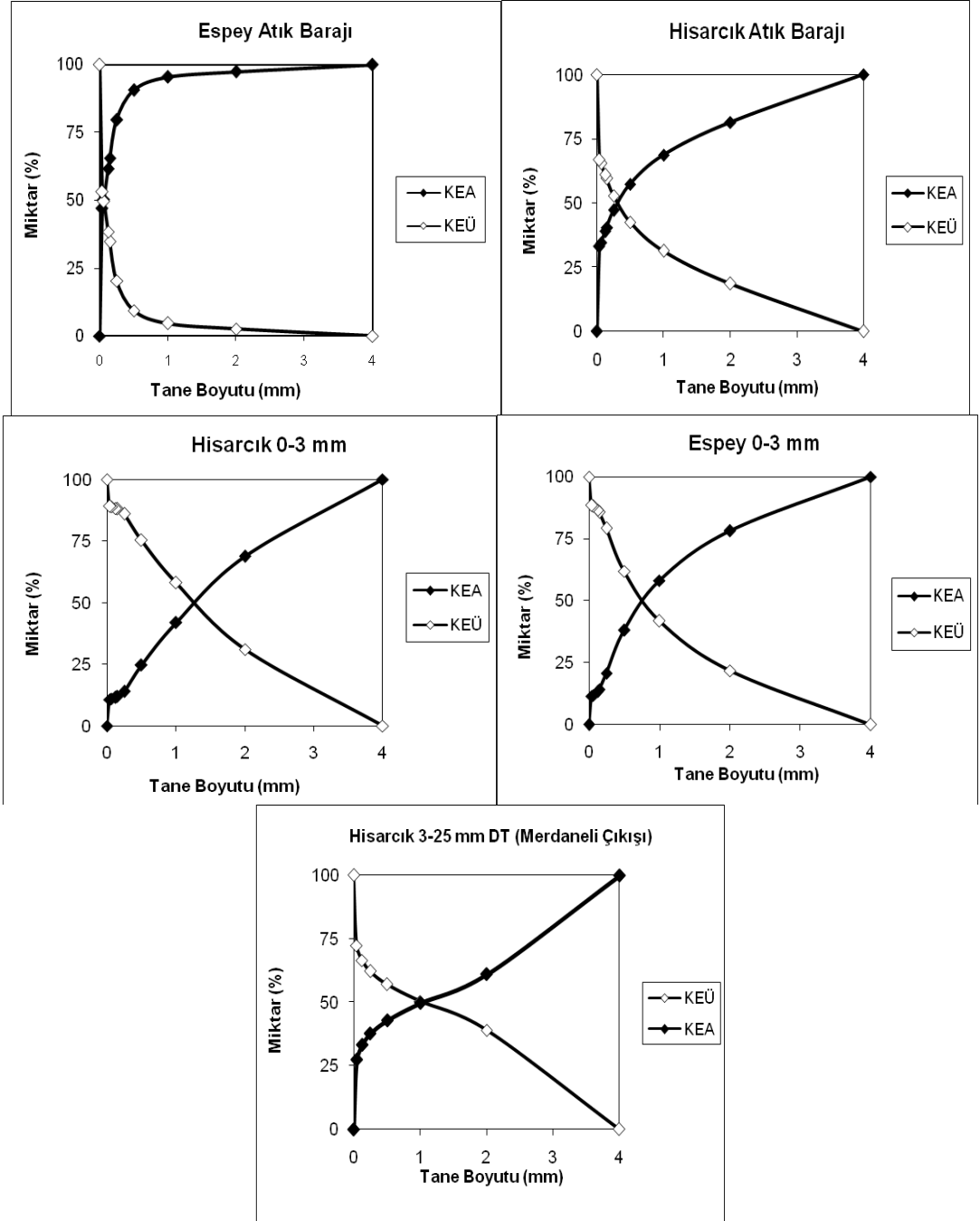
Şekil 2 3: Hisarcık numuneleri nem analizleri

Bu ölçümler esnasında; Espey 3-25 mm için oda sıcaklığında % 3'lük nem kaybına 250 saatte, etüvde % 4 lük nem kaybına 50 saatte, Espey -10 mm için oda sıcaklığında % 5 lik nem kaybına 250 saatte, etüvde % 7 lik nem kaybına 50 saatte, Espey 0-3 mm için oda sıcaklığında % 6 lik nem kaybına 250 saatte, etüvde % 6'lık nem kaybına 50 saatte, Espey Atık Barajı için oda sıcaklığında % 18 lik nem kaybına 150 saatte, etüvde % 20 lik nem kaybına 50 saatte ulaşılmıştır.

Hisarcık 3-25 mm konsantre için oda sıcaklığında % 3,5 luk nem kaybına 250 saatte, etüvde % 5 lik nem kaybına 50 saatte, Hisarcık 3-25 mm düşük tenörlü için oda sıcaklığında % 2.7 lik nem kaybına 250 saatte, etüvde % 5 lik nem kaybına 50 saatte, Hisarcık 0-3 mm için oda sıcaklığında % 3.7 lik nem kaybına 250 saatte, etüvde % 5 lik nem kaybına 50 saatte, Hisarcık Atık Barajı için oda sıcaklığında % 8 lik nem kaybına 150 saatte, etüvde % 11 lik nem kaybına 50 saatte ulaşılmıştır.

2.2.2. Tane Boyut Dağılımı Tespiti

Daha sonra tüm fraksiyonlara ayrı ayrı yaş elek analizi yapılmıştır. Analizler 1000 g numune ile 4,000, 2,000, 1,000, 0,500, 0,250, 0,150, 0,125, 0,063, 0,038 mm'lik elekler kullanılarak yapılmıştır. Analiz değerleri Şekil 2.4.'de görülmektedir. Numunelerin d_{50} ve d_{80} boyutları Tablo 2.2' de özetlenmiştir.



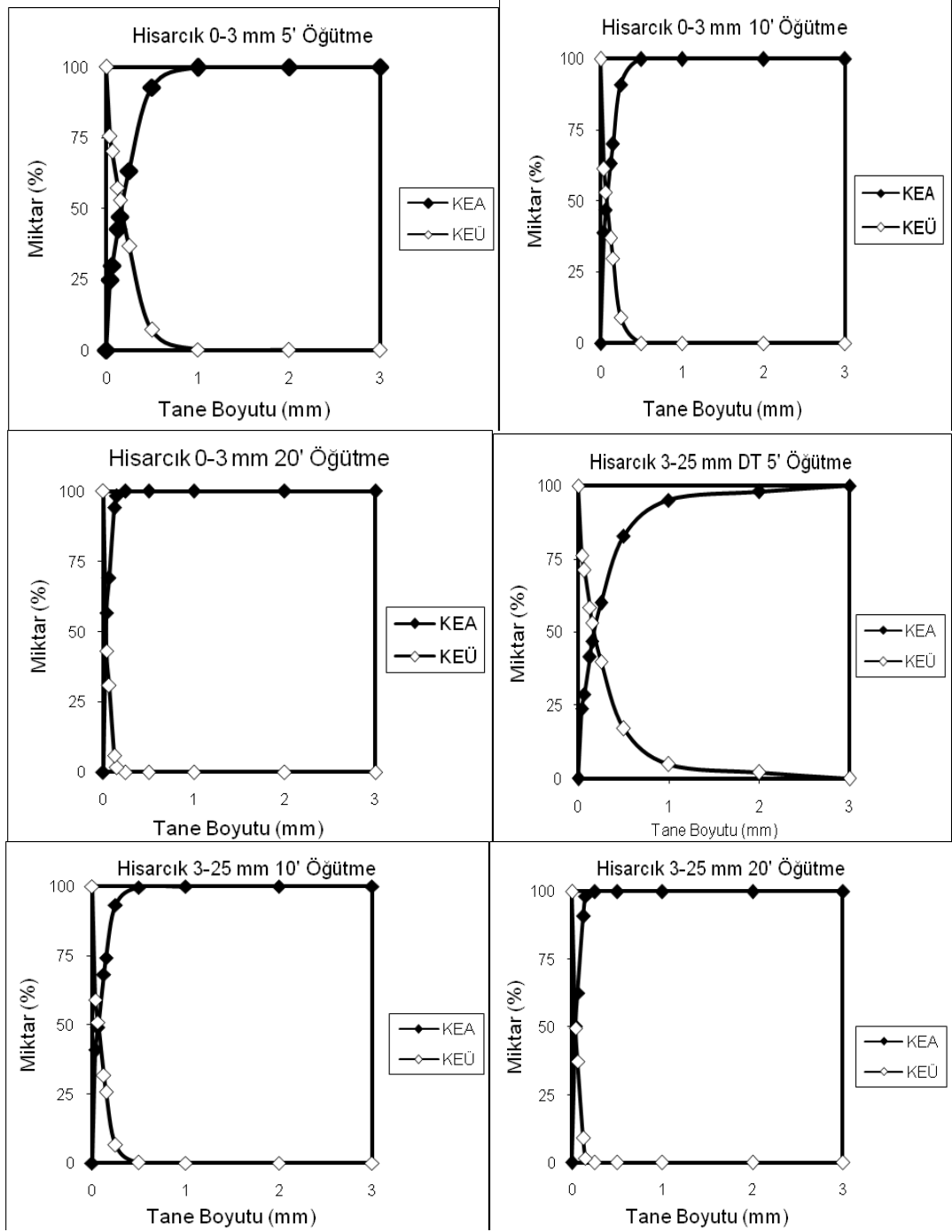
Şekil 2 4: Numunelerin elek analizleri

Tablo 2 2: Numunelerin d_{50} - d_{80} boyutları

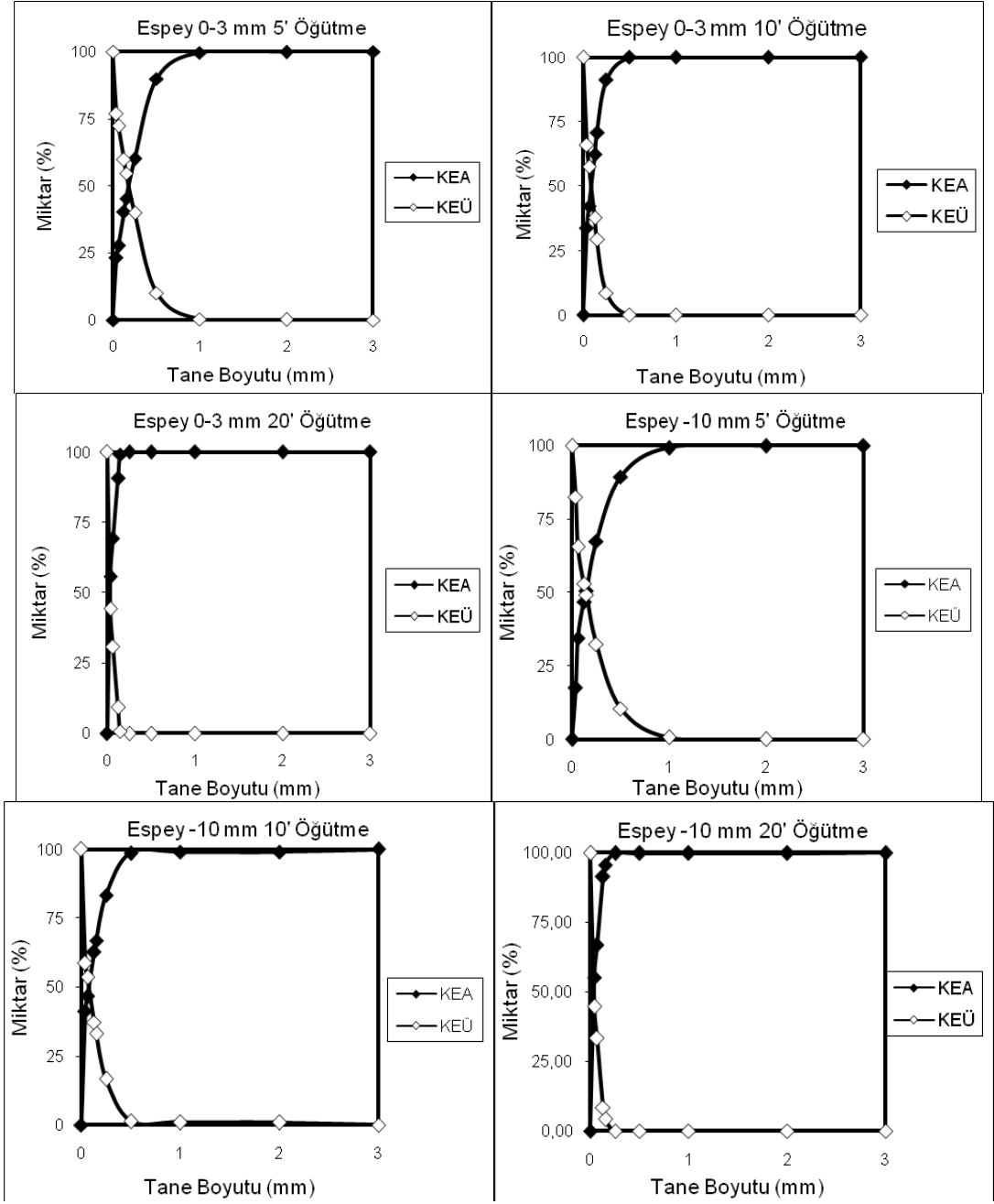
	d_{50} (mm)	d_{80} (mm)
Hisarcık 3-25 mm DT (Merdaneli Çıkışı)	1	3
Hisarcık 0-3 mm	1,2	2,6
Hisarcık Atık Barajı	0,2	1,9
Espey 0-3 mm	0,8	2,1
Espey Atık Barajı	0,05	0,25

2.2.3. Öğütme Deneyleri ve Optimum Öğütme Sürelerinin Bulunması

Fazla ufalanmayı engellemek amacıyla sadece +0,250 mm malzemeye boyut küçültme işlemleri uygulanmıştır. Tane serbestleşmesini sağlamak amacıyla Hisarcık 3-25 mm düşük tenörlü numune öğütmeden önce merdaneli kırıcıdan merdaneler arası mesafe 7 mm olacak şekilde geçirilmiş, 0-3 mm ve -10 mm numuneler ise direkt öğütmeye tabii tutulmuştur. 8792 cm³ hacmindeki çelik çubuklu değirmene çapı 3 cm olan 5 adet, çapı 1 cm olan 78 adet çubuk beslenerek % 30,75'lik bir öğütücü ortam elde edilmiştir. Bu şartlarda 5, 10 ve 20'şer dakika öğütülen 1er kg numunelerin öğütme sonrası elek analizleri Şekil 2.5'teki gibidir. Bu grafikler incelendiğinde d_{50} ve d_{80} boyutlarının Şekil 2.6.'daki gibi olduğu, optimum öğütme şartlarına ise 8 dakikada ulaşıldığı anlaşılmaktadır.

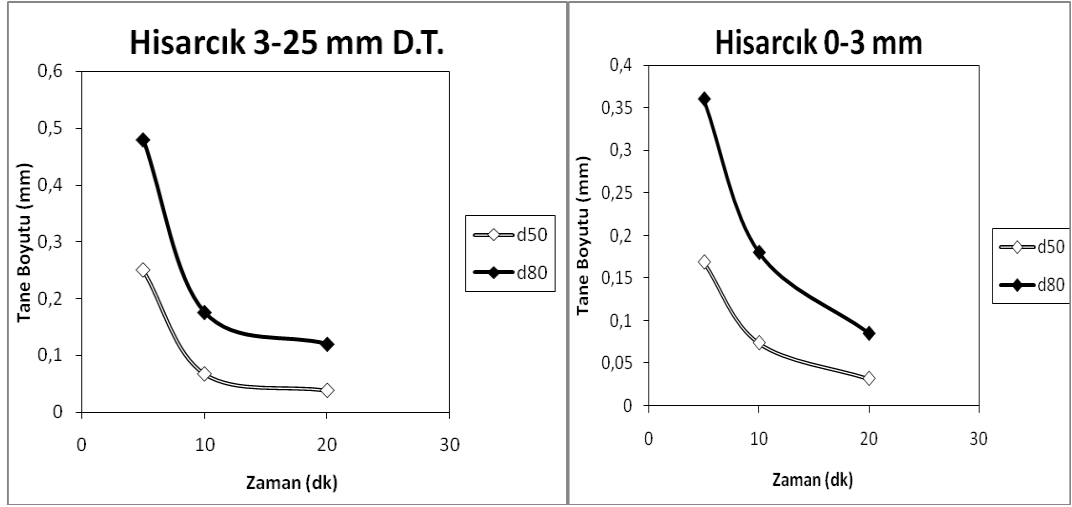


(a)



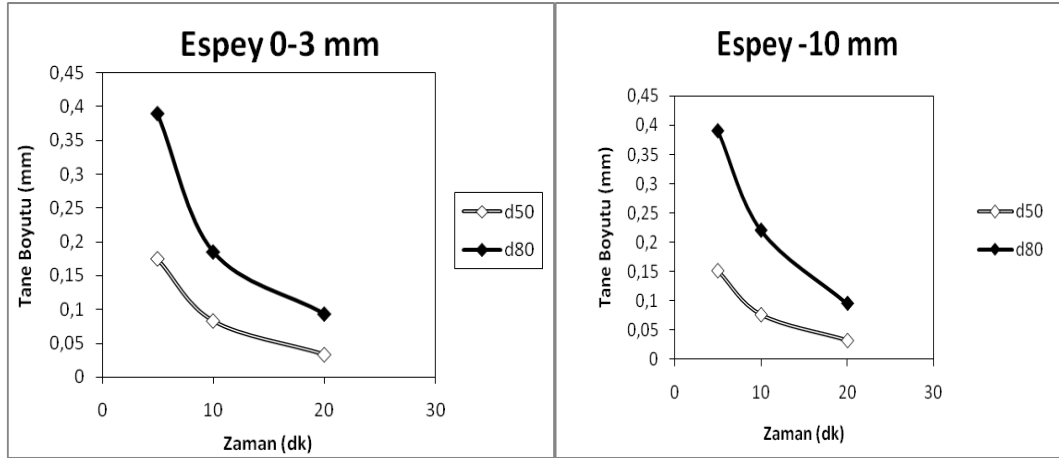
(b)

Şekil 2 5: Numunelerin ögütme sonrası elek analizleri



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 2 6 a-d. Numunelerin öğütme sonrası d_{50} ve d_{80} boyutları

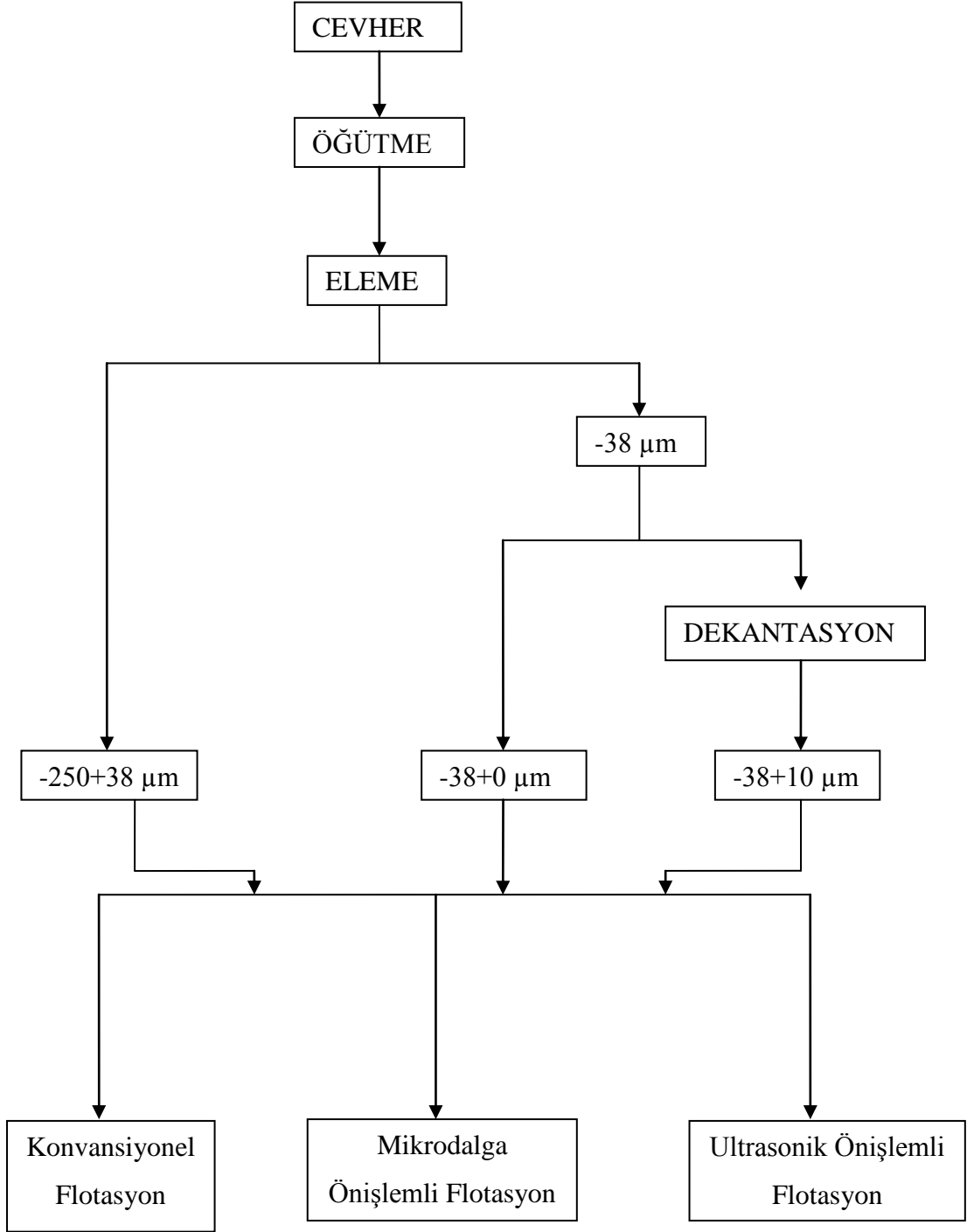
2.2.4. Serbestleşme Tane Boyutu Tespiti

Öğütülen numunelerin tane boyut fraksiyonları optik mikroskopla incelendiğinde %80 serbestleşmenin 250 μm altında sağlandığı saptanmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Gerek Hisarcık, gerekse Espey Ocaklarından alınan 3-25 mm fraksiyonundaki numunelerin kimyasal analizleri incelendiğinde B_2O_3 tenörlerinin borik asit tesisine direkt beslenebilecek şekilde % 42 civarı olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu fraksiyondaki numunelere zenginleştirme işlemi uygulanmasına gerek olmadığına karar verilmiştir. Atık barajındaki numunelere ise kil içeriklerinin yüksek tane boyunun küçük olması nedeniyle zenginleştirme uygulanmamıştır.

Hisarcık ve Espey Ocakları'ndan alınan 0-3 mm numunelere uygulanan genel cevher zenginleştirme akım şeması Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3 1: Hisarcık ve Espey Ocakları'ndan alınan 0-3 mm numunelere uygulanan genel cevher zenginleştirme akım şeması

3.1. KOLEMANİT MİNERALİNİN FLOTASYON KARAKTERLERİNİN İNCELENMESİ

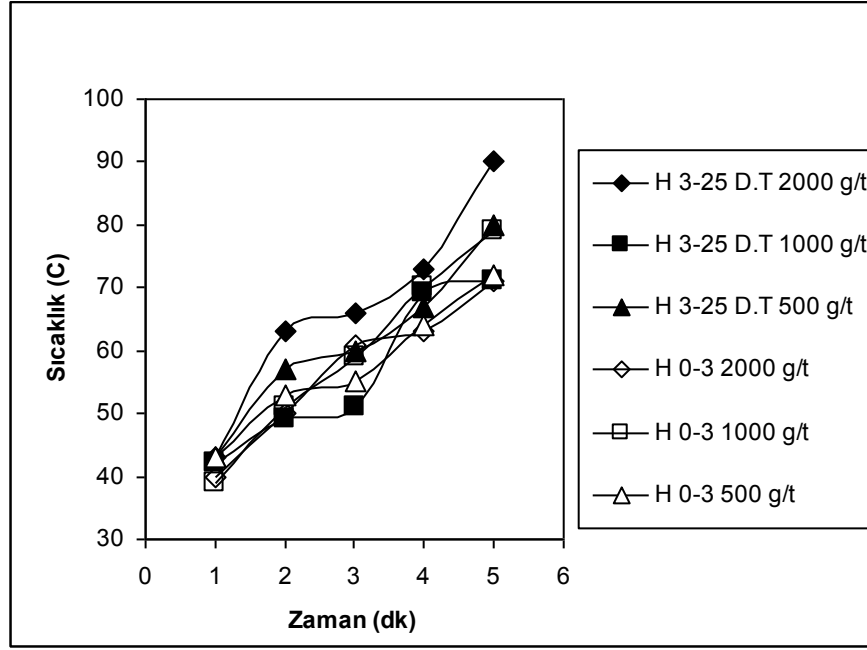
Flotasyon deneyleri mikrodalga ve ultrasonik önışlemlerin kolemanit flotasyonundaki etkisini saptamak amacıyla 3 yöntem halinde yapılmıştır. İlk aşamada konvansiyonel flotasyon deneyleri yapılmıştır. Flotasyon deneylerinde Denver Sub 2A Flotasyon makinesi 1200 dev./dak. karıştırma hızında kullanılmıştır. Kullandığı güç ise 200 W olarak ölçülmüştür. Deneyler 1 litrelik selüllerde gerçekleştirilmiştir. Pülpte katı oranı olarak %20 seçilmiş, deneyler sabit pülpte katı oranında yapılmıştır. Literatürde kolemanitin zeta potansiyel değeri 9 civarı olarak verilmektedir. Bu sebeple reaktifler; toplayıcı olarak, anyonik olan Cytec R825, köpürtücü olarak ise Ekofol 440 olarak seçilmiş, deneylerde bu reaktiflerin %5'lik çözeltileri kullanılmıştır. Köpürtücü 100 g/t'da sabit tutulmuş, toplayıcı miktarı ise 500, 1000, 1500 ve 2000 g/t olarak 4 farkı miktarda denenmiştir. Flotasyon sırasında pülp sıcaklıkları ortalama 20 °C olarak ölçülmüştür. Şekil 2.7' de flotasyon makinesi ve flotasyon esnasında çekilen fotoğraflar gösterilmektedir. Ayrıca, şlamın flotasyon üzerindeki negatif etkisi bilindiğinden öncelikle 0,038 mm şlam olarak atılmış serbestleşme boyutunun altındaki -0,250 +0,038 mm numunelere flotasyon yapılmıştır. Daha sonra şlama kaçan kolemanitleri kazanabilmek için -0,038 +0,000 mm numuneler flotasyona tabi tutulmuştur. Son olarak ise şlama kaçan kolemaniti kazanmak için, flotasyonu olumsuz etkilediği düşünölen kil minerallinin düşük tane boyutlarında toplanması sebebiyle, 38 mikron altındaki numunelerden 10 mikron altı dekantasyonla atılmış ve -0,038+0,010 mm numuneler elde edilerek bunların flotasyonu yapılmıştır. Her üç fraksiyon (-0,250 +0,038 mm; -0,038 +0,000 mm; -0,038+0,010 mm) da konvansiyonel, ultrasonik ve mikrodalga ön işlemler olmak üzere 3 farklı yöntemle flote edilmiştir. Şekil 3.2'de bazı flotasyon fotoğrafları verilmiştir.



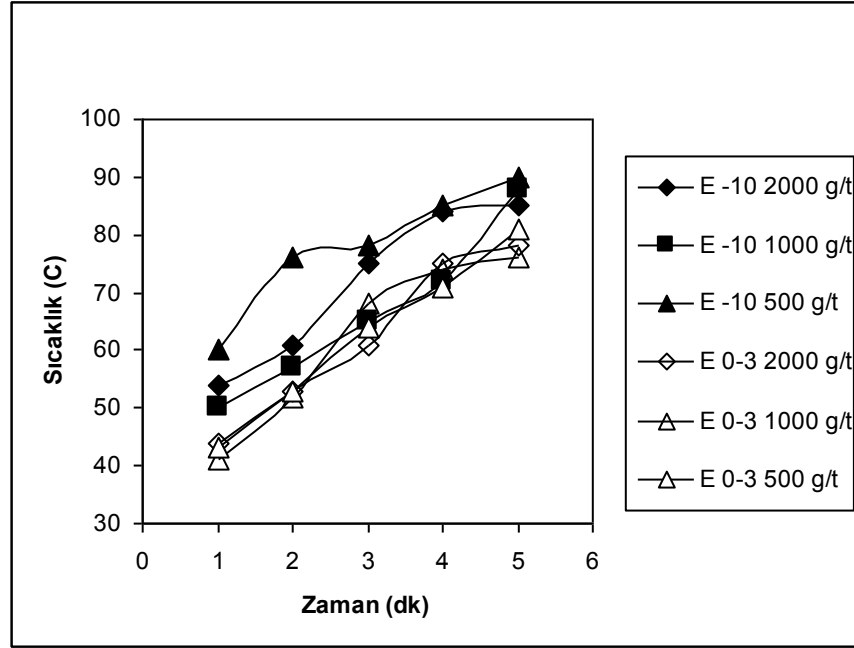
Şekil 3 2: Flotasyon Fotoğrafları

3.2. KOLEMANİT MİNERALİNİN MİKRODALGA ÖNİŞLEMLİ FLOTASYON KARAKTERLERİNİN İNCELENMESİ

Tüm deneylerde mikrodalga önışlem uygulamak için 2450 MHz sabit frekans ve 900 W sabit güçte çalışan Arçelik MD595 model mutfak tipi bir mikrodalga fırın, ısı ölçümlerinde ise Voltcraft IR-100IA model infrared termometre kullanılmıştır. Numune 95 cm² alanındaki borcam kaba düzgün olarak yayılmış 10 dakika süre ile 540W gücünde mikrodalga radyasyona maruz bırakılmıştır. Numunenin fazla ısınması sebebiyle, borcama yapışıp fırının tepsi döndürme mekanizmasına zarar vermemesi için numune ile borcam arası teflon bant ve alüminyum folyo ile kaplanmıştır. İçindeki numunenin yüzey sıcaklıkları 1 dakika arayla infrared termometre yardımıyla ölçülmüş Şekil 3.3'te gösterilen değerlere ulaşılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3 3: Kolemanitin mikrodalgada zamana bağlı sıcaklık değişimleri

a)Hisarcık ocağı numuneleri

b)Espey ocağı numuneleri



Şekil 3 4: Deneyleerde kullanılan Arçelik MD595 marka mikrodalga fırın



Şekil 3 5: Infrared termometre

Şekil 3.4'te deneyleerde kullanılan mikrodalga fırın şekil 3.5'te ise ısı ölçümlerinde kullanılan infrared termometre görülmektedir. Daha sonra önişlem görmüş numuneler konvansiyonel deneyleerdeki benzer şekilde flotasyona tabii tutulmuştur.

3.3. KOLEMANİT MİNERALİNİN ULTRASONİK ÖNİŞLEMLİ FLOTASYON KARAKTERLERİNİN İNCELENMESİ

Deneyleerde bu aşamasında ultrases önişlem uygulanmış olan kolemanit numuneleri flotasyona tabii tutulmuştur. Ultrasonik önişlem uygulamak için 120 Watt gücünde tabanında 2. Adet transducer'ı olan Bandelin RK106 Model dairesel kesitli ultrasonik banyo kullanılmıştır. Bir behere 1 litre olarak, % 20 pülpte katı oranında alınan kolemanit numunesi manyetik karıştırıcı yardımıyla iyice karıştırıldıktan sonra ultrasonik banyonun içinde 10 dakika süre ile ultrases enerjisine maruz bırakılmıştır. Şekil 3.6'da deneyleerde kullanılan ultrasonik banyo görülmektedir.



Şekil 3 6: Deneyleerde Kullanılan Ultrasonik Banyo

Daha sonra önişlem görmüş numuneler konvansiyonel deneyleerdekiene benzer şekilde flotasyona tabii tutulmuştur.

3.4. 0,038 MM ALTI CEVHERDEN -0,010 MM'NİN DEKANTASYONLA UZAKLAŞTIRILMASI

Normalde şlam olarak atılan -38 μm cevhere geçen kolemanit minerallerini kazanmak için 38 μm altına flotasyon işleme uygulanmıştır. 38 mikron altının konvansiyonel, ultrasonik ve mikrodalga önişlemli flotasyonu denendiği gibi ayrıca; flotasyonu olumsuz etkilediği düşünölen kil minerallerinin düşük tane boyutlarında toplanması sebebiyle, -38 μm malzemedden 10 μm altı atılarak -38+10 μm numuneler elde edilmiştir.

Dekantasyon zamanı Stokes Kanunu olarak bilinen aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$v = \frac{d^2 \cdot g \cdot (D_s - D_f)}{18 \cdot \eta} = \frac{h}{t} \quad (3.1)$$

Burada;

v = parçacık çökme hızı

d = parçacık boyutu ($0,010 \times 10^{-3}$ m)

g = yer çekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

D_s = katı yoğunluğu (0-3 mm Hisarcık cevheri için; $2,312 \text{ t/m}^3$; 0-3 mm Espey cevheri için; $2,075 \text{ t/m}^3$)

D_f = sıvı yoğunluğu saf su için; 1 t/m^3)

h = çöken parçacık yüksekliği ($0,03$ m)

t = çökme zamanıdır (sn).

Cevher yoğunlukları piknometre ile ölçülmüş ve yukarıdaki değerler elde edilmiştir.

Değerler formülde yerine yazıldığında çökme zamanının Hisarcık cevheri için 7dk, Espey cevheri için 8 dk 32 sn olduğu bulunmuştur.

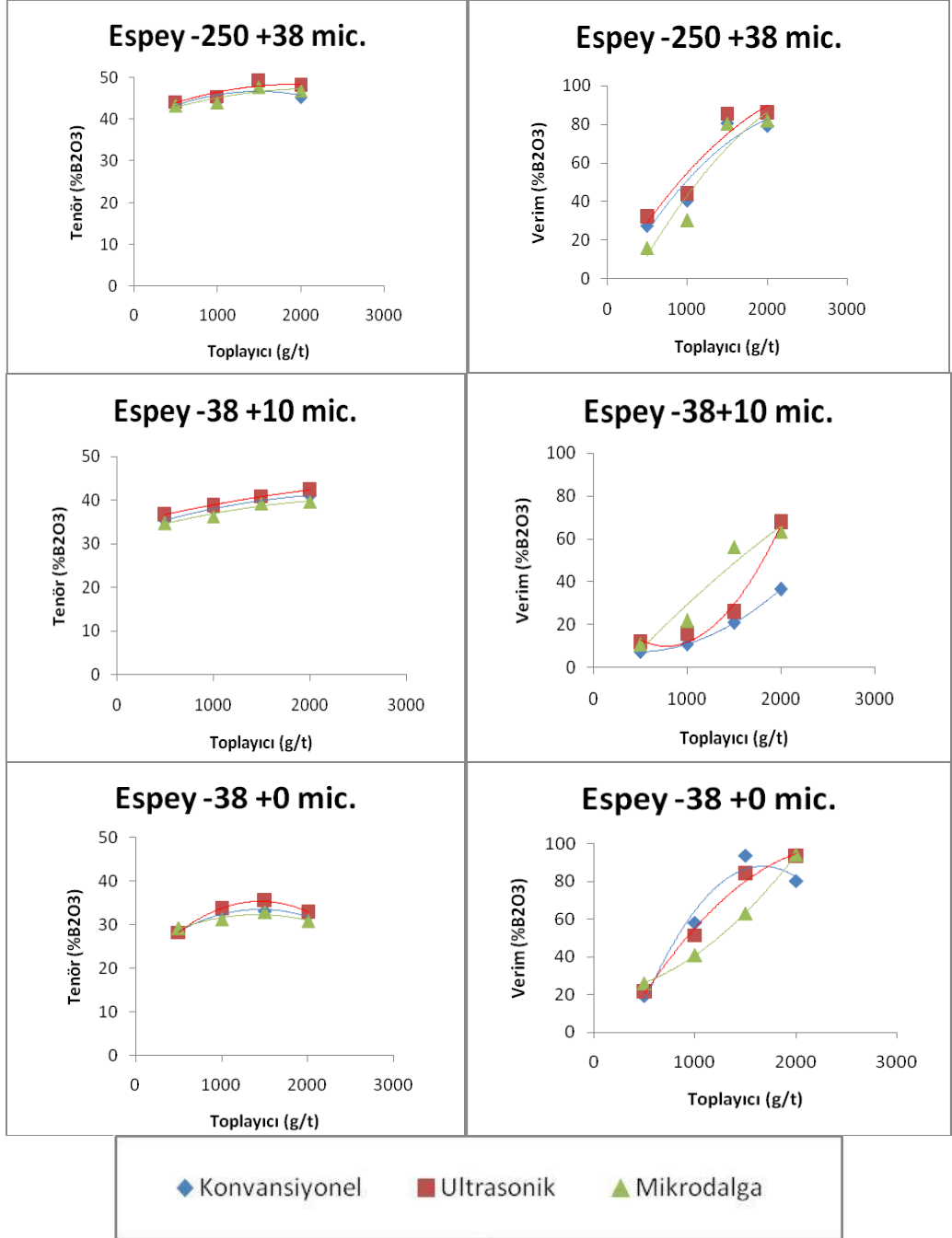
-10 μm 'nin uzaklaştırılması için -38 μm numune %20 pülp-te katı oranında karıştırıcıda 1200 dev./dk. karıştırılmış daha sonra karıştırma işlemi durdurulmuş ve çökme süresi kadar bekletilmiştir. Ardından askıda kalan taneler uzaklaştırılmıştır. Bu işlem her numune için 7 kez tekrar edilmiştir.

3.5. FLOTASYON DENEY SONUÇLARI

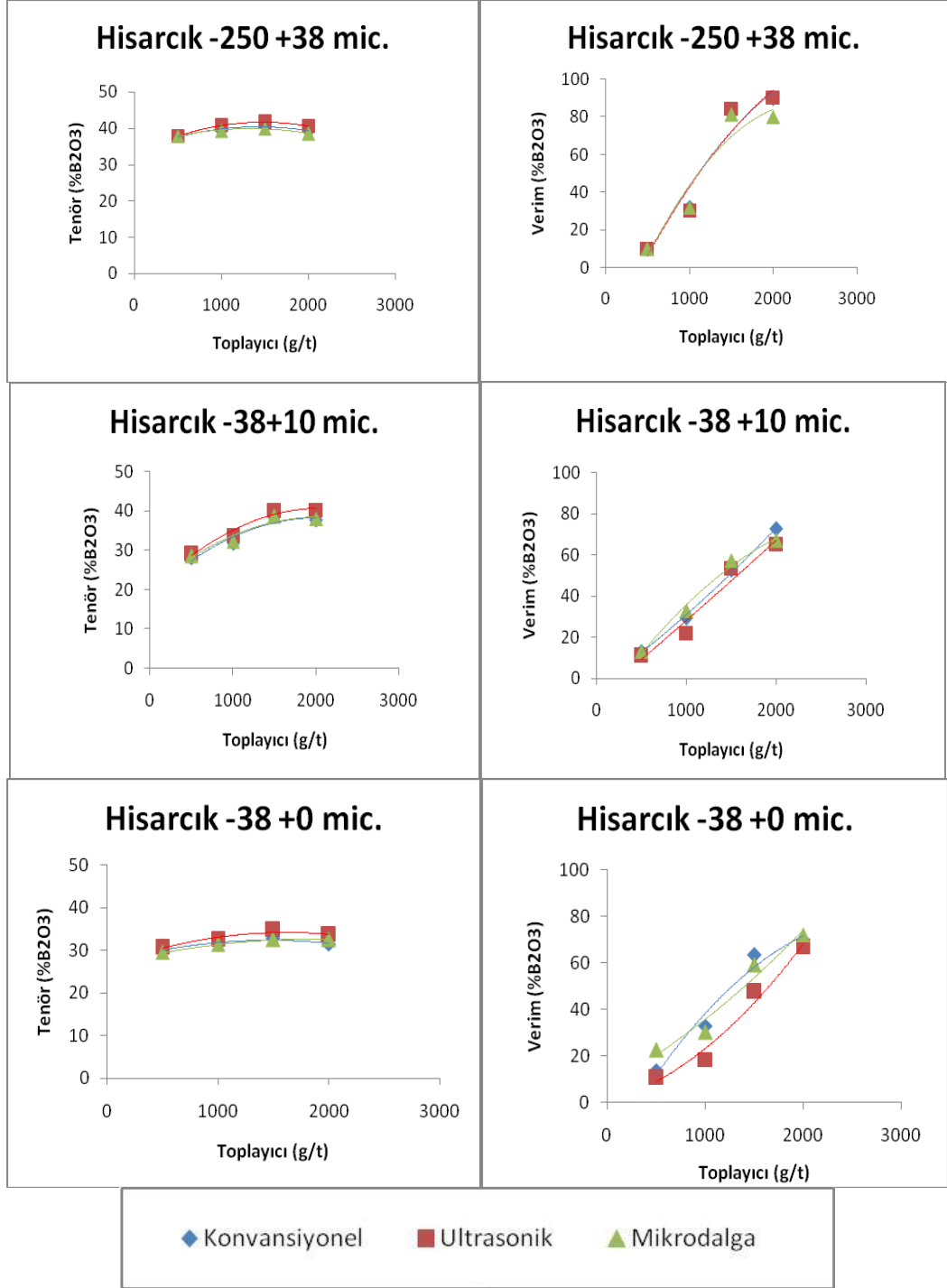
Gerçekleştirilen flotasyon deneylerinin sonuçları Şekil 3.7 – 1.12’de verilmiştir. Kolemanit cevherinden borik asit elde etmek için yaklaşık % 41 B_2O_3 tenörüne, %1’den daha az Fe_2O_3 ve %0.05 As_2O_3 değerlerine sahip olması gerekmektedir. Bu yüzden, bu üç önemli bileşenin kimyasal analizleri X-Ray Fluorescence (X Işını Floresan) cihazı kullanılarak yaptırılmıştır.

% B_2O_3 tenörleri flotasyon deneyleri sonucunda elde edilen konsantre olarak nitelenen yüzen kısmın tenörleridir. % Fe_2O_3 ve % As_2O_3 tenörleri ise batan malzemedeki değerlerdir.

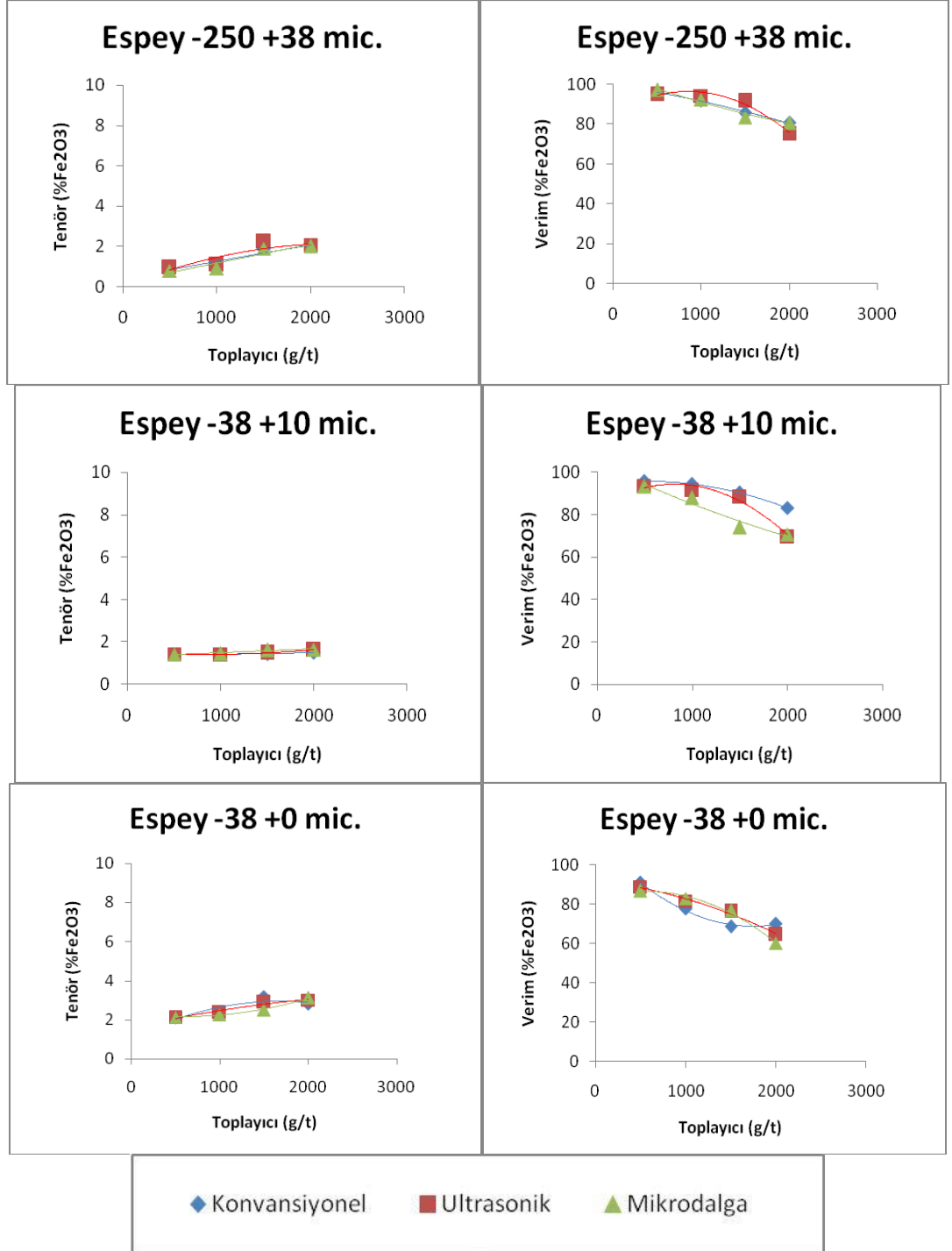
-38+10 μm fraksiyonu için verilen % Fe_2O_3 ve % As_2O_3 tenörleri 10 μm altında atılan şlamın ve -38+10 μm flotasyon testinden sonra elde edilen batan kısmın tenörlerinin ağırlıklı ortalaması alınarak elde edilmiştir. Bu fraksiyonun verimi ise flotasyon batanı ve şlamın verimlerinin toplamını göstermektedir.



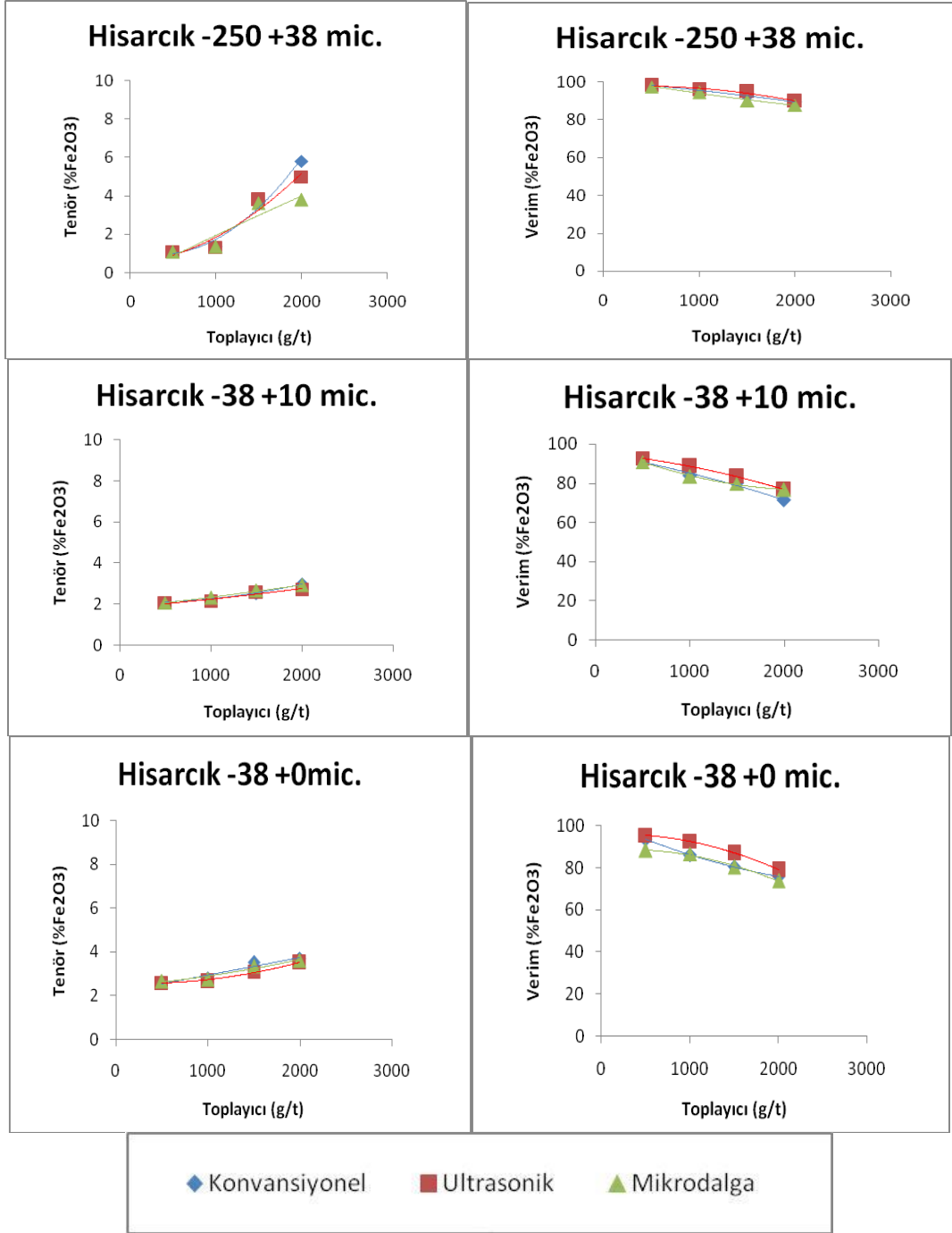
Şekil 3 7: Espey Ocağı Numunelerinin Konvansiyonel, Ultrasonik ve Mikrodalga Önişlemli Flotasyon %B₂O₃ Tenör ve Verimleri



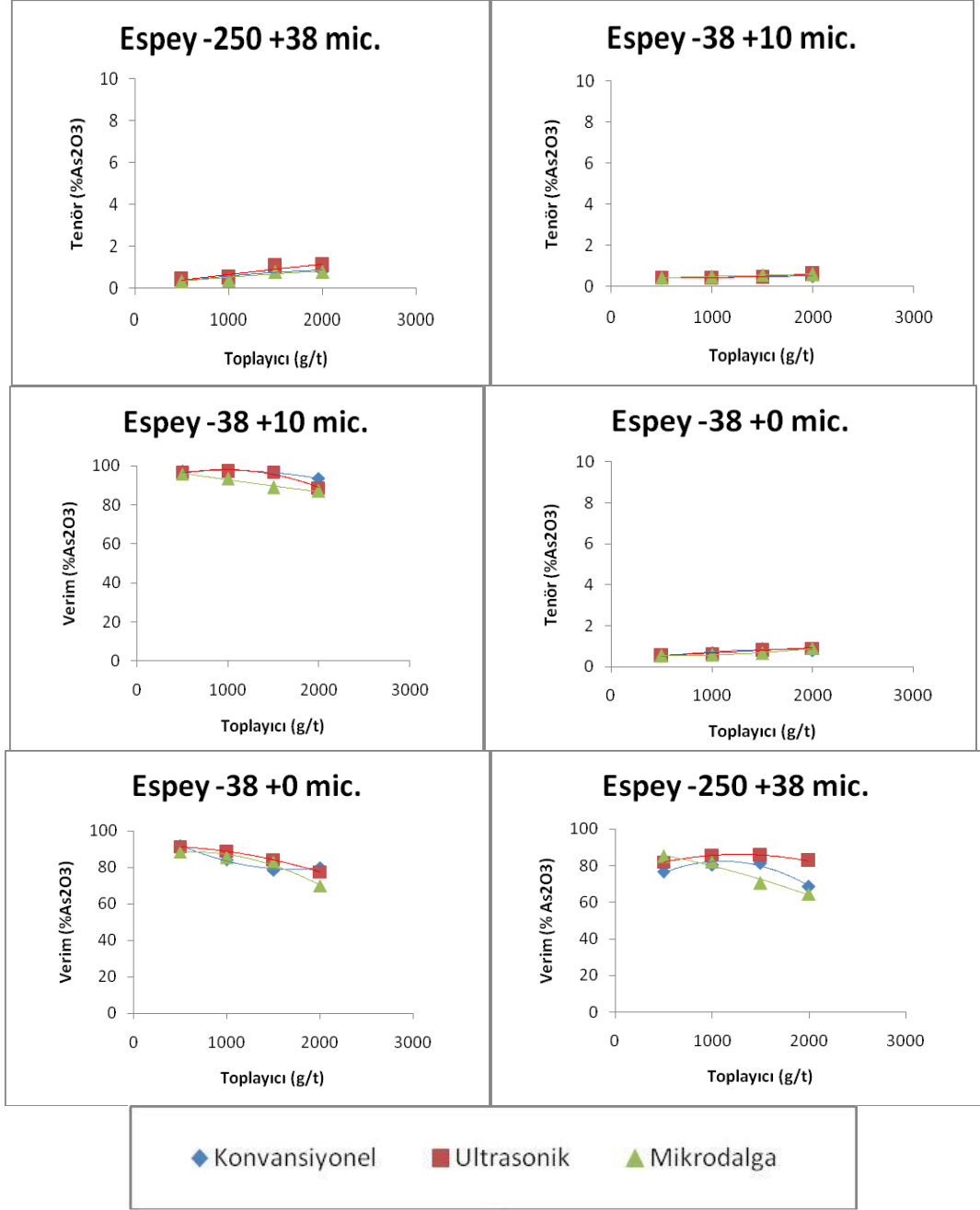
Şekil 3 8: Hisarcık Ocağı Numunelerinin Konvansiyonel, Ultrasonik ve Mikrodalga Önişlemlili Flotasyon %B₂O₃ Tenör ve Verimleri



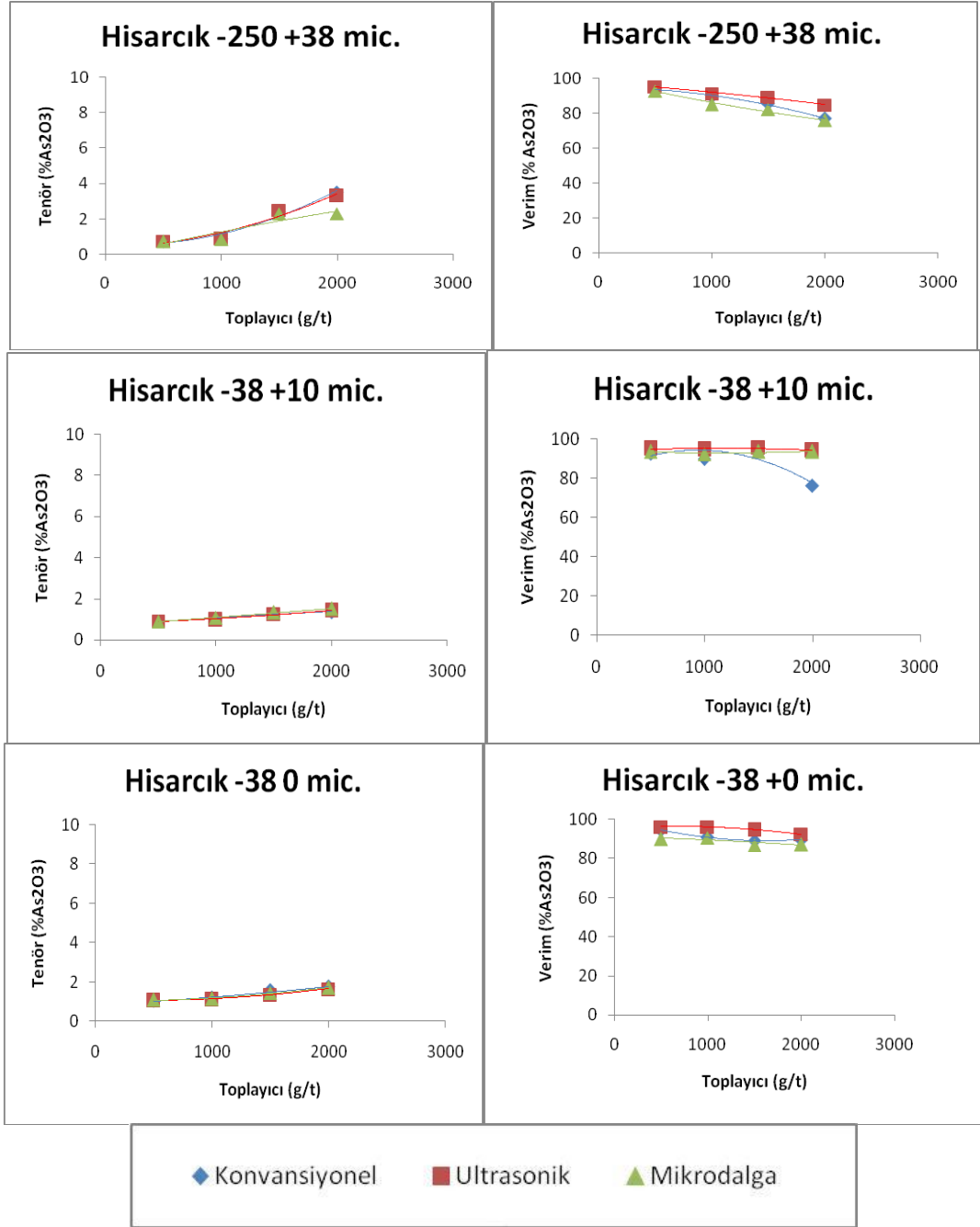
Şekil 3 9: Espey Ocağı Numunelerinin Konvansiyonel, Ultrasonik ve Mikrodalga Önişlemleri Flotasyon % Fe₂O₃ Tenör ve Verimleri



Şekil 3 10: Hisarcık Ocağı Numunelerinin Konvansiyonel, Ultrasonik ve Mikrodalga Önişlemlili Flotasyon % Fe₂O₃ Tenör ve Verimleri



Şekil 3 11: Espey Ocağı Numunelerinin Konvansiyonel, Ultrasonik ve Mikrodalga Önişlemlili Flotasyon % As₂O₃ Tenör ve Verimleri



Şekil 3 12: Hisarcık Ocağı Numunelerinin Konvansiyonel, Ultrasonik ve Mikrodalga Önişlemlili Flotasyon % As₂O₃ Tenör ve Verimleri

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu tez çalışmasına konu olan numuneler Kütahya’da bulunan Eti Maden A.Ş. Emet Bor İşletme Müdürlüğü’nden temin edilmiştir. İşletme bünyesinde bulunan Hisarcık ve Espey Ocaklarından çeşitli boyut fraksiyonlarında ve ayrıca atık barajlarından numuneler alınmıştır. Çalışmanın amacı yeterli tenörlerde olmayan ve yıllardır stoklanan bu cevherlerin zenginleştirilerek ülke ekonomisine kazandırılmasıdır. Zenginleştirme deneylerine konu olan numuneler konsantratör çıkışı fakat yeterli % B_2O_3 tenörüne ulaşamamış 0-3 mm fraksiyonundaki cevherleridir.

Cevherler öncelikle nemini kaybetmesi için kurutulmuş bu esnada nem analizi yapılmıştır. Daha sonra tüm numunelerin elek analizi gerçekleştirilmiştir. Espey 0-3 mm numunenin d_{80} tane boyutunun 2,1; Hisarcık 0-3 mm’nin ise 2,6 mm olduğu saptanmıştır. Yapılan makroskobik ve mikroskobik incelemelerde cevher içinde bolca kolemanit ayrıca kil minerallerinden montmorillonit, illit ve arsenikli mineraller olan orpiment ve realgar gözlenmiştir. Cevherlerin 250 μm altında serbestleştiği mikroskop altında gözlenmiş bu tane boyutunun altında cevher elde edebilmek için öğütme işlemi yapılmıştır. Yapılan deneylerle optimum öğütme süresinin 8 dakika olduğu bulunmuştur.

Flotasyon deneyleri mikrodalga ve ultrasonik önışlemlerin kolemanit flotasyonundaki etkisi saptamak amacıyla 3 yöntem halinde yapılmıştır. İlk aşamada konvansiyonel flotasyon deneyleri yapılmıştır. Pülpte katı oranı olarak %20 seçilmiş, deneyler sabit pülpte katı oranında yapılmıştır. Literatürde kolemanitin zeta potansiyel değeri 9 civarı olarak verilmektedir. Bu sebeple reaktifler; toplayıcı olarak, anyonik olan, Cytac R825, köpürtücü olarak ise Ekofol 440 olarak seçilmiş, deneylerde bu reaktiflerin %5’lik çözeltileri kullanılmıştır. Köpürtücü 100 g/t’da sabit tutulmuş, toplayıcı miktarı ise 500, 1000, 1500 ve 2000 g/t olarak 4 farklı miktarda denenmiştir. Ayrıca, şlamın flotasyon üzerindeki negatif etkisi bilindiğinden öncelikle 0,038 mm şlam olarak atılmış serbestleşme boyutunun altındaki -0,250+0,038 mm numunelere flotasyon yapılmıştır.

Daha sonra şlama kaçan kolemanitleri kazanabilmek için -0,038+0,000 mm numuneler flotasyona tabii tutulmuştur. Son olarak ise şlama kaçan kolemaniti kazanmak için, flotasyonu olumsuz etkilediği düşünülen kil minellinin düşük tane boyutlarında toplanması sebebiyle, 38 mikron altındaki numunelerden 10 mikron altı dekantasyonla atılmış ve -0,038+0,010 mm numuneler elde edilerek bunların flotasyonu yapılmıştır. Her üç fraksiyon (-0,250+0,038 mm; -0,038+0,000 mm; -0,038+0,010 mm) da konvansiyonel, ultrasonik ve mikrodalga ön işlemlerle olmak üzere 3 farklı yöntemle flote edilmiştir.

Şekil 3.8.-3.13'de verilen grafikler incelendiğinde her iki ocaktan alınan cevherler üzerinde yapılan çalışmalarda da ultrasonik önışlemin % B_2O_3 tenörü ve verimi açısından olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Optimum sonuçlara genellikle 1500 g/t reaktif kullanımında ulaşılmaktadır.. Espey -250+38 μm cevherde flotasyona gerek kalmadan sadece şlam atımıyla % 41 civarında B_2O_3 tenörüne ulaşılmaktadır. Ultrasonik önışlemlerle flotasyonla bu, %80'in üstünde bir verimle %49'lara kadar çıkabilmektedir. Şlama kaçan kolemanitlerin flotasyonu sonucunda yine %40-41 tenörlü konsantreler elde edilebilmiştir. Direkt -38+0 μm cevherin flotasyonunda ise en fazla %35 B_2O_3 tenörüne ulaşılabilmektedir.

Cevher içerisindeki Fe_2O_3 ve As_2O_3 'ler flotasyonda artıktaki toplanmakta ve -250+38 μm cevherlerde %0,7-1 Fe_2O_3 besleme tenöründen konsantrede % 0,1'in altına kadar düşülebilmektedir. -38 μm malzeme de ise %2'lerden %1'lere inilebilmiştir. -250+38 μm cevher için % As_2O_3 tenörü % 0,35'ten % 0,1'e; -38 μm cevherlerde ise %1'den %0,1'lere inilebilmiştir.

Ultrasonik önışlemlerle flotasyonun konvansiyonel flotasyona nazaran daha iyi sonuçlar vermesini başta ultrasesin kavitasyon etkisinin sağladığı tahmin edilmektedir. Kaviteasyonda oluşan ani yerel yüksek sıcaklık ve basınçların cevher taneleri üzerindeki kil sıvanmalarını giderdiği ve böylelikle kullanılan reaktiflerin kolemanit mineralinin yüzeyine daha verimli bir şekilde adsorbe olarak hidrofobluğunu arttırdığı düşünülmektedir.

Mikrodalga ön işlem görmüş numunelere uygulanan flotasyon deneylerinde ise konvansiyonel ve ultrasonik ön işlemlili flotasyona kıyasla biraz daha düşük % B_2O_3 tenör ve verim değerlerine ulaşılmıştır. Mikrodalga ön işlem gören malzeme yüzeyinde mikroçatlaklar oluşmasının ve bu çatlaklardaki kil minerallerinin flotasyon ortamına girerek kolemanit minerallerinin yüzeyini kaplaması ve reaktif absorblanmasını engelleyerek kolemanit minerali flotasyonunu olumsuz etkilemesine sebebiyet verdiği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. GÜNGÖREN, C., 2003 *Ultrasonik ve mikrodalga enerjisinin bor mineralinin çözünürlüğüne etkilerinin araştırılması*, Lisans Tezi, İ.Ü. İstanbul
2. SEÇMELER, Ö., 2003 *Comparison of microwave drying and microwave mixed-bed drying of red reppers*, M.E.T.U Ankara
3. KANAT, A., *İ.T.Ü KOSGEB' de geliştirilmekte olan mikrodalga fırında elma meyvesinin kurutulmasına yönelik bir çalışma*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü İstanbul
4. YAZGAN, B., 1982, *Mikrodalga tekniği*, İ.T.Ü Elektrik Fakültesi, İstanbul
5. TEZEREN, O., Temmuz 2003, *Ultrasonik İşlemlerin Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul
6. ÇALIŞKAN, M.K., 2003, *Mikrodalga Enerji İle Kurutma*, İ.T.Ü Makine Fakültesi, İstanbul
7. ESKİBALCI, M.F., 2007, *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirmede Mikrodalga Enerjisinin Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Doktora Tezi, İ.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
8. www.msxlabs.org [Ziyaret Tarihi:13.04.2009]
9. BAYRAKTAR, İ., *Mikrodalga Muamelesinin Sülfürlü Mineral Yüzeylerine Etkisinin İncelenmesi*, Proje No: YDABÇAG-397, 2002, Ankara.

10. KUTAY, I. ve KUŞKONMAZ, N., 2007, Mikrodalga ısıtmanın seramik üretiminde kullanımı, *Metalurji Dergisi*, Sayı:137, s:52-56
11. DERLING S.T. and ABICHT, H.P., 1996, Microwave Sintering of BaTiO₃ Based Ceramics, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 31, No 4, pp: 221-227
- 12 KOCAKUŞAK S., İŞBİLİR F. ve DOĞAN H., 2003, *Mikrodalga Enerjisi ve Sanayideki Uygulamaları*, Seminer Raporu, TÜBİTAK-MAM Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Gebze, Kocaeli
13. KOCAKUŞAK S., TOLUN R., EKİNCİ E., AKÇAY K., ÇOLAK O. and Köroğlu J., 1993, Mikrodalga enerjisi ile bor oksit (B₂O₃) üretimi, *IX Symposium on chemistry and chemical engineering proceeding*, 20-24 September, pp:526, K.T.U, Trabzon
14. KOCAKUŞAK S., KÖROĞLU J. H., EKİNCİ E. and TOLUN R., 1995, Production of Anhydrous borax using microwave heating, *Industrial&Engineering Chemistry Research*, No 34, pp:881-885.
15. KOCAKUŞAK S., TOLUN R., EKİNCİ E., AKÇAY K., ÇOLAK O. ve KÖROĞLU J., 1993, Mikrodalga enerjisi ile susuz boraks (Na₂B₄O₇) eldesi, *IX Symposium on chemistry and chemical engineering proceedings*, 20-24 September, , pp:529, KTU, Trabzon.
16. KOCAKUŞAK S., KÖROĞLU H.J., EKİNCİ. E. and TOLUN R., 1994, Microwave processing of boric acid to produce granular boron oxide, *Progress in Mineral Processing Technology*, Demirel&Ersay n (eds), pp: 487-491, Balkema.
17. KOCAKUŞAK S., KÖROĞLU H.J., GÖZMEN T., SAVAŞCI O.T. and TOLUN R., 1996, Drying of wet Borax pentahydrate by microwave heating, *Industrial&Engineering Chemistry Research*, No 35, pp:159-163.

18. KOCAKUŞAK S., KÖROĞLU J. and TOLUN R., 1998, Drying of wet boric acid by microwave heating, *Chemical Engineering and Processing*, 37, p:197-201.
19. KOCAKUŞAK S., KÖROĞLU H.J., EKİNCİ E. and TOLUN R., 1997, *Microwave calcination of hydrated borax compounds*, Tübitak Marmara Araştırma Merkezi, Gebze, Kocaeli
20. EYMÜR. R. and OKUR H., 2005, Dehydration of ulexite by microwave heating, *Thermochimica Acta*, Volume 428, Issues 1-2 , April, p125-129.
21. ALP, İ., Ekim 1998, *Yüksek frekanslı Ses Dalgalarının Cevher Zenginleştirmede Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.
22. AKYOLDAŞ, A.Ç., 1973, *Ultrasonik Dalgaların Metalurjik Tatbikatı*, Diploma Çalışması, İ.T.Ü. Maden Fakültesi Fiziksel Meaturji Kürsüsü, İstanbul.
23. ÇETİNTÜRK, S., 1980, *Ultrasonik Muayene Yöntemleri*, Bitirme Çalışması, İ.T.Ü. Metalurji Fakültesi, Malzeme Birimi Kürsüsü, İstanbul.
24. ANDAÇ, Ö., Mayıs 2002, *Ultrasonik Dalgaların Zeolit Sentezi Üzerindeki Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
25. STOEVE, S.M., MARTIN, P.D., 1992, *The Application of Vibration and Sound in Minerals and Materials Industries*, A Technical Review, Series No:8, MIRO, Lichfield, İngiltere
26. ÖZKAN, Ş.G. 1998, Ultrasonik İşlemlerin Flotasyon Üzerindeki Etkileri, *İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, Cilt:11, Sayı 1, İstanbul s.131-135

27. STOEV, S.M., 1992, Vibroacoustic Improvements of Froth Flotation, Innovations in Flotation Technology, NATO ASI Series Vol: 208, Kluwer Academic Publishers, Dodrecht, Hollanda, s.383-407
28. ASAI, K., SASAKI, N. 1958 Ultrasonic Treatments of Sullury, *III. International Coal Preperation Congress*, Brussels-Liege, s.112-121
29. KOWALSKI, W., KOWALSKA, E., Mart 1978, The Ultrasonic Activation of Non-Polar Collectors in the Flotation of Hydrophobic Minerals, *Ultrasonics*, s.84-86.
30. NICOL, S.K., ENGEL, M.D., TEH, K.C., 1986 Fine Particle Flotation im an Acoustic Field, *Int. J. Min. Process.*, 17 s.143-150.
31. SLACZKA, A. 1987, Effects of an Ultrasonic Field on the Flotation Selectivity of Barite from a Barite-Florite-Quartz Ore, *Int. J. Min. Process.*, 20, s. 193-210.
32. YERKOVIC, C., MENACHO, J., GEATE, L. 1993, Exploring the Ultrasonic Communiton of Copper Ores, *Minerals Engineering*, Vol:6 s.607-617.
- 33.SUSLICK, K.S. 1988, *Ultrasound: Its Chemical, Physical and Biological Effects*, VCH Publishers Inc. 336s.
34. SUSLICK, K.S. ve diğ. Ocak 1987, Effects of High Intensity Ultrasound on Inorganic Solids, *Ultraonics*, Vol:25, s.56-59.
35. KOWALSKA, E. ve diğ. Temmuz 1978, Ultraonics in the Dehydration Process of Sludge, *Ultrasonics*, s.183-185.
36. SLACZKA, A. Ocak 1986, Effect of Ultrasound on Ammonium Leachingof Zinc from Galmei Ore, *Ultrasonics*, s.53-55
37. REVNIVTZEV, V.I., DIMITRIEV, Y.G., Şubat 1965, Ultrasonic Cleaning of Minerals, *Mining and Minerals Engineering*, 299s.

38. GIBSON, M., 1963, Ultrasonic Disaggregation of Shale, *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol:33, No:4, s.955-958.
39. DJENDOVA, S. MEHANDJSKI, V. 1986, Syudy of the Effects of Acoustic Vibration Conditioning of Collector and Frother on Flotation of Sulphide Ores, *Int. Journal of Mineral Processing*, 34 (3), 205-217s.
40. ÇELİK, M.S., 1987 Effect of Ultrasonic Treatment on the Floability of Coal and Galena, *Sep. Sci. Technology*, Vol: 24, N:14, s. 1159-1166
41. ÖZKAN, Ş.G., VEASEY, T.J., Eylül 1996, Effect of Simultaneous Ultrasonic Treatment on Colemanite Flotation, *6. Uluslar arası Cevher Hazırlama Sempozyumu*, Kuşadası, Aydın s. 277-281.
42. GÜRPINAR, G. ve diğ., 1999, The Effect of Ultrasonic Treatment of Flotation, *VIII Balkan Mineral Processing Conference*, Belgrade, Yugoslavia, s. 175-178.
43. ÖZER, M., Mayıs 2002, *Ultrasonik Titreşimin Kil Çöktürmesinde Etkisinin İncelenmesi ve Klasik Çöktürme Yöntemleri ile Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
44. YİĞİT.E. ve ÖZKAN. Ş.G., 2007 *Flotasyon yöntemi ve uygulamaları*, İ.Ü Mühendislik Fakültesi Yayınları, İstanbul Üniversitesi Basımevi, İstanbul
45. YENİYOL, M., 2004, *Mineraloji*, İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul
46. www.boraxtr.com. [Ziyaret Tarihi: 23.10.2007]
47. www.etimaden.gov.tr [Ziyaret Tarihi: 21.12.2007]

48. DUMAN, İ., 2003 Türkiye ve dünyada borun yeri bor metalurjisinin Türkiye için önemi İ.T.Ü, İstanbul
49. www.tubitak.gov.tr [Ziyaret Tarihi: 18.10.2008]
50. www.usgs.gov. [Son Ziyaret Tarihi: 05.01.2008]
51. ÖZKAN Ş.G., KUYUMCU, H.Z., ÖNAL, G., 2008, *A recent outlook for borates mining and industry in Turkey*, World of Mining-Surface & Underground, 60 (1) 43-47
52. ARSLAN M., 2007, *Emet borik asit ürününün üretim sürecinin iyileştirme analizi*, Yüksek Lisans Tezi, A.K.Ü., Afyon

ÖZGEÇMİŞ

Can GÜNGÖREN, 1984'te İstanbul'da doğdu. 2002'de Fatih Pertevniyal Anadolu Lisesi'nden mezun olduktan sonra, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde eğitimine başlayıp, 2006 yılında Maden Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Maden Mühendisliği Programı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Daha sonra İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlayan Can GÜNGÖREN halen bu görevini yürütmektedir.