

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜLFÜRLÜ CEVHERLERİN
FLOTASYONUNDA ULTRASONİK ENERJİNİN
FLOTASYON VERİMİ VE SELEKTİVİTESİNE
OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Ümit HORASAN

Ekim, 2021
İZMİR

**SÜLFÜRLÜ CEVHERLERİN FLOTASYONUNDA
ULTRASONİK ENERJİNİN FLOTASYON
VERİMİ VE SELEKTİVİTESİNE OLAN
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Cevher Hazırlama Programı

Ümit HORASAN

Ekim, 2021

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ÜMİT HORASAN, tarafından **PROF. DR. MEHMET TANRIVERDİ** yönetiminde hazırlanan “**SÜLFÜRLÜ CEVHERLERİN FLOTASYONUNDA ULTRASONİK ENERJİNİN FLOTASYON VERİMİ VE SELEKTİVİTESİNE OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet TANRIVERDİ

Yönetici

Prof. Dr. Vedat ARSLAN

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Oktay BAYAT

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Mehmet POLAT

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof.Dr. Bahri ERSOY

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışma konumu bana ilk öneren ve tezin şekillenmesinde bana her türlü bilgi ve desteğini esirgemeyen ilk tez danışmanım ebediyetteki Sayın Prof. Dr. Tayfun ÇİÇEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın her aşamasında büyük ilgi ve desteğini gördüğüm, değerli fikir ve yorumlarıyla beni yönlendiren saygı değer danışmanım Prof. Dr. Mehmet TANRIVERDİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez izlemelerim sırasında, olumlu yaklaşımlarıyla beni cesaretlendiren ve destek olan tez izleme komite üyelerim Sayın Prof. Dr. Mehmet POLAT'a ve Sayın Prof. Dr. Vedat ARSLAN'a teşekkür ederim. Kimyasal analiz ve karakterizasyon çalışmalarında gösterdikleri yardım ve ilgileri için Sayın Öğretim Görevlisi Fatih TURAN'a, Kimya Teknisyeni Ziya ÇOBAN'a ve Doç. Dr. Hatice YILMAZ'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi manevi katkılarını esirgemeyen, çalışmalarım sırasında sabırla ve anlayışla her zaman yanımda olan kararlarımı destekleyip beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan kıymetli annem Gönül HORASAN ve babam Musa HORASAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ümit HORASAN

SÜLFÜRLÜ CEVHERLERİN FLOTASYONUNDA ULTRASONİK ENERJİNİN FLOTASYON VERİMİ VE SELEKTİVİTESİNE OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Flotasyon, sülfürlü cevherlerin zenginleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Flotasyonda selektivite ve verimi artırmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Flotasyon yöntemiyle minerallerin birbirinden ayrılmasında yeni ve etkin yollardan biri ultrasonik enerjinin kullanılmasıdır. Ultrasonik enerji, maden ve metal endüstrisinde genellikle yüzey temizleme işlemlerinde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, ultrasonik enerjinin etkisi iki aşamada araştırılmıştır. İlk aşamada; sülfürlü saf cevherler (galen, kalkopirit, sfalerit ve pirit) üzerindeki etkisi, mikro-flotasyon testleri yapılarak araştırılmıştır. Mikro-flotasyon testleri sonucunda; ultrasonik enerji kondisyonlama öncesi ve boyunca uygulandığında tüm mineraller üzerinde canlandırma etkisi gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak, ultrasonik enerji kondisyonlama sonrasında uygulandığında kalkopirit, sfalerit ve pirit üzerinde bastırıcı etki yaparken galen üzerinde canlandırıcı etkisi yaptığı tespit edilmiştir. Ultrasonik enerjinin bu özelliğinden yararlanılarak, kondisyonlama sonrasında uygulandığında galen minerali diğer sülfürlü minerallerden yüksek selektivite ve verimde ayrılabilirdiği tespit edilmiştir.

İkinci aşamada ise ultrasonik destekli bir test düzeneği kurulmuştur. Daha sonra Balıkesir-Balya, Giresun-Şebinkarahisar ve Kütahya-Çatak tesislerinden getirilen numuneler ile ilk aşamada tespit etmiş olduğumuz koşullar doğrultusunda testler yapılmıştır. Yapılmış olan testler sonucunda, ultrasonik enerji kondisyonlama öncesinde ve boyunca uygulandığında mikro- flotasyon testlerinde olduğu gibi tenörü ve verimi arttırdığı tespit edilmiştir. Ultrasonik enerji kondisyonlama sonrası uygulandığında ise galen diğer sülfür minerallerinden bastırıcı kullanmadan yüksek selektivite ve verimle ayrılabilirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, Kütahya-Çatak cevherinde ise kükürt oranı ultrasonik enerji uygulamasıyla azaltılmıştır.

Anahtar kelimeler: Flotasyon, hallimond tüpü, ultrasonik enerji, sülfürlü cevher, verim ve selektivite

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ULTRASOUND ENERGY ON THE RECOVERY AND SELECTIVITY OF SULPHIDE ORE FLOTATION

ABSTRACT

Flotation is commonly used in separation sulphide ores. Various studies are conducted to increase the selectivity and recovery in flotation. The use of ultrasonic energy is one of the new and effective ways of separating minerals from each other by the flotation method. Ultrasonic energy is generally used in surface cleaning processes in the mining and metal industry.

In this study, the effect of ultrasonic energy was investigated in two stages. At the first stage, its effect on pure sulphide ores (galena, chalcopyrite, sphalerite, and pyrite) was investigated by performing micro-flotation tests. In these investigations, it was determined that ultrasonic energy had a rejuvenating effect on all minerals when it was applied before and during the conditioning phase. However, when it was applied before conditioning (refloating of the concentrate), it was found that its rejuvenating effect continued on galena while it had a suppressing effect on chalcopyrite, sphalerite, and pyrite. By using this feature of ultrasonic energy, it was revealed that galena mineral could be separated from other sulphide minerals with high selectivity and efficiency when it was applied before refloating of the concentrate.

At the second stage, an ultrasonic-assisted test setup was established. The tests were then performed with the samples we took from Balıkesir-Balya, Giresun-Şebinkarahisar and Kütahya-Çatak facilities in line with the results we found at the first stage. As a result of our tests, it was determined that ultrasonic energy increased both grade and efficiency when it was applied before and during conditioning, and when it was applied after conditioning, galena could be separated from other sulphide minerals with high selectivity and recovery by this method without using a fine size suppressor. In addition, the sulfur content of the Kütahya-Çatak ore was reduced by the application of ultrasonic energy.

Keywords: Flotation, hallimond tube, ultrasonic energy, sulphide ore, recovery and selectivity

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xv

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

1.1 Sülfürlü Cevherlerin Minerolojisi	3
1.1.1 Silisli Cevherler	4
1.1.2 Sarı Cevherler	4
1.1.3 Siyah Cevherler.....	4
1.1.4 Piritik Cevherler	5
1.2. Sülfürlü Minerallerin Yapısı	5
1.3. Sülfürlü Minerallerin Yüzey Özellikleri.....	6
1.4. Sülfürlü Minerallerin Elektrokimyası.....	7
1.5 Sülfürlü Cevherlerin Zenginleştirilmesi ve Temel İlkeleri.....	8
1.6 Sülfürlü Cevher ve Genel Özellikleri	11
1.6.1 Kurşun Cevherleri	11
1.6.1.1 Kurşun Cevheri ve Genel Özellikleri	11
1.6.1.2 Kurşunun Cevherlerinin Kullanım Alanları.....	12
1.6.1.3 Kurşun Cevherlerinin Zenginleştirilmesi.....	12
1.6.2. Çinko Cevheri	13
1.6.2.1 Çinko Cevherleri ve Genel Özellikleri	13
1.6.2.2 Çinko Cevherinin Kullanım Alanları.....	14

1.6.2.3 Çinko Cevherlerinin Zenginleştirilmesi.....	14
1.6.3 Bakır Cevheri.....	15
1.6.3.1 Bakır Cevherleri ve Genel Özellikleri	15
1.6.3.2 Bakır Cevherlerinin Kullanım Alanları	16
1.6.3.3 Bakır Cevherinin Zenginleştirilmesi.....	16
1.6.4 Demir Cevherleri.....	19
1.6.4.1 Demir Cevheri ve Genel Özellikleri	19
1.6.4.2 Demir Cevherlerinin Kullanım Alanları	19
1.6.4.3 Demir Cevherlerinin Zenginleştirilmesi	20
BÖLÜM İKİ - ULTRASONİK ENERJİ.....	23
2.1 Ultrases Spektrumu	24
2.2 Ultrasonik Enerjinin Üretilmesi	25
2.2.1 Ultrasesin Üretildiği kaynaklar	25
2.2.1.1 Ark ile üretim	25
2.2.1.2 Kornalar ile üretim.....	25
2.2.1.3 Sirenler ile üretim	26
2.2.1.4 Mekanik Titreştiriciler ile üretim	26
2.2.1.5 Piezoelektrik Titreştiriciler ile üretim.....	26
2.2.1.6 Manyetostriktif Titreştiriciler ile üretim	27
2.2.1.7 Elektrostriksiyon ile üretim.....	28
2.3 Titreşim Üreteci Dizaynı	28
2.4 Ultrases Dalgaları.....	28
2.5 Ultrasonik Enerjinin Etkileri.....	30
2.5.1 Doppler Etkisi	30

2.5.2 Darbe Etkisi	30
2.5.2.1 Akustik Akım	30
2.5.2.2 Kavitasyon Etkisi.....	31
2.6 Ultrasesin Kullanıldığı Yerler	33
2.6.1 Cevher Hazırlama Dışındaki Uygulamaları	33
2.6.2.1 Ultrasonun Boyut Küçültme İşlemlerinde Kullanımı.....	35
2.6.2.2 Ultrasonun Fiziksel Cevher Hazırlama Yöntemlerinde Kullanımı ..	36
2.6.2.3 Ultrasonun Kimyasal Cevher Hazırlama Yöntemlerinde Kullanımı	37
2.6.2.4 Ultrasonun Fiziko-Kimyasal Cevher Hazırlama Yöntemlerinde Kullanımı	42
BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR	50
3.1 Malzeme.....	51
3.1.1 Mikro-Flotasyon Testlerinde Kullanılan Malzeme	51
3.1.2 Ultrasonik Destekli Flotasyon Düzeneginde Kullanılan Malzeme	55
3.2 Yöntem.....	60
3.2.1 Mikro-flotasyon Testleri.....	60
3.3.1 Galenin Flotasyon Koşullarının Belirlenmesi.....	63
3.2.2 Piritin Flotasyon Koşullarının Belirlenmesi	66
3.3.3 Kalkopiritin Flotasyon Koşullarının Belirlenme Testleri	68
3.3.4 Sfaleritin Flotasyon Koşullarının Belirlenmesi.....	71
3.4 Toplayıcı Miktarını Belirleme Testleri.....	74
3.4.1 Galenin Flotasyonunda Toplayıcı Miktarını Belirleme Testleri	74
3.4.2 Piritin Flotasyonunda Toplayıcı Miktarını Belirlenme Testleri.....	76
3.4.3 Kalkopirit flotasyonunda Toplayıcı Miktarını Belirlenme Testleri	77
3.4.4 Sfalerit Flotasyonunda Toplayıcı Miktarını Belirlenme Testleri	79

3.5 Ultrasonik Enerji Süresini Belirleme Testleri	82
3.5.1 Galen flotasyonunda ultrasonik enerji süresinin belirleme testleri.....	85
3.5.2 Pirit Flotasyonunda Ultrasonik Enerji Süresinin Belirleme Testleri	87
3.5.3 Kalkopiritin Flotasyonunda Ultrasonik enerji Süresinin Belirleme Testleri	89
3.5.4 Sfalerit Ultrasonik Enerji Süresinin Belirlenme Testleri	91
3.6 Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) Analizleri.....	94
3.7 Fourier Transform Infrared (FTIR) Spektroskopisi Analizleri	97
3.8 Mineral Karışımlarına Ultrasonik Enerjinin Etkisi	101
3.8.1 Galen/sfalerit Karışımlarına Ultrasonik Enerjinin Etkisi	103
3.8.2 Galen/pirit Karışımlarına Ultrasonik Enerjinin Etkisi	106
3.8.3 Galen/kalkopirit Karışımlarına Ultrasonik Enerjinin Etkisi	108
3.9 Ultrasonik Enerji Destekli Flotasyon Test Düzenneği ve Flotasyon Testleri ..	111
3.10 Flotasyon testleri	123
3.10.1 Giresun-Şebinkarahisar Kurşun-Çinko Cevheri Flotasyon Testleri	124
3.10.1.1 Giresun-Şebinkarahisar Kurşun-Çinko Cevherinin konvensiyonel flotasyon testleri	125
3.10.1.2 Giresun-Şebinkarahisar Kurşun-Çinko Cevherinin Ultrasonik Enerji uygulanan flotasyon testleri	129
3.10.2 Balıkesir-Balya Kurşun-Çinko Tesisi Flotasyon Testleri.....	135
3.10.2.1 Balıkesir-Balya Kurşun-Çinko Cevherinin konvensiyonel flotasyon testleri.....	136
3.10.2.2 Balıkesir-Balya Kurşun-Çinko Cevheri Ultrasonik enerji uygulanan Flotasyon Testleri	139
3.10.3 Kütahya-Çatak Demir Tesisi Flotasyon Testleri.....	143
3.10.3.1 Kütahya-Çatak Demir Cevheri Ultrasonik Enerji Uygulanmayan Flotasyon Testleri.....	143

3.10.3.2 Kütahya-Çatak Demir Cevheri Ultrasonik Enerji Uygulanan Flotasyon Testleri.....	144
---	-----

BÖLÜM DÖRT - SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	148
---	------------

KAYNAKLAR.....	153
-----------------------	------------

EKLER.....	168
-------------------	------------



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Minerallerin iyonik-kovalent bağ derceleri.	6
Şekil 1.2 Elektroliz hücresi.	7
Şekil 2.1 Kavitasyon kabarcığının üç boyutlu gösterimi.	23
Şekil 2.2 Ultrasonik enerjinin uygulama alanları	24
Şekil 2.3 Piezoelektrik kristalin tank yüzeyine montajı	27
Şekil 2.4 Manyetostriksiyon ultrases vericisi	28
Şekil 2.5 Ultrasonik banyo (a) ve ultrasonik prop (b)	28
Şekil 2.6 Ultrasonik tank içinde oluşan akustik akımın şematik gösterimi	31
Şekil 2.7 Akustik kavitasyon kabarcığının oluşması	32
Şekil 2.8 Ultrasonik tank içindeki kavitasyonun şematik gösterimi	33
Şekil 2.9 Ultrasonik enerjinin kullanıldığı belli başlı bilim dalları	34
Şekil 3.1 Çalışmalarda kullanılan saf mineraller (a: kalkopirit b: galen c: sfalerit d: pirit).....	51
Şekil 3.2 Cam tüp içindeki -150 +75 µm boyut aralığındaki numuneler.....	52
Şekil 3.3 Mikro-flotasyon testleri için cevher hazırlama iş akım şeması	52
Şekil 3.4 Saf galen XRD analiz sonuçları.....	53
Şekil 3.5 Saf pirit XRD analiz sonuçları.....	54
Şekil 3.6 Saf kalkopirit XRD analiz sonuçları	54
Şekil 3.7 Saf sfalerit XRD analiz sonuçları.....	55
Şekil 3.8 Ultrasonik destekli flotasyon test düzeneğinde kullanılan numunelerin temsili fotoğrafları (a:Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko tesisi, b: Balıkesir-Balya kurşun çinko tesisi ve c: Kütahya-Çatak demir tesisi).....	55
Şekil 3.9 Ultrasonik enerji destekli flotasyon düzeneğinde için cevher hazırlama iş akım şeması	57
Şekil 3.10 Giresun-Şebinkarahisar kurşun-çinko cevheri XRD analiz sonuçları.....	59
Şekil 3.11 Balıkesir-Balya kurşun-çinko cevherin XRD analiz sonuçları.....	59
Şekil 3.12 Kütahya-Çatak demir cevheri boyut küçültme iş akım şeması.....	58
Şekil 3.13 Kütahya-Çatak demir cevheri XRD sonuçları	60
Şekil 3.14 Mikro-Flotasyon test düzeneği	61
Şekil 3.15 Ultrasonik homojenleştirici	61

Şekil 3.16 Mikro-flotasyon testleri iş akım şeması	62
Şekil 3.17 Galen flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi.....	64
Şekil 3.18 Galen flotasyonunda pH miktarına bağlı verim değişimi.....	65
Şekil 3.19 Galen flotasyonunda hava miktarına bağlı verim değişimi	65
Şekil 3.20 Pirit flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi	67
Şekil 3.21 Pirit flotasyonunda pH miktarına bağlı verim değişimi	67
Şekil 3.22 Pirit flotasyonunda hava miktarına bağlı verim değişimi.....	68
Şekil 3.23 Kalkopirit flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi	69
Şekil 3.24 Kalkopirit flotasyonunda pH miktarına bağlı verim değişimi	70
Şekil 3.25 Kalkopirit flotasyonunda hava miktarına bağlı verim değişimi	70
Şekil 3.26 Sfalerit flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi.....	72
Şekil 3.27 Sfalerit flotasyonunda pH miktarına bağlı verim değişimi	72
Şekil 3.28 Sfalerit flotasyonunda hava miktarına bağlı verim değişimi.....	73
Şekil 3.29 Galen flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi.....	75
Şekil 3.30 Pirit flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi.....	77
Şekil 3.31 Kalkopirit flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi	79
Şekil 3.32 Sfalerit flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi.....	81
Şekil 3.33 Ultrasonik enerji süresinin belirleme testleri birinci test seti iş akım şeması	83
Şekil 3.34 Ultrasonik enerji süresinin belirleme testleri ikinci test seti iş akım şeması	84
Şekil 3.35 Ultrasonik enerji süresinin belirleme testleri üçüncü test seti iş akım şeması	85
Şekil 3.36 Galen ultrasonik enerji süresi bağlı olarak verim değişimi	87
Şekil 3.37 Pirit ultrasonik enerji süresi bağlı olarak verim değişimi.....	89
Şekil 3.38 Kalkopiritin ultrasonik enerji süresi bağlı olarak verim değişimi.....	91
Şekil 3.39 Sfaleritin ultrasonik enerji süresine bağlı olarak verim değişimi	93
Şekil 3.40 Galen SEM görüntü analizleri (a: ultrasonik işlem görmemiş, b: ultrasonik işlem görmüş)	95
Şekil 3.41 Pirit SEM görüntü analizleri (a: ultrasonik işlem görmemiş, b: ultrasonik işlem görmüş)	95

Şekil 3.42 Kalkopirit SEM görüntü analizleri (a: ultrasonik işlem görmemiş, b: ultrasonik işlem görmüş)	96
Şekil 3.43 Sfalerit SEM görüntü analizleri (a: ultrasonik işlem görmemiş, b: ultrasonik işlem görmüş)	96
Şekil 3.44 Galen FTIR) spektrumları (a: kondisyonlama yapılmayan, b: kondisyonlama sonrası c: kondisyonlama öncesi, d: kondisyonlama boyunca).....	98
Şekil 3.45 Pirit FTIR) spektrumları (a: kondisyonlama yapılmayan, b: kondisyonlama sonrası c: kondisyonlama öncesi, d: kondisyonlama boyunca).....	98
Şekil 3.46 Kalkopirit FTIR spektrumları (a: kondisyonlama yapılmayan, b: kondisyonlama sonrası c: kondisyonlama öncesi, d: kondisyonlama boyunca)	99
Şekil 3.47 Sfalerit FTIR spektrumları (a: kondisyonlama yapılmayan, b: kondisyonlama sonrası c: kondisyonlama öncesi, d: kondisyonlama boyunca)	99
Şekil 3.48 Mineral karışımlarına ultrasonik enerjinin etkisi belirlemek için yapılan birinci test seti iş akım şeması	102
Şekil 3.49 Mineral Karışımlarına ultrasonik enerjinin etkisi belirlemek için yapılan ikinci test seti iş akım şeması	103
Şekil 3.50 Kondisyonlama öncesi-sonrası yüzen ürünlerdeki galen ve sfalerit verimi	105
Şekil 3.51 Kondisyonlama öncesi-sonrası yüzen ürünlerdeki galen ve pirit verimi	107
Şekil 3.52 Kondisyonlama öncesi-sonrası yüzen ürünlerdeki galen ve kalkopirit verimi	110
Şekil 3.53 Ultrasonik jeneratör	112
Şekil 3.54 Ultrasonik başlıklar ve montajı (a: Tek başlık b: Test düzeneğinin ön görüntüsü).....	112
Şekil 3.55 Test düzeneğinin plan görüntüsü (a: sol yan b: arka plan)	113
Şekil 3.56 Ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneği	113
Şekil 3.57 Ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneğinin tasarımı	114
Şekil 3.58 Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevheri ultrasonlu ve konvensiyonel flotasyon testleri iş akım şeması.....	125

Şekil 3.59 Giresun-Şebinkarahisar kurşun-çinko cevherinin konvensiyonel 106 µm tane boyu kütle-metal balansı.....	128
Şekil 3.60 Giresun-Şebinkarahisar kurşun-çinko cevherinin ultrasonik enerji uygulanan 38 µm tane boyu kütle-metal balansı	132
Şekil 3.61 Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevheri (konvensiyonel ve ultrasonik enerji uygulanmalı) tane boyutuna bağlı galen mineralinin tenör- verim değişimi.....	133
Şekil 3.62 Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevheri (konvensiyonel ve ultrasonik enerji uygulanmalı) tane boyutuna bağlı sfalerit mineralinin tenör- verim değişimi.....	134
Şekil 3.63 Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevheri (konvensiyonel ve ultrasonik enerji uygulanmalı) tane boyutuna bağlı kalkopirit mineralinin tenör-verim değişimi.....	134
Şekil 3.64 Balıkesir-Balya kurşun çinko tesisi flotasyon testleri iş akım şeması	136
Şekil 3.65 Balıkesir-Balya kurşun-çinko cevherinin konvensiyonel 75 µm tane boyu kütle-metal balansı.....	138
Şekil 3.66 Balıkesir-Balya kurşun-çinko cevherinin ultrasonik enerji 38 µm tane boyu kütle-metal balansı.....	140
Şekil 3.67 Balıkesir-Balya kurşun çinko cevheri (konvensiyonel ve ultrasonik enerji uygulanmalı) tane boyutuna bağlı galen mineralinin tenör- verim değişimi	141
Şekil 3.68 Balıkesir-Balya kurşun çinko cevheri (konvensiyonel ve ultrasonik enerji uygulanmalı) tane boyutuna bağlı sfalerit mineralinin tenör-verim değişimi.....	142
Şekil 3.69 Kütahya-Çatak demir cevheri flotasyon testleri iş akım şeması.....	143

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Cu, Zn ve Pb zenginleştirmesinde kullanılan en yaygın reaktifler	9
Tablo 1.2 Kurşunun genel özellikleri.....	12
Tablo 1.3 Çinkonun genel özellikleri.....	14
Tablo 2 1 Piezoelektrik malzemelerin özellikleri	27
Tablo 2.2 Ultrases frekansına göre ortaya çıkan çeşitli uygulamalar	34
Tablo 3.1 Testlerde kullanılan minerallerin saflık derceleri	53
Tablo 3.2 Galenin flotasyon koşulları.....	63
Tablo 3.3 Galen için denenen flotasyon koşulları ve sonuçları.....	64
Tablo 3.4 Piritin flotasyon koşulları	66
Tablo 3.5 Piritin flotasyon koşulları ve sonuçları.....	66
Tablo 3.6 Kalkopiritin flotasyon koşulları	69
Tablo 3.7 Kalkopiritin flotasyon koşulları ve sonuçları	69
Tablo 3.8 Sfaleritin flotasyon koşulları.....	71
Tablo 3.9 Sfalerit flotasyon şartları ve sonuçları.....	71
Tablo 3.10 Galenin toplayıcı miktarını belirleme test koşulları.....	74
Tablo 3.11 Galenin toplayıcı miktarını belirlemek için yapılan test sonuçları	75
Tablo 3.12 Piritin toplayıcı miktarını belirleme test koşulları	76
Tablo 3.13 Piritin toplayıcı miktarını belirleme test sonuçları.....	76
Tablo 3.14 Kalkopirit toplayıcı miktarını belirleme test koşulları	80
Tablo 3.15 Kalkopiritin toplayıcı miktarını belirlemek için yapılan test sonuçları...80	
Tablo 3.16 Sfalerit toplayıcı miktarını belirlenme test koşulları.....	80
Tablo 3.17 Sfaleritin toplayıcı miktarını belirlemek için yapılan test sonuçları.....	82
Tablo 3.18 Galenin ultrasonik enerji süresini belirlenme test koşulları	85
Tablo 3.19 Galenin ultrasonik enerji süresini tespiti test sonuçları.....	86
Tablo 3.20 Piritin ultrasonik enerji süresini belirlenme test koşulları	87
Tablo 3.21 Piritin ultrasonik enerji süresini tespiti test sonuçları	88
Tablo 3.22 Kalkopiritin ultrasonik enerji süresini belirlenme test koşulları.....	89
Tablo 3.23 Kalkopiritin ultrasonik enerji süresini belirlenme test sonuçları	90
Tablo 3.24 Sfaleritin ultrasonik enerji süresini belirlenme test koşulları	91
Tablo 3.25 Sfaleritin ultrasonik enerji süresini belirlenme test sonuçları.....	92

Tablo 3.26 Ultrasonik enerjinin mineral yüzeylerindeki dixsantojen bağına etkisi (+: dixsantojen bağı oluştuğu, - : dixsantojen bağı oluşmadığı).....	101
Tablo 3.27 Galen/sfalerit karışımı flotasyon test koşulları	107
Tablo 3.28 Galen/sfalerit numunesi ile yapılmış test sonuçları	105
Tablo 3.29 Galen/pirit karışımları flotasyon test koşulları	106
Tablo 3.30 Galen/kalkopirit karışımları flotasyon test koşullar.....	108
Tablo 3.31 Galen/kalkopirit karışımları flotasyon test koşullar.....	111
Tablo 3.32 Galen/kalkopirit numunesi ile yapılmış test sonuçları.....	112
Tablo 3.33 Tanelerin test düzeneğinde kalma süreleri	125
Tablo 3.34 Tanelerin test düzeneğinde kalma süreleri	123
Tablo 3.35 Giresun-Şebinkarahisar kurşun-çinko cevheri konvensiyonel flotasyon test koşulları.....	126
Tablo 3.36 Giresun-Şebinkarahisar konvensiyonel yöntemle yapılan flotasyon test sonuçları.....	127
Tablo 3.37 Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevherine utrasonik enerji kullanılarak yapılan flotasyon test koşulları	130
Tablo 3.38 Giresun-Şebinkarahisar Ultrasonik enerji uygulanarak yapılan flotasyon test sonuçları.....	131
Tablo 3.39 Balıkesir-Balya kuşun çinko cevheri konvensiyonel flotasyon test koşulları	137
Tablo 3.40 Ultrasonik enerji uygulanarak yapılan Balıkesir-Balya test sonuçları...	140
Tablo 3.41 Kütahya-Çatak demir cevheri konvensiyonel yöntem test koşulları.....	144
Tablo 3.42 Kütahya-Çatak demir cevheri konvensiyonel yöntem test sonuçları....	144
Tablo 3.43 Kütahya-Çatak demir cevheri ultrasonik enerji uygulanarak yapılan flotasyon test koşulları	145
Tablo 3.44 Kütahya-Çatak demir cevheri cevheri ultrasonik enerji uygulanarak yapılan flotasyon test sonuçları	145
Tablo 3.45 Kütahya-Çatak demir cevheri ultrasonik enerji uygulanarak yapılan flotasyon test sonuçlar	147

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Dünya çapında endüstrinin gelişmesinden dolayı metale olan talep gün geçtikçe artmaktadır ve artan bu talebi karşılamak için metal proseslerinin geliştirilmesi gerekmektedir (Moslemia ve Gharabagh, 2017). Sülfürlü cevherler (galen, sfalerit, pirit ve kalkopirit) genellikle birlikte bulunur (Mu ve diğer., 2016). Ancak, pirit sülfür minerallerinin içinde istenmez ve gang minerali olarak değerlendirilir. Değerli sülfür mineralleri genellikle diğer gang minerallerinden genellikle flotasyon yoluyla uzaklaştırılır (Li ve diğer., 2012).

Flotasyon, minerallerin karakteristik yüzey farkı özelliğinden yararlanılarak pülp içindeki değerli mineralleri, diğer değersiz minerallerden ayırmada yaygın olarak kullanılan cevher zenginleştirme yöntemidir (Xia ve diğer., 2018; Mao ve diğer., 2020). Flotasyon özellikle düşük tenörlü kompleks yapılı Pb-Cu-Zn cevherlerinin zenginleştirilmesi için kullanılan en yaygın ayırma yöntemidir (Kurşun ve Ulusoy, 2015). Dünya çapında sülfür cevherini flotasyonla zenginleştirmek için ksantat en çok kullanılan toplayıcı reaktiftir (Natarajan ve Nirdosh, 2006). Ksantat reaktifleri çinko iyonlarına karşı düşük bir afiniteye sahip olduğu için, sfalerit minerali direk ksantat ile yüzdürülemez. Bu yüzden bakır iyonları ile aktive edilmesi gerekmektedir (BouLon ve diğer., 2005). Flotasyonda bir tanenin yüzebilmesi için, pülp içinde tane ile kabarcık arasında karşılaşma, yapışma ve ayrılma olayının gerçekleşmesi gerekmektedir (Wanga ve diğer.,2015; Polat ve diğer., 2003).

Günümüzde ince ve çok ince boyutlarda serbestleşen minerallerin flotasyon yoluyla ayırımında oldukça zorluk yaşamaktadır. Çünkü boyut küçüldükçe, gaz kabarcıkları taneleri verimsiz toplaması, mekanik taşıma (Gong ve diğer., 2010) şlam kaplama ve yüzey oksidasyonunun olması gibi sebeplerden dolayı flotasyon ürünleri endüstriyel gereksinimleri karşılayamamaktadır (Chena ve diğer., 2020). Flotasyon proseslerini malzeme yapısı, kullanılan kimyasal yapısı, ekipman ve işletme şartları gibi değişkenler büyük ölçüde etkilenmektedir. Ultrasonik enerji bu değişkenler içinde en önemlilerinden biridir (Özkan, 2018). Yüksek tenörlü cevher rezervleri gün geçtikçe tükenmektedir (Vasanthakumar ve diğer., 2017). Buna karşın, artan talebi karşılamak

için düşük tenörlü ve kompleks yapılı cevherlerin ayrılması için daha yeni proseslerin geliştirilmesi gerekmektedir (Jia ve diğ., 2019).

Ultrasonik enerji, endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır. Özellikle madencilik endüstrisinde, yüzey temizleme işlemlerinde kullanılmaktadır (Videla ve diğ., 2016; Gngoren ve diğ., 2020). Ultrasonik enerji 20 kHz den yüksek titreşim hareketi yapan ses dalgalarıdır (Zhao ve diğ., 2007; Güngören ve diğ., 2017; Lv, 2020). Ultrasonik enerjinin yaygın olarak kullanılan frekans aralığı 20-100 kHz civarındadır (Farmer ve diğ., 2000; Ghadyani ve diğ., 2018). Ultrasonik işlemin mineral yüzeyinde temizleme, parçalama, indirgeme ve oksidasyon, aktivasyon ve daha etkili reaktif emülsifikasyonu gibi etki yaptığı bilinmektedir (Donskoi ve diğ., 2012). Ultrasonik enerji mineral yüzeyinde kavitasyon baloncukları mineral yüzeyinde patladığı zaman 1000-5000 atm basınç ve 1000 - 5000  C sıcaklık yaratabilir (Zhou ve diğ., 2009). Ayrıca boyutu yaklaşık 100  m olan kabarcıklar oluşur (Güngören ve diğ., 2019). Ultrasonik enerji mineral yüzeyinde fiziksel (Wen-ze ve diğ., 2009), veya fiziko-kimyasal değişim yapabilir (Wu ve diğ., 2020).

Ultrasonik enerji pülp içine uygulandığında, kavitasyon etkisiyle 100 m/sn hızında sıvı jetleri oluşturur. Bu sıvı jetleri mineral yüzeyinde hem şlam tabakalarını temizlemekte hem de oksidasyonunu gidermektedir. (Cao ve diğ., 2017). Çok sayıda araştırmacı metal yüzeylerinin temizliğinde, sedimantasyon ve susuzlandırma işlemlerinin hızlandırılmasında, atık su atımı ve metal eltmesi için kimyasal işlemlerde ultrasonik enerjinin bu eşsiz zellikliğini kullanmıştır (Altun ve diğ., 2006). Özellikle, ultrasonik enerji flotasyon yapmadan önce mineral yüzeyine uygulandığında minerallerin yüzey özelliklerini değiştirebilir, ve böylece değerli ve istenmeyen mineraller arasındaki seçiciliği arttırabilir (Fang ve diğ., 2020). Bugüne kadar yapılan çoğu çalışmada, ultrasonik enerjinin flotasyon ncesi (Aldrich ve diğ., 1999; Kang ve diğ., 2008; elik ve diğ., 2002) ve flotasyon boyunca (zn ve diğ., 2019; ilek ve zgen, 2009) zerinde durulurken, son zamanlarda yapılan çalışmalarda ise ultrasonik enerjinin sonrası üzerindeki etkileri üzerinde durulmaktadır (Horasan ve diğ., 2020). Özellikle, ultrasonik enerjinin sülfürlü mineraller üzerindeki etkisi üzerine sistematik bir çalışma, literatüre önemli bir katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma kapsamında, sülfürlü saf cevherler (galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit) ile mikro-flotasyon testleri ve tesislerden alınan sülfürlü cevherler ile Ultrason destekli flotasyon test düzeneğinde flotasyon testleri yapılarak ultrasonik enerjinin sülfürlü cevherler üzerindeki verim ve selektiviteye olan etkisi araştırılmıştır.

Araştırmalar sonucunda; ultrasonik enerji, sülfürlü saf cevherler için yapılan mikro-flotasyon testlerinde ve ultrason destekli flotasyon test düzeneğinin kullanıldığı flotasyon testlerinde kondisyonlama önce ve boyunca uygulandığında tüm mineraller üzerinde canlandırma etkisi gösterdiği tespit edilmiştir. Fakat, ultrasonik enerji kondisyonlama sonrası (konsantrenin yeniden yüzdürülmeden önce) uygulandığında pirit, kalkopirit ve sfalerit üzerinde bastırıcı etki yaparken galen üzerinde canlandırıcı etkisinin devam ettiği tespit edilmiştir.

Ultrasonik enerjinin bu özelliğinden yararlanılarak; kondisyonlama önce ve boyunca uygulandığında tüm minerallerin selektivite ve verimin artırılabilmesi tespit edilmiştir. Ultrasonik enerji kondisyonlama sonrasında uygulandığında, galen diğer sülfürlü minerallerden ayrılabilmesi tespit edilmiştir. Mikro-flotasyon araştırmalarının sonuçları FTIR ve SEM analizleri ile değerlendirilmiştir. Ultrason destekli flotasyon test düzeneğinin kullanıldığı flotasyon testlerin sonuçları kimyasal analizler yapılarak değerlendirilmiştir.

1.1 Sülfürlü Cevherlerin Minerolojisi

Sülfürlü cevherler minerolojik olarak, genellikle pirit, galen, sfalerit ve kalkopirit birlikte bulunur. Kompleks cevher yataklarındaki mineraller, cevher yapısı içerisinde 10 µm tane büyüklüğüne kadar bulunabilirler. Sülfür cevherler değerli aLın ve gümüş ile birlikte bulunabildiği gibi, gang mineralleri olan barit, kuvars gibi minerallerle de birlikte bulunabilir (Cases, 1980).

Kompleks sülfür cevherleri, deniz altı volkanizma ile birlikte ortaya çıkan termal aktivite veya denizaltındaki kırık ve çatlaklarla ortaya çıktığı düşünülmektedir. Parlak kesitlerin polarizon mikroskobu altında incelenmesi ile herhangi bir basınç tespit edilememesi ve değerli metallerin birbirleri ile oluşturdukları yapıların metamorfizma geçirmediği görülmektedir. Sedimanter kökenli, metamorfizma geçirmemiş sülfürlü cevherlerin tane boyutlarının (100 µm) küçük olmasına rağmen, metamorfizma

geçirmiş sülfürlü cevher yataklarındaki minerallerin tane boyutu daha büyük ve kristalize şekildedir. Metamorfizma geçirmemiş volkanik-sedimanter cevher dört farklı tipte sınıflandırılır (Cases, 1980).

1.1.1 Silisli Cevherler

Çoğu zaman asidik plajioklas ve riyolitik kayaların içerisinde bol miktarda bulunmaktadır. Bulunduğu cevherlerin içinde tamamen kriptokristalin şeklinde bulunmakta ve orijinal kayadan hiçbir iz taşımamaktadır. Bu tür cevherlerde tetrahedrit kristal yapısında galen ve sfaleritin az miktarda bulunmasına rağmen, kuvars, kalkopirit ve pirit daha fazla bulunmaktadır (Cases, 1980).

1.1.2 Sarı Cevherler

Bu cevherlerde farklı miktarlarda kalkopirit bulunsun da temel cevher pirittir. Pirit ve kalkopirit çok fazla bulunduğu için, bu cevherlere sarı cevher adı verilmiştir. Bu cevherlerde az miktarda sfalerit, galen ve tetrahedrit ana mineraller içerisinde dağılmış durumdadır. Bu cevher içerisindeki pirit 100 µm daha küçük tane boyuna sahiptir (Cases, 1980).

1.1.3 Siyah Cevherler

Kompleks şeklinde ana mineral olarak (barit, pirit, kalkopirit, galen ve sfalerit) bulunurken ikincil mineraller olarak bornit ve gümüş mineralleri bulunmaktadır. Minerallerin çoğu ince tanelidir. Ana mineraller oldukça iri tane fraksiyonunda (100-300 µm) olmasına rağmen, ikincil mineraller daha ince tane fraksiyonuna (3-15 µm) sahiptir. Bu cevherlerin flotasyonu yapıldığı zaman sfalerit, kalkopirit gibi davranmaktadır. Bunun sebebi ortamda bulunan bakır iyonlarının sfaleriti canlandırmasıdır (Cases, 1980).

1.1.4 Piritik Cevherler

Bu tür cevher bileşiminde ana mineral pirittir. Bunun yanında çok az miktarda kalkopirit ve diğer metal sülfürler bulunur (Cases, 1980).

1.2 Sülfürlü Minerallerin Yapısı

Sülfürlü mineraller, kükürt ve elektro pozitif bir metalin etkileşimi sonucunda oluşan bileşiklerdir. Kükürt, hidrosülfirik asit (H_2S) ya da hidrojen polisülfid (H_2S_x) şeklinde ortamda bulunduğu, sülfürlü mineraller (Me_2S veya Me_2S_x) oluşur.

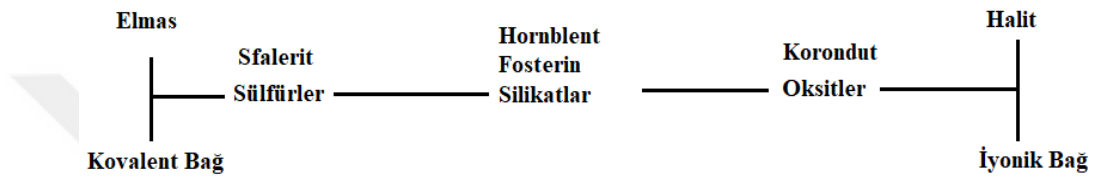
Sülfürlü mineraller kimyasal yapılarındaki ana bağ türüne ve fiziko-kimyasal özelliklerine göre üç sınıfa ayrılabilirler;

1. Dış yörüngeleri s elektronuyla biten geçissiz metal sülfür bileşikler
2. Tamamlanmamış d ve f elektron yapısıyla biten geçiş metalli sülfür bileşikler
3. Dış yörüngeleri s ve p elektronları ile biten metal olmayan veya yarı metal sülfür bileşikleridir.

İlk grup bakır ve çinko gibi aL gruplarını da içine alan metal sülfür bileşiklerinden oluşur. Sistem daha duraylı bir enerji düzeyine ulaşma eğiliminde olduğundan bakır aL grubu metaller s^{-1} elektronlarını kükürt atomlarına vererek Me_2S ve MeS bileşiklerini oluştururlar. Böylece metal atomu d^{10} elektron düzenine ulaşırken, sülfür atomu S_2P_6 düzenine ulaşır. Bu tür bileşikler yarı iletken özelliğe sahiptirler. İkinci grup sülfürler d ve f elektron yapısıyla bitmiş olan geçiş metalleriyle yapmış olduğu bileşikler kapsar. Bu grupta krom, manganez, demir, platin grubu elementler, aktinidler ve nadir metaller bulunur. Bu gruptaki metal sülfürler homojen yapılara sahiptirler (Me_2S , MeS , Me_3S_4 , Me_2S_3 , MeS_2 , MeS_3). S/Me oranı büyüdüğü zaman metal ve sülfür atomları arasındaki kovalent bağ miktarıda büyür. Üçüncü grup bileşikler ise dış yörüngesi s ve p elektron tabakasından oluşan metalik olmayan ve yarı metalik sülfür bileşiklerdir (Abromov, A.A and Audohin, V.M., 1997).

1.3 Sülfürlü Minerallerin Yüzey Özellikleri

Sülfürlü mineraller bakır, kurşun, çinko endüstriyel hammadde olan temel metallerin başlıca kaynağıdır. Minerallerin flotasyonu, yapılarındaki bağların türüne göre değişim gösterir. Minerallerin iyonik karakteri arttıkça, flotasyonu zorlaşmaktadır. Çünkü mineralin iyonik karakteri ile mineralin ıslanabilirliği doğru orantılı olarak artmaktadır. Ancak, minerallerin çoğu hem iyonik hem de kovalent bağ karakterine sahiptirler. Minerallerin iyonik ya da kovalent bağlı olma durumları orantısal olarak Şekil 1.1’de verilmiştir (Fuerstenau ve diğer., 1985).



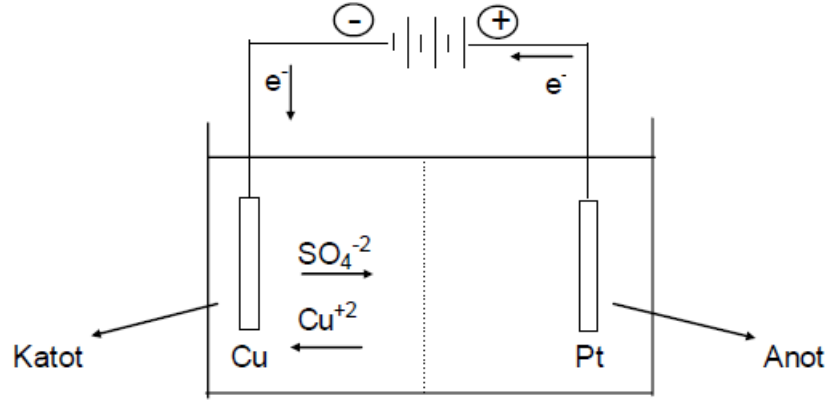
Şekil 1.1 Minerallerin iyonik-kovalent bağ derceleri (Fuerstenau ve diğer., 1985)

Minerallerin iyonik karakteristiği su içine atıldığında çözünürlüğüyle ilişkilidir. Sülfürlü minerallerin çözünürlük oranı diğer mineral gruplarından daha düşük değerdedir. Ancak Sülfürlü minerallerin pülp içindeki kararlılık durumu sadece ortam Ph'sı ile ilişkili değil, ortamda meydana gelen redoks koşulu ve elektrokimyasal potansiyeliyle de ilişkilidir (Fuerstenau ve diğer., 1985). Sülfürlü mineraller genellikle su ve çözünmüş oksijen ile girdikleri tepkimelere göre karakterize edilirler. Bu mineraller oksijenli ortamlarda kararsız iken su içine atıldıkları zaman yüzeyleri oksitlenerek S^{-2} , S^0 , $S_2O_3^{2-}$, SO_4^{2-} metal iyonlarını oluşturabilirler (Smart, 1991). H^+ ve OH^- iyonları, oksitli minerallerin katı çözelti arayüzeyindeki yükü ve potansiyeli belirleyici iyonlardır. Flotasyonda sfalerit (ZnS) ve galen (PbS) gibi baz metal sülfürlerin potansiyeli belirleyici iyonlarının metalik katyon ve sülfür iyonları olması beklenebilir. H^+ ve OH^- iyonları sülfid çözeltisinde potansiyeli belirleyici iyonlardır. Bu durum, metal M^{+2} ve S^{-2} iyonlarının ortam üzerine etkisini değiştirmez, ancak H^+ ve OH^- iyonlarının önemini ortaya koyar. Sülfürlü mineraller için sıfır yük noktaları (p.z.c) veya izoelektrik noktalarının (i.e.p) değerleri, oksitli minerallerden daha fazla değişkenlik gösterir. Çünkü sülfürlü mineral yüzeyleri çok çabuk oksitlenir. Sülfürlü

mineraller ortamın pH değerine veya oksijen ile temas süresine bağı olarak farklı oranlarda oksitlenirler (Healy ve Moignard, 1976).

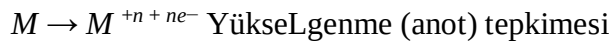
1.4 Sülfürlü Minerallerin Elektrokimyası

Denge durumundaki bir elektrokimyasal hücreye dışarıdan başka bir gerilim uygulanırsa sistemin dengesi bozularak sistemden akım geçmeye başlar. Elektrokimyasal hücre, çözelti ya da eritilmiş tuz, maddenin değişmiş elektrotları ve bu elektrotları birbirine bağlayan devreden meydana gelmektedir. Bir elektroliz hücre örneği Şekil 1.2’de verilmiştir (Woods,1984).



Şekil 1.2 Elektroliz hücresi (Woods,1984)

Elektrokimyasal tepkime, indirgenme (reduction) ve yükselgenme (oxidation) tepkimeleri ile gösterilir. Yükselgenme ve indirgenme tepkimeleri genellikle aşağıdaki gibi gösterilir (Woods,1984).



Sülfürlü mineraller bazen çözelti içrisine konduğu zaman elektron alıcısı veya vericisi olarak davrandıklarından dolayı yüzeylerinde elektrokimyasal tepkimeler meydana gelebilir. Sülfürlü minerallerin flotasyonu sırasında mineralin daha önceden veya flotasyon sırasındaki oksidasyonu, mineral-su arayüzeyindeki potansiyel farkı

flotasyon için çok önemlidir. Çünkü, hangi reaksiyonun oluşacağını ve reaksiyonun ne kadar sürede olacağını bu potansiyel farkı belirler. Sülfürlü minerallerin flotasyonu için, mineral yüzeyinin oksitlenme derecesi önemlidir (Guy and Trahar, 1985).

1.5 Sülfürlü Cevherlerin Zenginleştirilmesi ve Temel İlkeleri

Bakır, kurşun, çinko gibi metaller sanayinin her türlü alanında kullanılabildikleri için çok miktarda üretimleri yapılmaktadır. Ayrıca, bu metaller neredeyse tüm ülkelerde bulunmaktadır. Kurşun, çinko, bakır minerallerinin ortak özelliği genellikle sülfürlü yapıda olmalarıdır. Bu tür minerallerin zenginleştirilmesinde ise büyük ölçüde flotasyon kullanılmaktadır. Çünkü bu minerallerin yataklanmaları birbirinin içine geçmiş haldedir ve kompleks bir yapıya sahiptirler. Bu yüzden çok ince boyutlarda serbestleşmektedirler. Bu sülfürlü cevherleri ince boyutlarda zenginleştirmenin en iyi yollarından biri flotasyon işlemidir. Flotasyon, minerallerin yüzey ve ara yüzey karakteristik durumlarından yararlanılarak yapılan bir zenginleştirme yöntemidir (Atak, 2017)

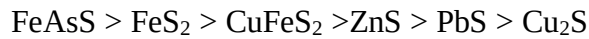
Kalkopirit, galen, sfaleritin ve pirit cevheri içerisinde bulunan gang minerallerinin türü, bileşimi ve miktarı flotasyon prosesinin belirlenmesinde ve reaktif seçiminde önemli rol oynamaktadır. Kompleks cevherler öğütülerek serbestleşme boyutuna indirmek gerekir, ancak cevher içerisinde bulunan galenin çok kolay şlam haline gelmesi karşılaşılan en önemli sorundur (Warren, 1984)

Kompleks sülfürlü cevherlerin doğada en çok bulunanı bakır sülfürlerdir. Bakır sülfürler, genellikle pirit ve pirotin gibi demir sülfür mineralleri ile beraber bulunur. Bu mineraller bünyelerinde, kobalt, molibden, kurşun, çinko sülfürleri ve sülfü tuzları da bulundurabilirler. Sülfürlü cevherlerin flotasyonunda, toplayıcı olarak genellikle dithiokarbonatlar, ksantatlar, dithiofosfatlar, dithiofosfinler, thionokarbamatlar ve dithiokarbamatlar genellikle kullanılmaktadırlar. Kalkopirit, galen ve sfaleritin cevherlerinin zenginleştirme proseslerinde kullanılan en yaygın reaktifler Tablo 1.1’de verilmiştir (Laskowski ve diğer., 1993; Liu diğer., 1993, 1989a).

Tablo 1.1 Cu, Zn ve Pb zenginleştirmesinde kullanılan en yaygın reaktifler

	Bastırıcı	Köpürtücü	Canlandırıcı	Toplayıcı
Bakır	Na ₂ S NaCN	Çam yağı Alkoller Kriserik asit		Ksantatlar Dithiofosfatlar Dithifosfinler
Çinko	ZnSO ₄ Na ₂ SiO ₃	Çam yağı Alkoller	CuSO ₄	Ksantatlar Dithiofosfatlar Dithifosfinler
Kurşun	K ₂ Cr ₂ O ₇ Na ₂ Cr ₂ O ₇ H ₂ SO ₃	Çam yağı Alkoller		Ksantatlar Dithiofosfatlar Dithifosfinler

Kompleks yapılı düşük tenörlü cevherlerin zenginleştirilmesinde selektiviteyi artırmak için kuvvetli flotasyon düzenleyicilerinin kullanılması uygundur. İnorganik düzenleyiciler çevresel açıdan zararlı olduğundan dolayı, çevre dostu kabul edilen polisakkaridler gibi doğada bozunabilen toplayıcıların kullanılması daha uygundur. Nişasta ve selüloz en önemli polisakaritlerdir. Cevherin oluşumunda ya da sonrasında meydana gelen oksitlenme durumunda, mineral yüzeyleri flotasyon reaktiflerine istenilen şekilde tepki oluşturamayabilir. Ayrıca, Cu²⁺ ve Pb²⁺ iyonların varlığı seçimli flotasyonu olumsuz yönde etkiler. Aşağıda bazı önemli sülfürlü minerallerin birbirlerine göre oksitlenme dereceleri görülmektedir (Laskowski diğer., 1993).



Buna göre en kolay oksitlenen mineral FeAsS iken en zor Cu₂S oksitlenmektedir. Galen, sfalerit ve kovelin mineralleri yanında pirit minerali bulunduğu zaman 8-20 kat daha hızlı oksitlenmektedir. Bunun sebebi, bu minerallerin, pirit-oksijen katodu ile kolaylıkla elektrokimyasal temas kurmaları yani galvanik etkileşimdir. Çözeltideki minerallerin oksitlenme özellikleri, çözünmüş oksijen derişimi ve pH daki artışa bağlı olarak artar. sülfürlü yaşlı yataklanmış cevherler genç cevherlere göre daha zor oksitlenmektedir. Bu tür yataklanmış cevherlerin flotasyon özellikleri, yapılarındaki minerallerin birbirleri ile oluşturdukları bağların türüne bağlı olarak değişmektedir.

Pek çok mineral hem iyonik hem de kovalent yapıda olmasına karşın, minerallerin iyonik özelliği arttıkça flotasyonu zorlaşmaktadır. Sülfürlü minerallerin büyük çoğunluğunun su içerisindeki çözünürlüğü diğer minerallere kıyasla daha düşüktür. Ancak bu minerallerin sulu ortamdaki davranışı oksitli minerallerdeki gibi sadece ortam pH'sı ile ilişkili olmayıp, pülp içindeki elektrokimyasal potansiyele ve redoks koşullarıyla da ilişkilidir (Smart, 1991; Gaudin, 1957).

Sülfürlü minerallerin sıfır yük noktalarının (p.z.c) değerleri, oksitli minerallerde olduğundan çok daha fazla değişkenlik gösterir. Çünkü sülfürlü minerallerin yüzeyleri çok çabuk oksitlenmektedir. Sülfürlü mineraller, pülp pH değerine ve oksijenle temas süresine bağlı olarak farklı derecede oksitlenir. Oksitlenme meydana geldiği zaman ortamda bulunan bakır iyonları piriti canlandırarak temiz bakır konsantresi alımını zorlaştırabilir. Böyle bir durumla karşılaştırıldığı zaman pülpdeki bakır iyonlarını bastırmak için siyanür kullanılması ve miktarının artırılması gerekmektedir. Kompleks bakır-kurşun-çinko cevherlerinin flotasyonunda, önce sfalerit ve demir sülfürleri seçimli olarak bastırmak gereklidir. Bastırmak için ise öğütme işlemi sırasında değirmene, sodyum sülfid (Na_2S), sülfüroz asit (H_2SO_3), kükürt dioksit (SO_2) gazı ve sodyum metabisülfid ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) eklenmelidir (Wills, 1989).

Sülfürlü mineraller üzerindeki kükürt dioksitin bastırıcı etkisi, piritten başlamak üzere sfalerit, galen ve kalkopirite doğru azalmaktadır. Bakır + kurşun toplu flotasyonu aşamasında, pülpden çözünmüş halde bulunan (Pb^{++} , Cu^{++}) çinkoyu da canlandırarak yüzdürebilir. Bu durumu engellemek için pülpe alkali siyanür ilavesi yapılmalıdır, fakat alkali siyanür miktarı bakırı bastırmayacak şekilde dikkatle ayarlanmalıdır. Böyle bir durumda çinkoyu bastırmak için siyanid değişik oranlarda çinko sülfat ile karıştırılarak pülp içine ilave edilir. Genel olarak 4-5 oranında çinko sülfat ve 1 oranında siyanid ile birlikte bir karışım olarak kullanılır. Bastırılan çinkoyu yüzdürmek için ortama bakır sülfat (CuSO_4) ilavesi ile sfalerit aktif hale getirilir. Pülp pH değeri 8,5-12 arasına getirilerek çinko yüzdürülür. Artıktaki demir sülfürler (pirit vb.) ise pülp ortamının zayıf asidik hale getirilmesiyle yüzdürülebilir. Bakır ve kurşunu etkin bir şekilde ayırmak için siyanid, kromat ve sülfür dioksit metodu geliştirilmiştir. Hangi metodun uygulanması gerektiği, karışımdaki kurşun ve bakır'ın miktarına göre belirlenir. Genel olarak kurşun miktarının bakır miktarından fazla olduğu zaman, kurşun minerali bastırılır. Galeni bastırmak için genelde, sodyum

dikromat ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ya da SO_2 kullanılır. Bazı durumlarda bakır + kurşun toplu konsantreleri, çok miktarda çinko ve demir sülfür de içerebilir. Pülp sıcaklığı artırıldığında galen mineralinin bastırıldığı, kalkopiritin yüzdürüldüğü bilinmektedir. Flotasyon işleminde sıcaklığın 70°C 'nin üzerine çıkarılması ve ardından nişasta, dektrin ya da SO_2 metodu genel olarak kullanılmaktadır. Bakır miktarı kurşun miktarından fazla ise, bakır sodyum siyanür ya da siyanür çinko ile bastırılabilir. Demir sülfür mineralleri ($\text{pH} > 10$) bastırılır (Wills, 1989).

Bazı durumlarda çinko flotasyonunda ters flotasyon yöntemi de uygulanır. Bu gibi uygulamalarda, kolay yüzebilen demir sülfürler (pirit ve pirotin) çinko konsantrelerinin tenörünü düşürür. Çinko tenörünü istenilen miktarda yükseltmek için ters flotasyon uygulanabilir. Bu işlem sırasında, ortamın pH değeri 4,5-5 olacak şekilde ayarlanır. Daha sonra SO_2 ilavesi ve Pülp sıcaklığı $70-80^\circ\text{C}$ 'ye çıkartılarak sfaleriti tamamen bastırılır. Yeterince koşullandırma işleminden sonra demir sülfürler ksantatlar ile yüzerken, sfalerit ise yüzmez. Endüstriyel bazda ters flotasyon yaygın kullanılmaktadır. Elde edilen konsantre içerisindeki civa, bizmut, arsenik, antimuan gibi minerallerin varlığı bakır kurşun zenginleştirilmesini zorlaştırır (Bayraktar, 1988-1990).

Ksantatlar asidik ortamlarda kolaylıkla bozunabildiği için alkali ortamlarda kullanılırlar. Sülfürlü minerallerin yüzmesi için ksantatlar mineral yüzeyine metal ksantat (MX) veya diksantojen (X_2) şeklinde soğurulması gerekir. Metal ve sülfür atomları arasında oluşan metal-ksantat bileşikler kovalent bağ kurdukları için çözünürlükleri düşüktür. Dithiofosfin (DPTI), dialkil dithiofosfinin üç adımlı tepkimesi sonucunda oluşur, fakat oldukça pahalıdır (Çilek, 2006).

1.6 Sülfürlü Cevher ve Genel Özellikleri

1.6.1 Kurşun Cevherleri

1.6.1.1 Kurşun Cevheri ve Genel Özellikleri

İlk çağlardan beri bilinen ve çok yaygın kullanılmakta olan galen, yer kabuğunda %0,016 oranında bulunan bir mineralidir. En yaygın bilinen kurşun minerali galendir. Oksidasyon oranına bağlı olarak, kurşun cevherleri önemli miktarda seruzit ve anglezit

içerir. Yeryüzünde bulunan elementler arasında 34. sırada yer alan kurşun; değişik alaşımlar olarak korozyona karşı dayanıklı olması, kolayca şekillendirilebilmesi, yüksek özgül ağırlığı ve düşük bir çekme mukavemetine sahip olmasından dolayı pek çok sanayi alanında kullanılmaktadır. Galen, serüzit, anglezit, jamesonit, bulanjerit, piromorfit ve vulfenit en önemli kurşun mineralleridir. Doğada en çok bulunan ve işletilen kurşun minerali galen dir. Kurşunun genel özellikleri Tablo 1.2’de verilmiştir (Dündar ve Arslan, 2005).

Tablo 1.2 Kurşunun genel özellikleri

Sembol	Pb
Atom numarası	82
Atom ağırlığı	207,2 atomik kütle birimi
Erime noktası	327,5 °C
Kaynama noktası	1525 °C
Elektrik direnci (20 °C)	208 nΩm
Yoğunluk	11,34 g/cm ³
Mohs sertliği	1,5

1.6.1.2 Kurşunun Cevherlerinin Kullanım Alanları

Kurşun mineralleri akü imalatı, kablolarının kurşunla izolasyonu, korozyonu önleyen boyalar, kablo kaplanması, benzin içinde oktan ayarlayıcı bileşikler, x-ışınlarından korunma ve televizyon tüpleride boya olarak kullanılabilir (DPT, 2001; Yıldız, 2014).

1.6.1.3 Kurşun Cevherlerinin Zenginleştirilmesi

Kurşun cevherleri genellikle istenilen saflıkta olmadığı için zenginleştirilmesi gerekmektedir. Genellikle kurşun cevheri gravite ve flotasyon yöntemiyle zenginleştirilmektedir (DPT, 2001; Yıldız, 2014).

Gravite yöntemiyle zenginleştirme; Serbestleşme tane fraksiyonuna getirilen mineraller jig, ağır ortam ayırıcıları, spiral, sarsıntılı masalar ve multi gravite ayırıcısı (MGS) gibi gravite cihazlarıyla tek başlarına veya kombinasyon oluşturularak zenginleştirilebilirler. Gravite zenginleştirme yöntemleri diğer yöntemlere oranla düşük maliyetli olmasına rağmen metal kazanma verimleri düşüktür (Yıldız, 2014).

Flotasyon yöntemiyle zenginleştirme; Flotasyon düşük tenörlü kurşun minerallerinin yüksek tenör ve verimde kazanıldığı yöntemlerin başında gelmektedir. Gravite yöntemleri ile kıyaslandığında pahalı olmasına rağmen düşük tenörlü ve kompleks yapılı mineralleri selektif bir şekilde zenginleştirilmesinde uygulanmaktadır (Çilek, 2006).

Sülfürlü Kurşun-Çinko-Bakır Minerallerinin Flotasyonu; Bu tür minerallerin yüksek metal kazanma verimiyle kazanılması ve genellikle yanlarında aLın, gümüş, bakır gibi yan minerallerin bulunması bu cevherlerde iyi gelir sağlamaktadır. Sülfürlü pirit-kurşun-çinko birlikte bulunduğu cevherlerde önce kurşun yüzdürülür, sonra çinko, son kademede ise pirit yüzdürülür. Galeni flote etmek için önce çinko ve demir mineralleri pH: 8-10 getirilerek bastırılır. Çinko mineralini ise alkali siyanürler (NaCN veya KCN) ve $ZnSO_4$ kullanılarak bastırmak mümkündür. Çinko ksantatın çözünürlüğü oldukça yüksek olduğu için direk ksantat tipi toplayıcılarla yüzmez, fakat pülp içine canlandırıcı olarak Pb^{2+} ve Cu^{2+} iyonları ilave edildiğinde çinkonun yüzmesi sağlayabilir. Diğer taraftan, cevherde bakır + kurşun beraber zenginleştirilmek istendiğinde önce alkali siyanür miktarı bakırı bastırmayacak şekilde ayarlanır. Daha sonra çinko Na_2SO_4 , H_2SO_3 veya SO_2 gazı kullanılarak bastırılır. Sfalerit ve piritin bastırılmasından sonra, etil ksantat veya dithiofosfatlar kullanılarak bakırla kurşun birlikte flote edilebilir (Atak, 1990).

Oksitli Kurşun Minerallerinin Flotasyonu; Çoğu kez içerisindeki demir oksitli kil şlamından yıkanarak flotasyondan önce temizlenmesi gerekir. Ayrıca cevher içinde galen, sfalerit ve pirit varsa bu mineraller normal flotasyonla yine önceden ayrılmalıdır. Oksitli kurşun minerallerinin önce yüzeyi Na_2S kullanılarak minerallerin yüzeyinde metal-sülfürler ile kaplandıktan sonra ksantat tipi bir toplayıcıyla kurşun yüzdürülür (Önal ve Ateşok 1994).

1.6.2. Çinko Cevheri

1.6.2.1 Çinko Cevherleri ve Genel Özellikleri

Çinkonun kimyal simgesi Zn ve atom ağırlığı ise 30'dur. Çinko otomotiv ve alaşım gibi endüstrinin bir çok alanında kullanılmaktadır. Başlıca çinko mineralleri sfalerit, simitsonit, hemimorfit, zinkit, vilemit, franklinite, burnoit, aLait, krokoyit, lanarkit,

jordanit, zinkenit, bulanjerit, geokronit, hidrozkinkit ve mimetit'dir. Çinkonun başlıca genel özellikleri Tablo 1.3'de verilmiştir (DPT, 2001)

Tablo 1.3 Çinkonun genel özellikleri

Sembol	Zn
Atom numarası	30
Atom ağırlığı	65 g/mol
Erime noktası	419,53 °C
Kaynama noktası	907 °C
Elektrik direnci (20 ° C)	59 nΩm
Yoğunluk	7,14 g/cm ³
Mohs sertliği	2,5

1.6.2.2 Çinko Cevherinin Kullanım Alanları

Çinko demir harici metaller içinde çok fazla tüketimi yapılan bir metaldir. Çinko, galvanize çelik, pirinç, döküm, çinko oksit ve yarı fabrikasyon ürünlerde kullanıldığı görülmektedir. Diğer metallerle kolayca alaşım yapabilmesi nedeniyle çinko, endüstride bir çok alaşımın ve bileşiğin üretiminde kullanılmaktadır.

Ayrıca çinko, metallerin paslanmaz hale getirilerek korozyondan korunmada, pillerin gövdelerinin yapımında, otomotiv endüstrisinde döküm kalıplarında, ahşap koruyucu olarak, saatlerin akrep ve yelkovanlarında karanlıkta parlayan pigment olarak, lastik sanayiinde aktivatör ve sulu boyalarda beyaz pigment olarak, bazı merhemlerin bileşiminde soğuk yanıklarına karşı koruyucu olarak, bebeklerde pişik önleyici olarak ve yaşa bağlı göz hastalıklarının tedavisinde kullanılmaktadır (DTP, 2001).

1.6.2.3 Çinko Cevherlerinin Zenginleştirilmesi

Çinko cevherleri doğrudan sanayide kullanılamadığı için tenör değeri yüksek olması gerekmektedir. Bu yüzden genellikle zenginleştirilmesi gerekmektedir. Genellikle iki yöntem zenginleştirilmesinde kullanılır (Atak, 1990).

Gravite farkıyla zenginleştirme; Günümüzde çinko cevherleri zenginleştirmesinde yoğunluğa dayalı zenginleştirme yöntemi kullanılmaktadır. Sfalerit serbestleşme tane boyundaysa gravite ön zenginleştirme yaparak kazanmak

flotasyon maliyetlerinde azalmasını sağlamaktadır (Çilingir, 1996). Çinkonun gravite yöntemiyle kazanımında Falcon, Knelson Konsantratör ve MuLi Gravite Separatör (MGS), Kelsey jigi gibi cihazlar kullanılmaktadır (DPT, 2001).

Çinko cevherlerinin flotasyonu; Çinkoyu yüzdürmek için, bakır sülfat ile canlandırılması gerekmektedir. Yaklaşık olarak 250-800 g/t bakır sülfat kullanılabilir. Eğer ortamda pirit varsa pH değeri 10-12 civarında tutmak gerekmektedir. Böylece pirit de basılmış olur. Çinkonun canlanması uzun sürdüğü için 5-30 dk karıştırma işlemi gerekmektedir. Bakır sülfat ile kondisyonlama işlemi tamamlandıktan sonra uzun karbon zincirli bir amil veya izopropil ksantat kullanılarak çinko yüzdürülebilir. Çamyağı, alkol ya da suda çözünme özelliğine sahip eter gibi köpürtücüler çinko kazanımında kullanılmaktadır (Atak, 1994).

Okside çinko cevherlerinin flotasyonu; En önemli okside çinko minerali Smitsonit'dir. Su içinde sfalerite kıyasla yüzey aktif özelliği yüksek olduğu için kimyasal reaktiflerle bağ kurması oldukça zordur. Bu yüzden sfalerite kıyasla daha zor yüzelebilmektedir. Okside çinko mineralleri yağ asitleri ve aminler ile kolayca yüzelebilmektedir (Wills, 1984).

Çinkonun oksitli cevherleri büyük miktarda şlam içermektedir. Oksitli minerallerin toplayıcı olarak aminler kullanıldığında şlam mineral yüzeyini kaplama eğiliminde olduğundan dolayı reaktif tüketimi artmaktadır. Şlam boyutu flotasyona başlamadan önce mümkün mertebede uzaklaştırılmalıdır. Uzaklaştırılamıyorsa sodyum karbonat, sodyum silikat ve kalgon gibi dağıtıcılar kullanılmalıdır (Çilek, 2006).

Simitsonit sodyum sülfürlü ortamlarda 60 °C'nın üzerine ısıtıldığı zaman sülfürle kaplanıp ksantatlar ile kolayca yüzelebilmektedir. Simitsonit sülfürlendikten sonra bakır sülfat ilavesi yapılırsa daha da canlanacağı için daha kolay yüzebilir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için simitsonit çinko oksit olarak yalnız bulunması gerekir aksi halde bu yöntem uygulandığında olumsuz etki yapmaktadır (Önal ve Ateşok, 1994).

1.6.3 Bakır Cevheri

1.6.3.1 Bakır Cevherleri ve Genel Özellikleri

Bakırın kimyasal simgesi Cu, atom numarası 29, yoğunluğu 8,93 g/cm³'dür ve genellikle sülfürlü minerallerle beraber bulunan bir cevherdir. Kırmızımsı görünümüne

sahip asitten etkilenmeyen, mukavemeti düşük ve soğuk olarak şekillendirilebilen sülfürlü bir cevherdir. Açık havada uzun süre kaldığında yüzeyde oksitlenme ve paslanma olur (MTA, 2016). Başlıca bakır mineralleri kuprit, kalkosit, kovellit, kalkopirit, bornit, tenorit, malahit ve azurit şeklinde sıralanabilir (DPT, 2001).

1.6.3.2 Bakır Cevherlerinin Kullanım Alanları

Çok iyi fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı bakır, endüstrinin bir çok alanında kullanılmaktadır. Endüstride bakır askeri sanayi, inşaat sanayi, ulaşım sanayi, kuyumculuk, elektronik ve boya gibi birçok alanda kullanılabilir. Bakır metaller içinde volajlı kablolarda, enerji tasarruflu jeneratörler, motorlar, transformatörler ve yenilenebilir enerji üretim sistemlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (MTA, 2016).

1.6.3.3 Bakır Cevherinin Zenginleştirilmesi

Bakır yatakları için %0,25 Cu tenör değerine sahip yatak işletilebilir. Genellikle düşük tenörlü bakır yatakları büyük rezerve sahiptir ve ince boyutlarda serbeleşmektedir. Bakır cevherleri zenginleştirile bilme açısından sülfürlü, karbonatlı, oksitli-sülfürlü karışık cevherler ve bakır silikatlar şeklinde dört gruba ayrılabilir. Bakır cevherlerinin zenginleştirilmesinde flotasyon, liç ve gravite yöntemleri kullanılabilir (Çilingir, 1996).

Fiziksel yöntemlerle zenginleştirme; Fiziksel yöntemler bakır için bir ön zenginleştirme işlemi olarak uygulanmaktadır. Fiziksel yöntemlerle de değerli mineraller ile gang mineralleri arasındaki yoğunluk, manyetik duyarlılık, fotometrik ve radyoaktif özellik farkları kullanılarak zenginleştirme işlemi yapılmaktadır. Ön zenginleştirme, iri boyutta artıkların mümkün olduğunca değerli minerallerden gang mineralleri uzaklaştırma yapılarak ya da flotasyona beslenen cevher içerisindeki kil mineralleri uzaklaştırılarak sağlanabilir. Böylece ardından yapılacak flotasyonda verim artmaktadır. Gravite farkı ile bakır cevherlerini zenginleştirmek için yan kayaç ile arasında 0,7 ile 1g/cm³'lük bir yoğunluk farkı olmalıdır. Gravite cihazı olarak ağır ortam tamburları ya da ağır ortam siklonları tercih edilir (Çilingir, 1996).

Kimyasal yöntemlerle zenginleştirme; Sulfürlü ve oksitli cevherlerin liç ile zenginleştirilmesinde yığın, yerinde, tank ve basınç altında yapılan liç metotlarından biri kullanılmaktadır. Sulfürlü olmayan bakır kaynakları flotasyon ve pirometalurjik yöntemiyle zenginleştirmeye çalışıldığında yeterince başarı elde edilememektedir. Bunun yanında hidrometalurjik metotlar, sulfürlü cevherlerin zenginleştirme işleminde pirometalurjiden oldukça verimli ve daha ekonomik bir yöntem olarak görülmektedir. Hidrometalurjik yöntemler pirometolojik yöntemlere göre tesislerin yatırım giderleri daha azdır. Sulfürlü bakır minerallerini hidrometalurjik yollar ile ayırmak için önce kavurma ve sonrasında ise kavrulmuş cevheri liç etme şeklinde gruplandırılabilir (Wang ve diğer., 2013).

Flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesi; Kalkopirit, kalkosin, bornit, kovelin, tetraedrit, enargit, malakit, azurit, pirit, pirotin, markazit başlıca sulfürlü bakır mineralidir. Sulfürlü mineralleri değersiz minerallerden etkin şekilde kazanmak için flotasyon yöntemi tercih edilir. Sulfürlü mineraller flotasyonda ksantatlar, dithiyo-fosfatlar ve merkaptanlar kullanılmaktadır. İri boyutta serbest olanlar kaba flotasyonla önce gang minerallerinden uzaklaştırma işlemi yapılır. Daha sonra elde edilen konsantre öğütme işlemi ile daha küçük boyutlara getirilip selektif flotasyon ile birbirinden ayrılmış olur (Atak, 2017). Bakır sülfür mineralleri pH 10,5'un üzerinde tutularak ksantat tipi toplayıcılarla demir sülfürlerden kolayca ayrılabilir (Önal ve Ateşok, 1994).

Saf bakırın flotasyonu; Saf bakır sülfürlü reaktif miktarının fazla kullanılması ile kolay yüzme özelliği gösterirler. Bakır konsantrelerinin zenginlik dereceleri mineralin içerdiği bakır tenörüne göre değişmektedir. Kalkosit için bakır tenörü %70'e kadar çıkarken, kalkopirit için bu oran %15-30 arasında değişmektedir. Zenginleştirme oranıyla verim cevherin serbestleşme derecesine göre değişiklik göstermektedir. Çok ince boyutlarda serbestleşen cevherlerde ön konsantrenin ya da ara ürünün tekrar öğütülmesi gerekebilir (MTA, 2016).

Bakır + Kurşun + Çinko + Pirit flotasyonu; Kurşun-çinko-bakır- pirit bulunduran kompleks yapıli sulfür cevherlerine uygulanan flotasyon yönteminde sfalerit ve pirit bastırıldıktan sonra kurşun ve bakır birlikte yüzdürülür. Hücre altında kalan sfalerit ise bakır sülfat ve kireç ilavesi ile canlandırılarak yüzdürülür (Önal ve Ateşok, 1994).

Toplu olarak alınmış olan bakır-kurşun konsantresi üç şekilde birbirinden ayrılabilir;

- i) Eğer konsantredeki bakır, kurşundan fazla ise bakır mineralleri NaCN ile bastırılarak galen yüzdürülür. Kalkosin ve kovelin gibi sekonder mineraller ve az oksitlenerek yüzme yeteneğini kaybetmiş cevherlere bu yöntem uygulanmaz. İçinde aLın gümüş gibi değerli mineraller içeren cevherler siyanür ile kompleks oluşturabildiği için bu tür cevherlere de uygulanmaz.
- ii) Konsantre çoğunlukla galen minerali ise bakırın selektif olarak yüzmesi için bakırın bastırılması gerekir. Bu durumda ise galen sodyum dikromat ile bastırılır. Daha sonra bakır kolayca yüzdürülür. Sodyum dikromat çevre açısından zararlı etkileri olduğu için, yerine galeni bastırmak amacıyla SO₂ bulk konsantreye sıvı veya gaz olarak verilir. Bu SO₂ gazı paslanmaz çelik kapta kıvamlama yapılmalıdır (Önal ve ateşok, 1994).
- iii) **Çinko-Bakır cevheri flotasyonu;** Bakır-çinko cevherinde, bakır çok az ve ekonomik açıdan önem arzetmiyorsa çinkonun bastırılması gerekir. Önce pülp'e kireç ilave edilerek pH 8-12 arasında tutulmalıdır. Daha sonra pülp'e sodyum siyanür ya da çinko sülfat eklenerek çinko iyice bastırılmalıdır. Ayrıca bazı hallerde sodyum süfit, piro-sülfid de bastırıcı olarak kullanılabilir. Ortamdaki redoks potansiyelinin indirgen durumda oluşu ile ortamdaki sfaleritin canlanması önlenmektedir. Böyle bir ortamda kondisyonlama işlemi tamamlandıktan sonra ortama ksantatlarla ya da izopropil tiyonakarbonat kullanılarak bakır minerali kolaylıkla yüzdürülebilir (Önal ve Ateşok, 1994).

Okside bakır cevheri flotasyonu; Cevherdeki bakır mineralinin kısmen oksidasyonu ile sülfür mineralleri ile birlikte malakit, azurit, küprit ve metalik bakır gibi mineraller bir arada bulunabilir. Bazen oksidasyonun derecesi daha da artarak tüm sülfürler oksitli bakır minerallerine dönüşebilirler. Ksantat tipi toplayıcılar yalnız başlarına bu tür mineralleri verimli şekilde yüzdüremez. Bu tip cevherleri yüzdürme için üç farklı flotasyon metodu uygulanabilir;

- i) Na_2S kullanılarak oksitli bakır yüzeyi sülfürlü forma dönüştürülür. Daha sonra ksantatlar kullanılarak flotasyon yapılabilir. Bu yöntemde sodyum sülfür az az ilave edilip miktarı iyi ayarlanmalıdır. Aksi takdirde miktarı aşılırsa bakır için bir bastırıcı olabilir (Atak, 1990).
- ii) Yağ asitleri ile oksitli bakır mineralleri yüzdürülebilir. Bu durumda en önemli faktör cevher içindeki gang mineralinin yapısıdır. Eğer gang içinde kalsit, kuvass ve magnezyum gibi oksitli mineral varsa bunlar da yüzeceği için böyle durumda yağ asitleri kullanılamaz (Atak, 1990).
- iii) Liç çöktürme yoluyla oksitli bakır mineralleri seyreltik asit çözeltisine kolayca alınabilir. Pülp asitle karıştırılarak oksit mineralinin çözeltiye geçmesi sağlanır. Sonra pülp'e demir talaşı ilave edilerek çözeltiye geçen bakır metalik bakır halinde çöktürülür. Son olarak ksantat tipi toplayıcılarla bakır mineralleri yüzdürülür (Atak, 1990).

1.6.4 Demir Cevherleri

1.6.4.1 Demir Cevheri ve Genel Özellikleri

Demir yer yüzünde oldukça fazla oranda bulunur. Demirin kimyasal simgesi Fe, atom numarası 26, yoğunluğu $7,87 \text{ g/cm}^3$, atom ağırlığı $55,85 \text{ g/mol}$, erime noktası 1535°C , kaynama noktası 2750°C olan ve genellikle sülfürlü minerallerle beraber bulunan bir cevherdir. Doğada en çok bulunan demir mineralleri, manyetit, hematit, limonit, götit ve siderit ilmenit, pirit ve protin olarak sıralanabilir. Genellikle diğer minerallerle birlikte bulunurlar. Saf demir kül bryazı renkte, ince tel ve levha haline gelebilen, ısı ve elektriği iyi ileten ve kolay oksitlenebilen bir mineraldir. Demir çelik sanayinin esas hammadresi demir cevheridir. Diğer minerallerle birlikte bulunduğu için kullanılmadan önce zenginleştirilmesi gerekmektedir (MTA, 2017).

1.6.4.2 Demir Cevherlerinin Kullanım Alanları

Demir, yer yüzünde üretilen metaller arasında %95'lik kısmını kapsamaktadır. Tüm metaller içinde en çok kullanılanıdır. Demir, otomotiv, gemi gövdesi ve binaların

yapısal bileşeni, yüksek fırın pik demir üretimi, direkt redüksiyon tesislerinde ve katkılı çimento üretiminde kullanılmaktadır (DPT, 2001).

1.6.4.3 Demir Cevherlerinin Zenginleştirilmesi

Demir, sanayide en çok aranan hammaddelerin başında gelmektedir. Ancak, çok fazla bileşikler halinde bulunan demir ekonomik açıdan değerlendirilebilen bileşikleri manyetit, hematit, limonit ve siderittir. Geçmiş yıllarda endüstrinin istediği özellikteki demir cevher yatağından çıkartılıp doğrudan kullanmak mümkündü, fakat günümüzde istenilen özellikteki cevherlerin tükenmesi ve artan talebin karşılanmak için düşük tenörlü cevherlerin zenginleştirilmesi zorunlu hale gelmiştir.. Cevher yatağından çıkan demir cevherlerinin endüstrinin talebine cevap verecek hale getirmek için yapılan işlemleri iki grupta toplayabiliriz (MTA, 2017; Atak, 1990).

- Tenör içeriği yüksek cevherler
- Tenör içeriği düşük cevherler

Tenör içeriği yüksek cevherler için yapılan işlemler:

Yüksek tenör içeriğine sahip cevherler, endüstride kullanım aşamasından önce cevher zenginleştirme işlemi gerektirmezler. Bu cevherlere sadece boyut küçültme işlemi yapılarak kullanılabilirler (MTA, 2017; DPT, 2001).

Tenör içeriği düşük cevherler için yapılan işlemler:

Düşük tenör içeriğine sahip cevherler, endüstride kullanılmadan önce demir tenörünün yükseltilmesi gerekmektedir. Bu tür cevherler önce serbestleşme tane boyutuna getirildikten sonra boyuta uygun olacak şekilde çeşitli zenginleştirme yöntemleri uygulanarak tenör içeriği yüksetilir. Serbestleşme tane boyutuna getirilen cevher yapısına uygun olarak manyetik ayırma, gravite ayırması, flotasyon, elektrostatik ayırma, manyetik kavurma ve bunu izleyerek düşük alan şiddetli manyetik ayırma, seçimli salkımlama ve liç yöntemlerinden biri veya bir kaçının kombinasyonu yapılarak zenginleştirilebilir (Atak, 1990).

Manyetik Ayırma yöntemi; Değerli mineraller ve gang mineralleri arasındaki manyetik özellik farklılığından faydalanarak yapılan zenginleştirme işlemidir. Manyetik ayırma yöntemi, mineralin karakteristik özelliğine göre düşük ya da yüksek alan şiddetlerinde yaş veya kuru olarak yapılabilir. Yüksek çekilebilirliği olan mineraller için düşük alan şiddetli, düşük çekilebilirliği olan mineraller için yüksek alan şiddetli ayırıcılar kullanmak gerekmektedir. (MTA, 2017; DPT, 2001).

Gravite Ayırma yöntemi; Demir ve gang mineralleri arasındaki yoğunluk özelliği farklılığından faydalanarak yapılan zenginleştirme işlemidir (MTA, 2017; DPT, 2001).

Kırma, eleme ve klaafikasyonla ayırma yöntemi: Değerli mineral ile gang minerali serbestleşme boyutuna geldikten sonra mineraller arasındaki yapısal özellik farkından yararlanılarak yapılan zenginleştirme işlemidir (MTA, 2017; DPT, 2001).

Flotasyon yöntemi: Yüksek ve düşük alan şiddetli manyetik ayırmada meydana gelen gelişimler çok üst düzeyde olmasına karşın, manyetik ayırma belli bir boyut fraksiyonundan sonra isteğe cevap verememektedir. Bu yüzden çok ince boyutlarda flotasyon yöntemi kullanılmaktadır. Demir cevherleriyle birlikte bulunan oksit minerallerinin, oksijenden gelen katyonu ve ortamdaki H^+ ve OH^- iyonları pülp potansiyelini belirleyen iyonlardır. Bu tür cevherlerin yüzey yükleri ortam pH değerine göre değişkenlik gösterirler. Eğer mineralin yüzey yükü pozitif ise anyonik, mineralin yüzey yükü negatif ise katyonik türdeki toplayıcılar flotasyon işleminde kullanılabilir. Demir cevherleri doğada genellikle kuvars, kil ve kalsit gibi minerallerle birlikte bulunur (MTA, 2017; DPT, 2001).

Elektrostatik zenginleştirme: Bu zenginleştirme yöntemi, demir oksitler ve gang minerallerinin elektrik geçirgenliği farkı özelliğinden faydalanarak yapılan bir zenginleştirme yöntemidir. Yüksek verim ve selektivitede ürünler elde edilebilir. Genellikle zenginleştirme işlemlerinin son basamağında kullanılır (MTA, 2017; DPT, 2001).

Yıkama yöntemi: Bazı demir cevherlerinin su faskiyeleriyle ya da log yıkayıcılarında yıkayarak, gang minerallerinden ayrılmasıyla yapılan zenginleştirme yöntemidir (MTA, 2017; DPT, 2001).

Manyetik Kavurma yöntemi: Hematit minerali 600-800 °C de ısıtıldığında manyetit mineraline dönüşür. Isıtma işlemi tamamlandıktan sonra düşük alan şiddetli manyetik ayırıcılar kullanılarak hematit mineralini diğer gang minerallerinden

ayırmak mümkündür. Kavurma işlemi çok fazla ısı gereksimine ihtiyaç duyduğu için bu yöntem ekonomik değildir (MTA, 2017; DPT, 2001).

Kalsinasyon yöntemi: Demir cevherinde bulunan uçucu maddeler (karbon dioksit ve bünye suyu) ısıtılarak uzaklaştırılabilir. Bu durumda cevherin tenöründe yükselme meydana gelir (MTA, 2017; DPT, 2001).

Liç yöntemi: Fiziksel ve fiziko-kimyasal yöntemlerle istenilen düzeyde zenginleşmeyen demir cevherlerine liç işlemi uygulanır. Çözelti olarak NaOH kullanılabilir (MTA, 2017; DPT, 2001).

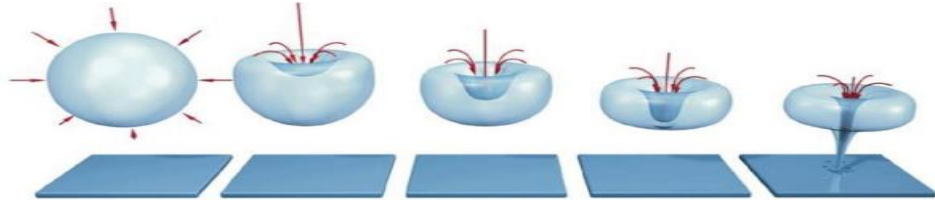


BÖLÜM İKİ

ULTRASONİK ENERJİ

Ultrasonik enerji son yıllarda endüstrinin birçok alanında kullanılmaya başlamıştır. Ultrasonik enerjinin ilk ortaya çıkışı yüksek hızlı torpido gemilerinin bakımı sırasında gemi pervanesinde fark edilen aşırı erezyondur. Bu aşırı erezyonun kavitasyon olarak adlandırılan bir olaydan kaynaklandığı araştırmalar sonunda ortaya koyulmuştur. Kavitasyon olarak adlandırılan olayın yol açtığı gemideki bu problemi, pervaneyi büyüterek ve dönüş hızını azaltarak gidermeye çalışmışlardır. Kavitasyon olayında, küçük kabarcıkların pervane yüzeyine çarpmasıyla büyük bir ısı ve basınç meydana geldiği tespit edilmiştir. Daha sonra yapılan çeşitli çalışma ve araştırmalarla birçok alanda Ultrasonik enerji kullanılmaya başlanmıştır. Ultrasonik enerjinin oluşturduğu enerji ısı, basınç, ışık ve malzeme yüzeyine düşen enerji gücü açısından diğer enerji türlerinden farklıdır. Çünkü bu enerji türü diğer enerji türlerine göre çok daha yüksek ve etkilidir. Burada çok yüksek enerji oluşmasının sebebi kavitasyon kabarcıklarının patlamasından kaynaklanmaktadır. Sonokimya, ultrason ile gerçekleştirilmiş olan bütün kimyasal ve fiziksel etkileri kapsamaktadır. Kavitasyon olarak tanımlanan kabarcığın oluşumu ve patlaması 0,2 mili sn de gerçekleşir ve kabarcıkların patlamasıyla yaklaşık olarak 5000 K sıcaklık ve 200 bar basınç meydana gelmektedir (Perinçek, 2006).

Bu kabarcıklar asimetric olarak patlar ve asimetric bir şekilde patlayan kabarcıklar katı yüzeyine doğru hareket ederek yaklaşık 400 km/saat hızda bir sıvı jeti oluşur. Bu sıvı jetine mikro jet ismi de verilmektedir (Suslick, 1989; Breitbach ve diğer., 2003). Şekil 2.1’de katı bir yüzeyde patlayan kavitasyon kabarcığının etrafındaki kuvvet dengesizliğinin görüntüsü üç boyutlu olarak çizilmiştir.



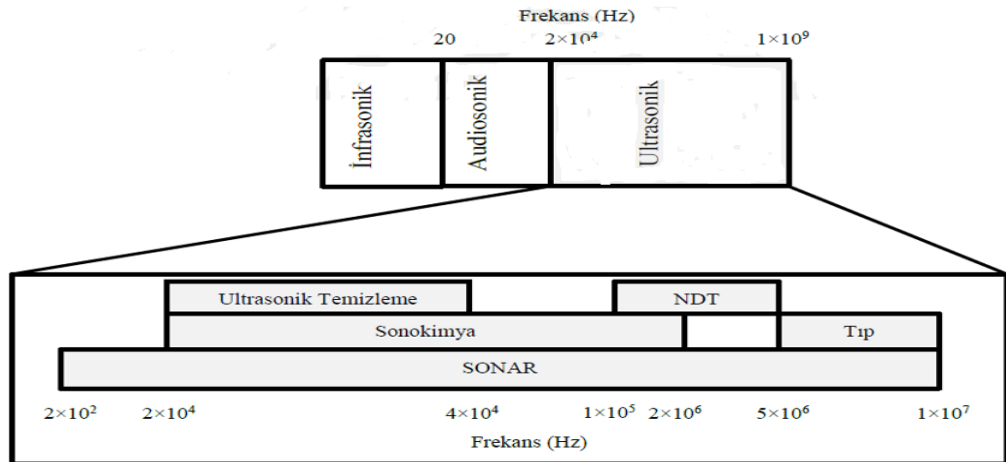
Şekil 2.1 Kavitasyon kabarcığının üç boyutlu gösterimi (Sulich, 1994)

Mikro jetler sayesinde, kavitasyonun sıcaklığı arttırması ve kütle taşınımı gibi mekanik etkileri gerçekleşir. Düşük frekanslarda mekanik etkiler gerçekleşirken, orta frekanslarda (200-400 kHz) ise kimyasal etkiler görülmektedir (Breitbach ve diğer. , 2003). Ayrıca oluşan sıvı jetleri katı yüzeyine çarptıkları zaman ve yüzeyi aşındırarak yeni yüzeyler oluşturur (Baig ve Varma, 2012). Kavitasyonun etkisi büyük boyutlardaki kabarcıklarda daha fazla iken küçük boyutlu kabarcıklarda daha azdır. Çünkü kavitasyon kabarcığının içerisinde olan enerji kabarcığın büyüklüğüyle orantılıdır (Breitbach ve diğer., 2003).

Patlayan bir kavitasyon kabarcığı çeşitli sıvılarda, moleküllerin yüksek enerji düzeylerini daha da arttırabilir. Birbiriyle karışmayan iki sıvının (yağ ve su gibi) Ultrason enerjisi verildiğinde emülsifikasyon oluşabilir ve sıvı diğerinde mikroskopik damlacıklar halinde dağılabilir. Ultrason enerjisinin basınç ve gevşeme etkisi, damlaları bir arada tutan kohezyon kuvvetlerini kırar. Böylece büyük olan damlalar bölünerek daha küçük damlacıkların oluşmasına sebep olur ve yüzey alanları artan sıvıların kimyasal reaksiyon hızları artmış olur (Suslick, 1989).

2.1 Ultrases Spektrumu

Ses katı, sıvı ve gaz ortamlarında meydana gelen titreşim hareketleridir. Boşlukta ve maddesel olmayan ortamlarda ses veya ultra-ses oluşmamaktadır. İnsanlar tarafından duyulamayan seslere ultra-ses olarak adlandırılmaktadır. Ses frekans-dalga diyagramı Şekil 2.2’de verilmiştir (Mason ve Lorimer, 2002; Ensminger ve Bond, 2012).



Şekil 2.2 Ultrasonik enerjinin uygulama alanları

Ultrasonik enerji 2×10^2 ile 1×10^7 Hz frekans aralığında oluşmaktadır. Bu enerji türü maddesel ortamda titreşim hareketi şeklinde başlayan ve yayılan mekanik bir enerji türüdür. Ultrasonik enerji moleküllerin mekanik titreşimiyle yayıldığı için havasız ortamda ve boşlukta ilerleyemez. Ultrasonik enerji maddeyi oluşturan atom ve moleküllerin dengede iken titreşim şeklinde meydana geldiği için katı, sıvı ve gaz ortamlarında yayılabilirler (Raman ve Abbas, 2008).

2.2 Ultrasonik Enerjinin Üretilmesi

2.2.1 Ultrasesin Üretildiği kaynaklar

Ses, titreşim hareketiyle oluşan mekanik bir enerjidir. Ses oluşması için bir telin, bir zarın ya da maddeyi oluşturan moleküllerin titreşimini sağlamak yeterlidir. Ultrasonik enerjiyi meydana getirme sırasında taşlama, fırçalama, tornalama gibi fiziksel olaylar işitilebilir. Ultrasonik enerji üretmek için kullanılan başlıca araçlar; sirenler, kornalar, piezoelektrik titreştiriciler, mekanik titreştiriciler, manyetostriktif titreştiriciler ve elektrostriktif titreştiriciler şeklinde sıralanabilir (Mason, 1990).

2.2.1.1 Ark ile üretim

Ark üstüne hava bulunan tüp konulduğunda tüpün içindeki havayla meydana gelen ses dalgalarıdır. Güçlü elektrik akımlarıyla stabil arklar oluşturulduğu takdirde böbrek taşları kırılabilir (Mason, 1990).

2.2.1.2 Kornalar ile üretim

Bir delik ya da kenardan sıvı yada gazın geçirilmesiyle oluşan cihazlar kornalardır. Ses titreşimi periyodik olarak girdaplar halinde yayılır ve ses meydana gelir (Mason, 1990).

2.2.1.3 Sirenler ile üretim

Yüksek basınç ve dalga üretimi için hava veya gaz ortamı yeterli değildir. Bunun için geliştirilen en iyi üreteçler sirenlerdir. Sirenler, 300-1200 W'luk güce sahip bir motor ve bu motora bağlı yaklaşık 133 devir/dk ile dönen rotordan oluşan bir sistemdir. Sirenler ile 3-30 kHz frekans aralığında ultrasonik enerji elde edilebilir. (Mason, 1990).

2.2.1.4 Mekanik Titreştiriciler ile üretim

Ultrasesin mekanik olarak sağlanmasıyla yaklaşık, 10 kHz'lik bir enerji üretilebilir. Değişik özelliklerdeki şaftlar kullanılarak daha düşük frekanslarda enerji üretilebilir (Onur, 2004).

2.2.1.5 Piezoelektrik Titreştiriciler ile üretim

Piezoelektrik titreştiriciler ile enerji üretimi 20 kHz ile 10 GHz'e kadar aralığı kapsamaktadır. Piezoelektrik olayı bazı mineral kristallerinin mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme olayıdır. Piezoelektrik titreştiriciler genel olarak kristal ve seramik piezoelektrikler şeklinde iki grupta toplanabilir (Fuchs, 2002).

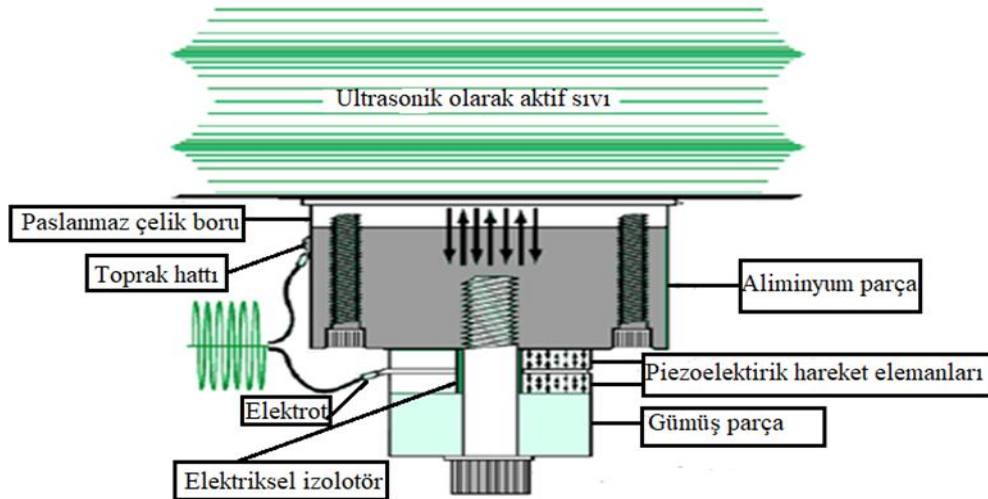
Kristal Piezoelektrik üreteçler; Kuvars belirli bir basınç işlemi uygulandığı zaman ekseninin bir ucu + diğer ucunda – olduğu görülmektedir. Doğada kolay bulunabilmesi açısından kuvars, piezoelektrikler işlem üretici olarak en çok kullanılan mineraldir. Kuvars mineraline polarizasyon akımının tersine bir akım verildiği takdirde kuvars kısalacak, fakat polarizasyon yönüne doğru bir akım uygulanırsa bu seferde kuvars uzayacaktır ve bu işlem periyodik şekilde devam ederek frekansa dönüşmüş olacaktır. Ancak bu olay için kuvars mineralinin iki yüzünün de altın, gümüş ve alüminyum gibi malzemelerle kaplanmasıyla olabilir (Fuchs, 2002).

Seramik Piezoelektrikler üreteçler; Saf kuvarsın ulaşılması zor olduğu durumlarda suni olarak üretilen seramik piezoelektrik kristaller kullanılır. Günümüzde piezoelektrik seramikler özellikle elektronik sanayinde kullanılmaktadırlar. Piezoelektrik seramik uygulamaları özellikle elektronikte algılayıcı, dönüştürücü ve

fiLre elemanı olarak kullanılmaktadır. Piezoelektrik malzemelerin başlıca özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir (Fuchs, 2002). Piezoelektrik özelliğe sahip olan kristalin, suyla dolu olan bir tankın yüzeyine nasıl yerleştirildiği Şekil 2.3’de görülmektedir (Bentley, 1983).

Tablo 2.1 Piezoelektrik malzemelerin özellikleri

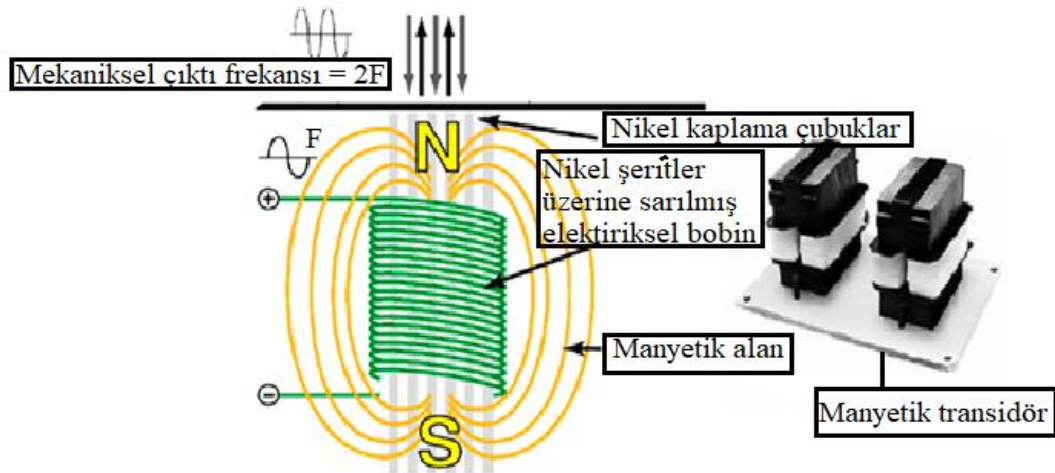
	Malzeme	Piezoelektrik modül Coulomb/Newton (metre/vol) 10^{-12}	Dielektrik sabit ϵ	Young modülü $E \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$
Doğal	Kuvars	2,3	4,5	80
Doğal	Turmalin	1,9 - 2,4	6,6	160
Seramik	Kurşun, Zirkonat Titanat	265	1500	79
Seramik	Kurşun, metaniobat	80	250	47



Şekil 2.3 Piezoelektrik kristalin tank yüzeyine montajı (Bentley, 1983)

2.2.1.6 Manyetostriktif Titreştiriciler ile üretim

Manyetostriktif problemlerin düşük maliyetli ve dış etkenlere karşı dayanıklı oluşundan dolayı denizaltı sonar sisteminde, betonun ve kayaların incelenmesinde ve düşük ultrasonik frekanslar gereken uygulamalarda manyetostriktif problemler kullanılabilir. 20-40 kHz frekanslara ulaşabilir ve hatta 100 kHz’e kadar bu yöntemle ultrasonik enerji üretilebilir. Bir ferromanyetik materyallerin manyetik alan içerisinde manyetostriksiyon Şekil 2.4’de verilmiştir (Bentley, 1983).



Şekil 2.4 Manyetostriksiyon ultrases vericisi

2.2.1.7 Elektrostriksiyon ile üretim

Elektrostriksiyon ile üretim piezoelektrik sahip maddelere belirli bir yönde elektrik akımına maruz bırakılırsa malzemede uzama kısalmaya meydana gelecektir. Bu uzama ve kısalmaya periyodik olarak devam eder ve frekans iki katına çıkarsa bu tür üreteçlere elektrostriksiyon üreteçler denir. Başlıca uygulandığı mineraller, titanat, baryum zirkonat ve kurşun şeklinde sıralamak mümkündür (Carlin, 1960).

2.3 Titreşim Üreteci Dizaynı

İlk başlarda üreteçlerin nikel çubukları ve boruları enerji verici bobinler olarak kullanılmaktaydı, fakat bu şekilde yapıldığında çok fazla kayıplar meydana gelmekteydi. Nikel boru üzerinde dikey delikler oluşturulması ve lamellerden meydana gelen yığın üreteçlerin kullanımıyla kayıplar azalmıştır (Carlin, 1960 Bentley, 1983)

2.4 Ultrases Dalgaları

Ses olayı bir zarın veya bir telin hava moleküllerinde meydana gelen titreşimlerle meydana gelmektedir. Ultrasonik enerji üretmek için, elektrik enerjisinin titreşim

hareketine dönüştürülmesiyle ancak mümkün olur. Düşük frekanslarda ultrasonik enerji üretmek için nikel alaşımları, kobalt ve çelik gibi malzemeler kullanılır. Ultrasonik enerjisi transducer diye adlandırılan cihazlar tarafından üretilmektedir. Bu cihazların en büyük özelliği bir enerji türünü diğer bir enerji türüne hızlıca çevirmesidir. Ultrasonik enerji üreten başlıca üç çeşit dönüştürücü kullanılır (Carlin, 1960).

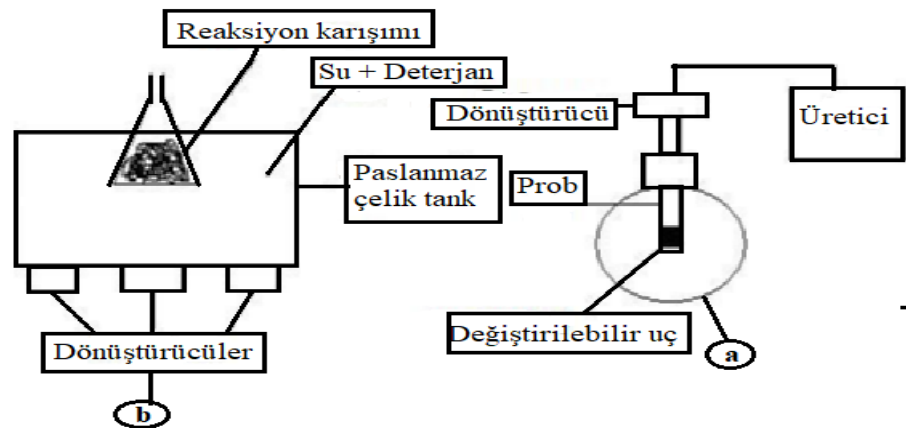
- sıvı-sürücü dönüştürücüler
- manyetik dönüştürücüler
- piezoelektrik dönüştürücüler

Ultrasonik enerji iki tür cihaz yardımıyla proseslere uygulanır;

Ultrasonik banyo

Ultrasonik prop

Ultrasonik banyolar, yüksek frekanslarda ultrasonik enerji üretebilen cihazlardır. Malzemenin banyo içindeki yeri malzemeye gelecek olan ultrasonik enerjinin şiddetini etkilemektedir. Ultrasonik probalar ise düşük frekansta Ultrasonik enerji üretmek için kullanılan cihazlardır. Malzemenin bulunduğu yer malzemeye etki eden ultrasonik enerjinin şiddetini etkilemez. Bir ultrasonik banyo ve bir ultrasonik prob Şekil 2.5 'de verilmiştir (Bentley, 1983; Masson, 1990).



Şekil 2.5 Ultrasonik banyo (a) ve ultrasonik prop (b) (Bentley, 1983; Masson, 1990)

2.5 Ultrasonik Enerjinin Etkileri

Ultrasonik enerji bir ses titreşimi olduğundan dolayı ilerlemek için maddesel bir ortam gereklidir. Katı ve gaz ortamlarda fazla bir etki göstermezken sıvı içerisinde ise çok büyük etkiler yaratabilir. Ultrasonik banyolar ve probalar bu etkiyi üreten iki cihazdır. Ultrasonik banyolar daha fazla kullanım alanı bulmasına rağmen bu banyolarda enerjinin uniform dağılmasındaki eksikliği ve enerji kayıplarının fazla olması gibi dezavantajları vardır. Ultrasonik probalar ise enerjiyi bir noktaya odaklayarak daha etkin bir kavitasyon sağlarlar (Ambedak diğer., 2012).

2.5.1 Doppler Etkisi

Ultrases titreşim hareketinin uzunluğu zamanla değişiyorsa ve bir mesafe boyunca iki transducer arasında yol alıyorsa bu etkiye doppler etki denir (Ambedak diğer., 2012).

2.5.2 Darbe Etkisi

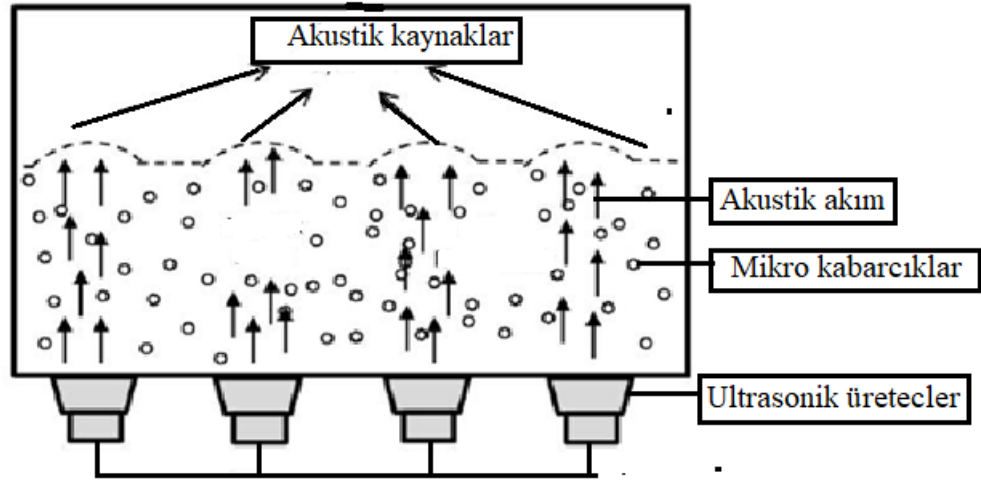
İki ultrases kaynağı birbirine doğru bir şekilde yerleştirilerek bir nokta üzerinde etki yaptırılabilirse bu etkiye darbe etkisi denir (Ambedak diğer., 2012).

Ultrason, katı ve gaz ortamlarda büyük bir etki göstermezken sıvı içerisinde başlıca iki olay yaratır. Bunlar;

1. Akustik akım
2. Akustik kavitasyondur (Ambedak diğer., 2012).

2.5.2.1 Akustik Akım

Akustik akım sıvı içinde ses dalgaları nedeniyle oluşan tek yönlü bir akışı ifade eder. Çoğunlukla yüksek frekanslarda (>100 kHz) etkilidir. Yüksek frekanslı Ultrasonik tankta oluşan tipik bir akustik akım Şekil 2.6'da görülmektedir (Ambedak diğer., 2012).



Şekil 2.6 Ultrasonik tank içinde oluşan akustik akımın şematik gösterimi (Ambedak diğer., 2012)

2.5.2.2 Kaviteasyon Etkisi

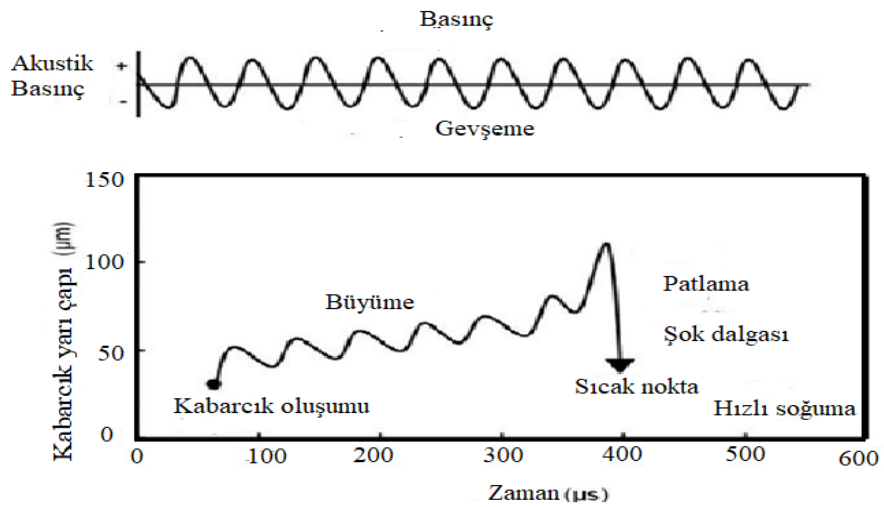
Kaviteasyon etkisi ultrasesin suyla muamelesi halinde gerçekleşebilir. Kaviteasyon kabarcıkları malzeme yüzeyinde çok hızlı bir şekilde patladıkları için kimyasal ve fiziksel etkiye neden olabilirler. Bu kaviteasyon kabarcıkları sıvı içerisinde basınç ve gevşeme şeklinde oluşan bir etkiyle ilerlemektedirler. Bu basınç dalgaları, sıvı içerisine moleküler etkileşimler sayesinde iletilen ileriye doğru vuruş şeklinde devam eder. 100 kHz'den daha düşük olan ultrason frekanslarındaki mekanizma kaviteasyondur (Ensminger ve Bond, 2012).

Kaviteasyon farklı yollarla gerçekleştirilmesinden dolayı üretim yöntemine göre değişik isimler alır:

1. Akustik Kaviteasyon: Kaviteasyon kabarcığının üretilmesi ultrason yayılımındaki basınç değişimleri ile sağlanır.
2. Hidrodinamik Kaviteasyon: Kaviteasyon kabarcığı bir akış sistemindeki geometrinin değiştirilmesi (kesit alanının küçülmesi) ile sağlanır.
3. Optik Kaviteasyon: Kaviteasyon yüksek şiddetli ışık (lazer) fotonlarının sıvı bağlarını kırması ile elde edilir.
4. Tanecik Kaviteasyonu: Kaviteasyon bir sıvının protonlar gibi tanecikler ile yüksek şiddette bombardımanı sonucu oluşturulur (Ensminger ve Bond, 2012).

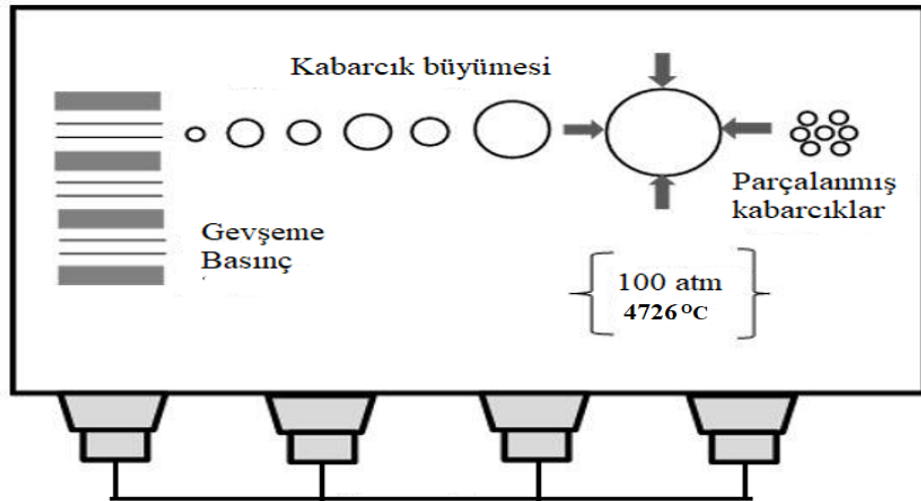
Yukarıda değinilen kavitasyon işlemlerinden sadece akustik kavitasyon ve hidrodinamik kavitasyonun ticari olarak kullanılabilme potansiyeli vardır sahiptir (Ensminger ve Bond, 2012). Ultrasonik enerji sıvı içerisinde de daralma ve gevşeme hareketi içeren dalga hareketleri şeklinde ilerler. Yeterince güçlü bir gevşeme için sıvı ortam moleküllerinin arasındaki çekim kuvvetlerini yenerek sıvının kopma mukavemetini aşması gerekir. Bu dalgaların yapmış olduğu basıncın büyüklüğü sıvının türüne, saflığına ve viskozitesine bağlıdır. Kavitasyon kabarcıklarının boyutu 100 μm civarındadır (Suslick, 1989) .

Kabarcık büyümesi sesin şiddetine bağlıdır. Eğer kabarcık büyümesi dalganın gevşeme evresinde çok hızlı olursa, kabarcık dalganın sıkışma evresinde küçülmek için yeterli zamanı bulamaz. Bu yüzden kabarcık hızlıca büyür ve patlar buna “geçici kavitasyon” adı verilir. Düşük enerjili ultrason verildiğinde kabarcık sıkışma ve gevşeme evreleri boyunca belirli bir boyutta kalır. Bu kabarcığın içine giren ve dışına çıkan gaz veya buhar miktarı kabarcığın yüzey alanına göre değişir. Eğer kabarcığın yüzey alanı gevşeme sırasında büyüyor, sıkışma evresi sırasında küçülüyor ise bu tür kavitasyona “kalıcı kavitasyon” adı verilir. Yüksek veya düşük ultrasonik şiddetlerde (geçici veya kalıcı kavitasyonda) kabarcık fazla büyüdüğü zaman daha uzun süre enerji absorplayamayacak duruma gelirse kabarcık patlamaktadır (Suslick, 1989; Ambekar diğer., 2012). Akustik kavitasyon kabarcığının oluşması, büyümesi ve patlaması evrelerinde kabarcık boyutunun zamana göre değişimi Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7 Akustik kavitasyon kabarcığının oluşması (Suslick, 1989)

Patlayan kavitasyon kabarcığının içindeki gazlar ve buharlar sıkışmış halde bulunur. Bu gaz ve buharın sıkışması ile yüksek miktarda ısı üretilir. Kavitasyon kabarcıkların sıkışma ve patlaması sırasında kabarcığın yakın çevresinde kısa süreli sıcaklık artışı meydana gelir. Kavitasyon sırasında oluşan sıcaklıkların fiziksel yöntemlerle ölçülmesinin zorluğu karşısında, teorik sıcaklıkların testsel yöntemlerle hesaplanabileceği gösterilmiştir. Bu yöntemle ultrasonik etki altında birkaç farklı reaksiyonun hızını ölçerek, kavitasyon sırasında oluşan sıcaklıkların yaklaşık 500 °C'ye, oluşan basınçların ise yaklaşık 100 atm'e ulaştığını hesaplamışlardır. Düşük frekanslı bir ultrasonik banyoda oluşan kavitasyon ile ortaya çıkan yüksek sıcaklık ve basınç değerleri Şekil 2.8'de şematize edilmiştir (Breitbach ve diğer., 2003; Ambedak diğer., 2012).



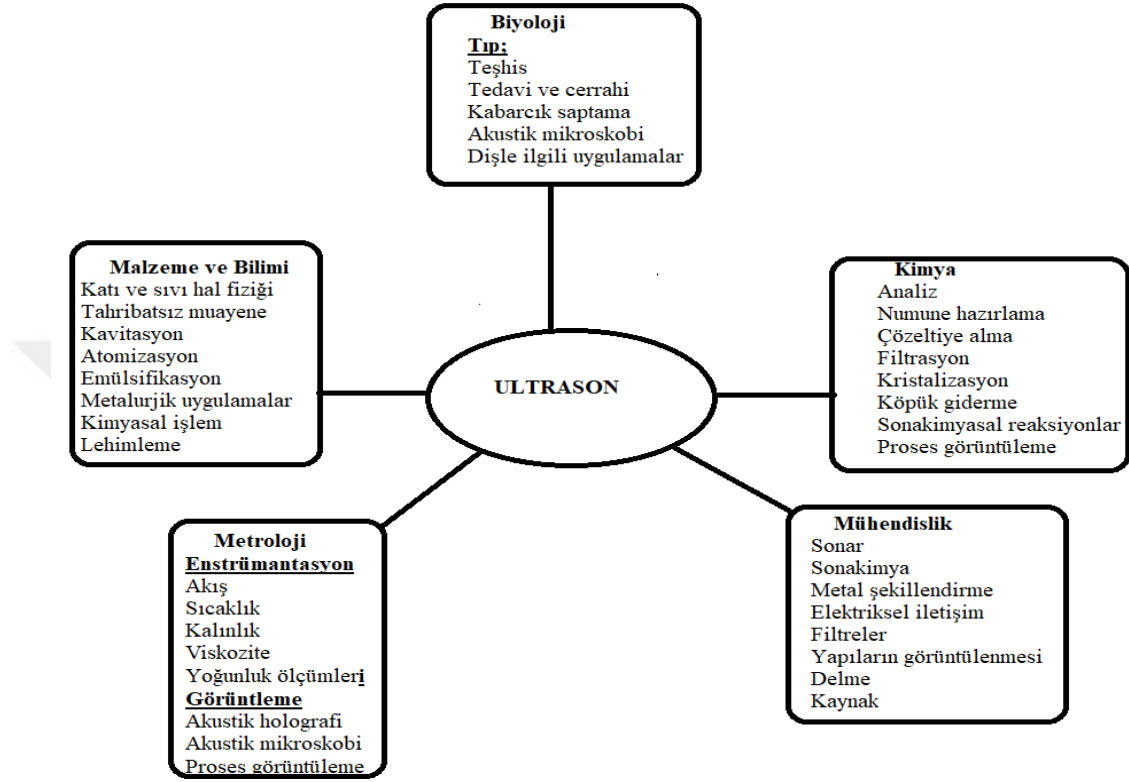
Şekil 2.8 Ultrasonik tank içindeki kavitasyonun şematik gösterimi (Ambedak diğer., 2012)

2.6 Ultrasesin Kullanıldığı Yerler

2.6.1 Cevher Hazırlama Dışındaki Uygulamaları

Ultrasonik enerji, endüstrinin birçok alanında çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. En çok sanayide ultrasonik enerji malzemelerin yüzeylerini temizlemek için kullanılan bir enerji türüdür. Ultrases olarak tanımlanan alan kendi içerisinde yüksek frekanslı 2-10 MHz ve düşük frekanslı 20-100 kHz olarak ikiye ayrılabilir. Ultrasonik enerjinin kullanıldığı belli başlı bilim dalları Şekil 2.9'de görüldüğü gibidir. Ultrases frekansına

göre ortaya çıkan çeşitli uygulamalar Tablo 2.2’de verilmiştir (Ensminger ve Bond, 2012).



Şekil 2.9 Ultrasonik enerjinin kullanıldığı belli başlı bilim dalları (Ensminger ve Bond, 2012)

Tablo 2.2 Ultrases frekansına göre ortaya çıkan çeşitli uygulamalar (Ensminger ve Bond, 2012)

Frekans (kHz)	Uygulama alanı
3-10	Gaz üretme, köpüklerin patlaması, delme, gazsızlaştırma
1-100	Metalurjik etkiler
20-100	Depolimerizasyon
20-40	Endüstriyel temizleme
100-500	Fotoemiyon ve emiyon
300	Fiziksel ve biyolojik etkiler
2000-2500	Halojen gümüş üzerine etkiler
1000000	Ulaşılabilir en yüksek frekans

2.6.2 Ultrasonun Cevher Hazırlamada Kullanımı

Ultrasonik temizlemenin diğer yüzey temizleme yöntemlerine göre avantajlarını yüksek temizleme oranı, işçiliğin ortadan kalkması, zararlı çözücülerin kullanımını önlemesi şeklinde sıralanabilir. Ultrasonik enerji uygulanan yüzey temizleme işlemlerinde kullanımının giderek artmasına yol açan en önemli etkinin kavitasyon ve akustik akış olduğu söylenebilir (Özkan, 1998).

Ultrason hakkında bilimsel ve endüstriyel çeşitli alanlarda yapılmış çok fazla çalışma mevcuttur. Ultrason enerjisi, cevher hazırlama endüstrisinde başta olmak üzere çeşitli etkilerinden faydalanmak amacıyla çok sayıda araştırmacı tarafından boyut küçültme, fiziksel, kimyasal ve fiziko-kimyasal zenginleştirme gibi endüstrisinin çeşitli aşamalarında kullanılmıştır (Mason, 2000; Mason, 2003; Gürpınar, 2007; Ensminger ve Bond, 2012; Güngören, 2016).

2.6.2.1 Ultrasonun Boyut Küçültme İşlemlerinde Kullanımı

Ultrasonik enerjinin yapmış olduğu kavitasyon malzeme üzerindeki ani değişimler, şok dalgaları ve mikrojetler vasıtasıyla kolay ufalanabilen cevherler üzerinde ufalanmaya sebep olmaktadır. Kavitasyon, tane yüzeylerinin aşınmasına, ince tanecikler oluşmasına, yüzeylerde çatlak oluşumuna, sonraki aşamalarda bu çatlakların genişleyip derinleşmesine ve böylece tane kırılmasına yol açar. Kullanılan ultrasonun frekansı tane boyut dağılımını etkilemektedir. Kavitasyon etkisinin düşük frekanslarda daha baskın olmasının bir sonucu olarak, düşük frekanslı ultrasonik dalgalar oluştuğunda tane boyut dağılımı, hızla daha küçük boyutlara yaklaşmaktadır (Ambedak ve diğer., 2011).

(Ambedak ve diğer., 2011) ultrasonik enerjinin kömür tane boyutuna etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, 20 kHz ultrasonik prob ve 25 kHz ultrasonik banyo kullanılmışlardır. Yapmış oldukları çalışmar sonucunda, kömür tane boyutunun çok kısa bir sürede ciddi şekilde düştüğünü bildirmiştir.

(Kang ve diğer., 2008) Kömür üzerinde yapmış oldukları çalışmada, ultrasonik enerjiyi işlem öncesi ve sonrasında kullandıklarında tane boyutunun düştüğü ve aynı zamanda kömür içindeki sülfür ve demirin azalabileceğini bildirmişlerdir.

Uygulamada 20 kHz frekansta ve 200 W gücünde ultrasonik cihaz kullanmışlardır. Bu çalışmada ultrasonik enerjinin kömürlerin boyutunu küçültmesinde büyük rol oynadığı belirlenmiştir.

(Raman ve Abbas, 2008) ultrasonik enerjiyi (24 kHz) alüminyum oksit ortalama 150 µm boyutunda değişik güç (150-350 W) ve sıcaklıklarda (10-50 °C) uygulayarak tane ufalanmasını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ultrasonik güç arttıkça boyut küçültmede aynı oranda artış olduğunu bildirmişlerdir.

(Donskoi, 2012) İnce demir cevheri içeren pülp'e ultrasonik enerji uygulanarak, manyetit veya hematit gibi minerallerinin daha düşük demir içerikli gang minerallerinden (kaolinit ve götit) parçalama ve dağıtma etkisiyle zenginleştirilebilmesini araştırmıştır. Araştırma sonucuna göre; ultrason gücünün ve pülp yoğunluğunun demir verim ve tenör üzerinde artış olduğunu bildirmişdir.

2.6.2.2 Ultrasonun Fiziksel Cevher Hazırlama Yöntemlerinde Kullanımı

Ultrasonun çöktürme, ağır ortam ayırması, katı-sıvı ayrımı, mekanik dağıtma ve yıkama gibi fiziksel özellik farkından yararlanılarak yapılan cevher zenginleştirme yöntemlerinde destekleyici olarak kullanılmaktadır (Güngören, 2016).

(Önal ve diğer., 2003) Ultrasonun kil çöktürme üzerinde değişik çökelme koşullarında kil sedimentasyonu belirlemek için normal ve ultrasonik ortamlarda laboratuvar şartlarında testler yapılmıştır. Ultrasonik uygulamalar 25 kHz frekansta 0,5 kW güçte ultrasonik banyo ile yapılmışlardır ve testlerde flokülant miktarlarını test etmişlerdir. Yapılan araştırmada doğal ortama kıyasla ultrasonik uygulamalar ile daha iyi sonuçlar alınmıştır. Ayrıca, ultrasonik uygulama reaktif dozajlarında ciddi azalmalar, çökelme sürelerinde büyük oranlarda düşüşlerin olduğunu bildirmişlerdir.

(Sönmez ve diğer., 2004) Ultrasonun bor cevherlerinin zenginleştirmesinde yapılan testlerde işlem süresi, pülp yoğunluğu, besleme miktarı ve tane boyutu parametreleri denenmiştir. Aynı numune kullanılarak mekanik aşınma ve yıkama testleri yapılarak geleneksel yöntem test sonuçları ile ultrasonik enerji kullanılarak yapılan testlerdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Testler sonucunda, ultrasonik uygulamanın daha iyi sonuç verdiği bildirilmiştir. -3 mm tane boyutunda, %24,17 tenörlü artıklardan mekanik yıkama ile %84,93 verim ve %33,01 tenörlü bir konsantre eldesi sağlanırken

ultrasonik enerjinin kullanıldığı testlerde ise konsantre tenörü %41,69 ve %97,01 verim ile konsantre edilebileceğini bildirmişlerdir. Çalışmalarda, 25-40 kHz frekansında ve 500 W gücünde bir ultrasonik banyo kullanılmıştır.

(Alp ve diğer., 2004) Bor cevheri olan tinkalin zenginleştirmesinde ultrasonik enerji kullanılmıştır. Çalışmada Ultrason 25 ve 35 kHz frekanslara sahip iki ultrasonik banyo kullanılmıştır. Numuneler testlerde belirli süre ultrasonik işleme mazruz bırakıldıktan sonra yıkanıp dekante edilerek ince kil malzemesi uzaklaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, %24,37 tenörlü tinkal konsantresinden ultrasonik uygulama sonucu %35,29 tenör ve %95,69 verimle bir ürünün kazanılabileceğini bildirmişlerdir.

(Kyllonen ve diğer., 2004) Ağır ortam ayırmasından önce ultrason kullanımını incelemiştir. Testlerde eski bir askeri atış bölgesinden alınan mermi parçaları kullanılmıştır. Metal uzaklaştırma işlemleri 22 kHz frekansa sahip bir ultrasonik masa kullanılmıştır. Ağır ortam ayırmasından sonra ürünlerin analizleri yapıldığında Ultrasonun temiz ürün eldesini kolaylaştırdığı tespit edilmiştir.

(Riera-Franco de Sarabia ve diğer., 2000) Kömür yakma hücresinden alınan μm boyutlarında ve μm altı taneler elektrostatik filtre ile ayrılmadan önce akustik olarak kondisyonlanmıştır. Ultrasonik uygulama 10-20 kHz frekanslarda yaklaşık 2 snboyunca uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde ultrason uygulamasının filtre keki katı konsantrasyonunu ciddi şekilde arttırdığı, güç artışının bir noktaya kadar katı konsantrasyonuna pozitif etkisi olduğu görülmüştür.

(Singh, 1999) Ultrasonik enerjinin ince kömür tanelerinde vakum filtrasyon ile nasıl bir etki yaptığını araştırmışlardır. Uygulamada 20 kHz frekansda ultrasonik cihaz kullanmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre; ultrasonik enerjinin hem susuzlandırmayı olumlu etkilediği hemde gerekli kimyasal miktarını azalttığını bildirmişlerdir.

2.6.2.3 Ultrasonun Kimyasal Cevher Hazırlama Yöntemlerinde Kullanımı

Cevher hazırlamada kimyasal zenginleştirme yöntemi liç ve elektroliz işlemlerini kapsamaktadır. Ultrasonik enerji hem liç işlemlerinde hem de elektroliz işlemlerinde bir destek sistemi olarak kullanılmıştır. Liç, çözünmeyi ve katı-sıvı arasındaki ekstraksiyon ilişkisini anlatan bir terimdir. Ultrasonik enerji liç işleminde verimi arttırmak ve süreyi kısaltmak amacıyla destekleyici bir ekipman olarak kullanılabilir.

Ultrason destekli yapılan liç, konvansiyonel liç ile karşılaştırıldığında daha hızlı ve daha verimlidir (Luque-García ve Luque de Castro, 2003).

Ultrasonik enerjiyle yapılan liç, geleneksel liçe benzer, fakat bazı ilave faktörler etkileşimi artırır;

1. Katı yüzeyini hedef alan yüksek hızlı mikrojetlerin taşınım hızını, yüzey alanını ve yüzey aşınmasını artırması
2. Tanecik parçalanmasının yüzey alanını artırması
3. Oluşan şok dalgalarının tanecikleri çatlatması ve böylece çözücü maddenin kapiller hareketle taneciğin iç taraflarına girebilmesi
4. Akustik akımın katı yüzeyindeki difüzyon tabakasını bozması (Mason ve diğer. , 2004).

Ultrasonik enerjinin liçe etkisi üzerine birçok çalışma yapılmıştır;

(Wang ve diğer., 2013) yapmış oldukları çalışmada, Fe ve Pb gibi metal barındıran %12,31 Zn içerikli çinko artığını sülfürik asit liçi yapmışlardır. Bu yapılan liç işleminde liç sıcaklığı, sülfürik asit konsantrasyonu ve tane boyutu gibi değişkenlerin etkilerini Ultrasonic enerji varlığında ve yokluğunda testler yaparak araştırmışlardır. Testlerde 20 kHz frekansında, 80, 160 ve 240 W güç ile ultrasonik dalgalar üreten ultrasonik cihaz kullanılmıştır. Ultrasonik enerji uygulandığında verimin yaklaşık %80'e kadar arttığını bildirmişlerdir.

(Farmer ve diğer., 2000) yapmış oldukları çalışmada, %0,025-0,30 FeO içeren silika kumuna, seyreltik sülfürik asit, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat çözeltilerinde hem geleneksel yöntem hemde ön işlem olarak ultrasonik işleme uygulayarak kil ve demir oksidi uzaklaştırmaya çalışmışlardır. Araştırmalardan elde edilen sonuca göre, ultrasonik enerji kullanıldığında daha düşük demir içerikli ürünler elde edilebileceğini bildirmişlerdir .

(Du ve diğer., 2011) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonun sulu oksalik asit çözeltisi ile silis kumundan demir uzaklaştırması üzerine araştırma işlemi yapmışlardır. Testlerde 20 kHz frekansında ve 0-300 W gücünde bir ultrasonik prob kullanılmıştır. İncelenen parametreler reaksiyon sıcaklığı, karıştırma hızı, ultrason gücü, asit konsantrasyonu ve reaksiyon süresidir. Sonuç olarak; ultrasonik

uygulamanın konvansiyonel liçe kıyasla %16,3 daha fazla demir uzaklaştırma verimini arttırdığını, asit konsantrasyonunu düşürdüğünü bildirmişlerdir.

(Zhang ve diğer., 2008) tarafından maden artığındaki bakırın amonyum liçi ile kazanımına Ultrasonun etkisi araştırılmıştır. Testlerde 40 kHz, 200 W güçte ultrasonik üreteç kullanılmıştır. Çözelti her 48 satte bir kontrol edilmiş ve azalan miktarı telafi etmek için amonyak eklenmiştir. Test sonuçlarında ultrason yokluğunda iki hafta sonra artıktaki bakırın %76'sı kazanılmıştır. Ultrasonik destekli testte ise kazanım %89,5 olmuştur.

(Öncel ve diğer., 2005) Siyanür liçi tesis artığından, 20 kHz ve 0-200 W güçte ultrasonik enerji kullanarak gümüş kazanma imkânını araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar, ultrason destekli tiyoüre liçi ile gümüşün 77 °C sıcaklıkta verimi %98,6 ile tamamına yakınının kazanıldığını göstermiştir.

(Sayan ve Bayramoğlu, 2004) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonik enerji TiO_2 'nin sülfürik asit ile liçini araştırmışlardır. Araştırmada, ultrasonik güç, sıcaklık, liç süresi, asit konsantrasyonu ve katı oranları denenmiştir. Çalışmalarında 20 kHz ve 0-200 W güçte bir ultrasonik enerji kullanmışlardır. TiO_2 liçini etkileyen ana faktörün asit konsantrasyonu ve sıcaklık olduğu, ultrason enerjisi kullanımıyla TiO_2 veriminin %20 arttığını belirtmişlerdir.

(Xue ve diğer., 2010) yapmış oldukları çalışmada, nikel cevheri ultrasonik banyonun içine nikel süzme hızları, $Na_2S_2O_8$ konsantrasyonu, sıvı-katı oranı ve $AgNO_3$ konsantrasyonu gibi farklı faktörlerin etkisi ultrasonik banyo kullanarak araştırılmıştır. Sonuçlara göre, ultrasonik uygulama altındaki nikel liçinin konvansiyonel liçe kıyasla yaklaşık %7 daha verimli olduğunu belirtmişlerdir.

(Bese, 2007) yapmış olduğu çalışmada, ultrason varlığında ve yokluğunda cüruftan ferrik sülfat ile bakır kazanımına etkisini araştırmıştır. Taguchi yöntemi kullanılarak incelenen parametreler, reaksiyon sıcaklığı, asit konsantrasyonu, ferrik sülfat konsantrasyonu ve reaksiyon süresidir. Çalışmalarında 20 kHz ve 400 W güçte bir Ultrasonik enerji probu kullanmışlardır. Ultrason uygulaması olmadan verimler (bakır, çinko, kobalt ve demir için sırasıyla %80,41, %48,28, %64,52 ve %12,16 iken, Ultrasonik uygulama altında verimlerin artarak sırasıyla %89,28, %51,32, %69,87 ve %13,7 şeklinde olduğunu bildirmiştir.

(Saterlay ve diğer., 2000) yapmış oldukları çalışmada, ultrason varlığında ve yokluğunda toz karbon numunelerini kullanarak liç çalışmışlardır. Çalışmalarında 20 kHz frekansa sahip bir ultrasonik enerji probu ve -1 mm tane boyutunda numune kullanmışlardır. Ultrasonik enerji araştırmalar sonucunda geleneksel olarak yapılan deneylerde 24 saatte ulaşılan sonuçlara, ultrasonik enerji kullanarak 1 saatten daha kısa bir sürede yapılabildiğini belirtmiştir.

(Xie ve diğer., 2009) yapmış oldukları çalışmada, elektronik devre kartı (PCB) artıklarından ultrason varlığında ve yokluğunda asit liçi yapılarak bakır ve demirin geri kazanımı araştırılmıştır. Ultrasonik enerji sistemi için çeperlerine 3 ultrasonik üreteç kullanılarak yapılan testler, 1 L lik titanyum tankta gerçekleştirilmiştir. Tüm üreteçler 80, 160 ve 240 W güçte 20 kHz frekansla ultrasonik dalgalar üreten jeneratöre bağlanmıştır. Araştırılma sonuçlarına göre; ultrasonik enerji varlığında yapılan asit liçinin, geleneksel liçe kıyasla daha yüksek ayırma verimiyle tamamına yakınının kazanılabileceğini bildirmişlerdir.

(Avvaru ve diğer., 2008) yapmış oldukları çalışmada, uranyum cevherine nitrik asit ve sülfürik asit ile liçi yapılarak ultrasonun etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında 20 kHz frekansa sahip bir ultrasonik enerji banyosu kullanmışlardır. Çalışmada ultrason kullanıldığında hem liç hızı artmıştır hem de liç veriminin yaklaşık %10 arttığını belirtmişlerdir. Ultrasonik enerji varlığında sülfürik asidin nitrik asite göre daha etkili olduğunu bildirmişlerdir.

(Swamy ve diğer., 2005) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonik enerji nikel cevheri kullanarak biyoliç işlemlerinde kullanım olanaklarını araştırmıştır. Çalışmalarında 20, 43 ve 72 kHz bir ultrasonik enerji banyosu kullanmışlardır. Sonuç olarak; ultrasonik enerji kullanılarak mikroorganizmaların büyümesine ve çoğalmasına yardım ettiği, metal reaksiyon hızını arttırdığı, metal kazanma verimini arttırdığını belirtmişlerdir. Ancak bunun yanında ultrasonik şiddet iyi ayarlanmassa mikroorganizmaların bir bölümünün ya da tamamının ölebileceğini bildirmişlerdir.

(Zhang ve diğer., 2012) yapmış oldukları çalışmada, yüksek kükürtlü kömür numuneleri kullanılmıştır. Kükürt uzaklaştırmak için flotasyona destekleyici olarak sonoelektroliz (kalsiyum hidroksit ve susuz etanol) yöntemini kullanmışlar ve süreye bağlı olarak araştırmışlardır. Araştırmada sırasıyla susuz etanol konsantrasyonu, sonoelektrolitik zaman, akım yoğunluğu ve ultrason yoğunluğu için araştırmalar

yapılmıştır. Çalışmalarında 59 kHz frekans sahip bir ultrasonik cihaz kullanmışlardır. Araştırma sonucunda, yüksek kükürtlü kömürün sono-elektrokimya ile kükürt'ün %87 ve kül'ün %68 oranında kömürden uzaklaşabileceğini bildirmişlerdir.

(Jiang ve diğer., 2018) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonun kobalt ve lityumun liç verimliliği üzerindeki etkilerini geleneksel liç ve ultrason destekli liç kullanarak karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada sülfürik asit ve hidrojen peroksit çözücü olarak kullanılmıştır. Çalışmalarında 20 kHz frekansa sahip bir ultrasonik cihaz kullanmışlardır. Liç süresinin, sızdırma sıcaklığının, H_2SO_4 konsantrasyonunun, H_2O_2 konsantrasyonunun, katı/sıvı oranının ve ultrasonik gücün etkileri incelenmiştir. Ultrasonik enerjinin kullanıldığı şartlarda kobalt için %94.63 ve lityum için %98.62'lik bir liç verimliliği elde edilebileceğini bildirmişlerdir.

(Zang ve diğer., 2015) yapmış oldukları çalışmada, kurşun ve antimuan bakımından zengin oksitleyici cüruf, testsel koşullar optimize edildikten sonra HCl-NaCl liçine ek olarak ultrasonik enerji uygulanarak sonuçlar karşılaştırmışlar. Çalışmalarında 20-25 kHz bir Ultrasonik enerji probu kullanmışlardır. Parçacık boyutunun küçülmesiyle, Sb ve Pb'nin liç oranı kademeli olarak artmıştır. Ultrasonik enerji, Sb ve Pb'nin liç oranlarını önemli ölçüde arttırmış ve liç süresini kısalttığı belirlenmiştir. Sıcaklık, Ultrasonik süzdürme performansı üzerinde büyük bir etki sergilemiştir. Sıcaklığın 85° C'nin üzerinde olması durumunda, Sb ve Pb için sızdırma hızlarının artan hızı yavaşlatma eğilimi göstermiştir. Ultrasonik enerji kullanıldığında her iki mineralin de verimleri %10 artarak yaklaşık %85 oranına yükselebileceğini bildirmişlerdir.

(Li ve diğer., 2018) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonik destekli yeni bir yüksek saflıkta nikel sülfat liç hazırlama yöntemi çalışılmıştır. Çalışmalarında 28 kHz bir ultrasonik enerji probu kullanmışlardır. Liç maddesinin konsantrasyonu, reaksiyon sıcaklığı, ultrasonik güç, süzdürme süresi gibi geleneksel parametreler belirlendikten sonra ultrasonik enerjiyle verim arttırılmaya çalışılmıştır. Yaklaşık 5 saat süren geleneksel süzdürme ile nikelin verimi %46,29 iken ultrason varlığında bu oran %60,41'e çıkmıştır.

2.6.2.4 Ultrasonun Fiziko-Kimyasal Cevher Hazırlama Yöntemlerinde Kullanımı

Fiziko-kimyasal cevher zenginleştirme yöntemlerinin başında flotasyon gelmektedir. Flotasyon, minerallerin yüzey/arayüzey özelliklerinden yararlanılarak, değerli mineral ile değersiz mineralin birbirinden ayrıldığı ve çeşitli reaktiflerin de kullanıldığı bir cevher zenginleştirme yöntemidir. Flotasyonda, öğütme işlemi yapılarak serbest hale getirelen cevher içerisinde bulunan mineraller çeşitli reaktifler kullanılarak hedef mineralin yüzeyi susevmez hale getirildikten sonra geriye kalan mineraller ise su sevmez hidrofilik (susever) hale getirilir. Böylece cevherin oluşturan değerli ve değersiz mineralleri arasında bir yüzey yük farkı oluşturulur. Daha sonra flotasyon selülündeki hava kabarcıklarına yapışan mineraller köpük bölgesine yükselirler ve taşarak konsantreyi oluştururlar (Atak 1982; Cilek, 2006). Flotasyon katı, sıvı ve hava fazlarının bir arada bulunduğu ve aynı anda etkileşimde olduğu kompleks bir sistemdir. Flotasyon sonuçlarını malzeme, kimyasal, işletme ve donanım kaynaklı gibi çok çeşitli parametreler etkilerler (Polat ve diğer., 2003).

(Kang ve diğer., 2008) yapmış oldukları çalışmada, yüksek kükürtlü kömürün ultrasonik kondisyonlamadan önce ve sonraki değişimlerini belirtmek amacıyla bu araştırmayı yapmışlardır. Ultrasonik işlem uygulamalarında 200 W gücünde, 20 kHz frekansında bir ultrasonik prob kullanmışlardır. Ultrasonik şartlandırmanın kömürdeki demir ve kükürt içeriğinde bir azalmaya, karbon elementi içeriğinde bir artışa ve kömürün saflığında bir artışa neden olduğunu göstermişlerdir. Sonuç olarak bu çalışmada, ultrasonik koşullandırma ile hem flotasyon süresinin kısalmabileceğini hem de 2,5 dk da %98 verim ile kazanılabileceğini bildirmişlerdir. Ayrıca piritik kükürtün büyük bir oranda giderilebildiğini bildirmişlerdir.

(Altun ve diğer., 2009) Şeyl üzerinde yapılan bu çalışmada ultrasonun değişik güç ve sürelerde kullanımıyla flotasyona destek bir ekipman olarak etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında 250 W gücünde bir ultrasonik prob kullanılmıştır. İlk olarak %20'den %100'e kadar %10'luk artışlarla ultrason gücü denenmiştir. Ultrasonik uygulamanın kül mikrarını iyileştirmede yararlı olduğu kanıtlanmıştır. Ultrasonik işlemten sonra Himmetoğlu petrol şistinin kül içeriği %34,76'dan %11,82'ye düşmüştür.

(Çelik, 1988) Ultrasonik ön işlemin kömür ve galenin yüzebilirliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yüzdürme işleminden önce oksitleyici ve indirgeyici maddelerle işlenmiş kömürün sonikasyonunun hidrofobikliğini tamamen geri kazandığı bulunmuştur. Uygun koşullar altında ultrasonik uygulamanın galen/ksantat sisteminde kolektör tüketiminde en az %50 azalma sağlayabildiğini göstermiştir.

(Zhao ve diğer., 2007) yapmış oldukları çalışmada, cam yapımı için silika kum içindeki demir cevherlerini güçlü ultrasonik enerji kullanarak uzaklaştırma olasılığını araştırmışlardır. Ultrasonik işlem uygulamalarında 250 W gücünde ve 25 kHz frekansında bir ultrasonik prob kullanmışlardır. Araştırmalarda ,%0,18 Fe₂O₃ içeren silika kumunu ultrasonik enerji kullanarak %0,11'e düşürülebildiğini bildirmişlerdir. Geleneksel yönteme göre verimde yaklaşık %7 bir artış olduğunu bildirmişlerdir.

(Feng ve Aldrich, 2004) yapmış oldukları çalışmada, flotasyon sırasında ultrasonik işlemle talkın doğal hidrofobikliğin azaldığı tespit edilmiştir. Talk verimi, 4 dk ultrasonik ön koşullandırmadan sonra yaklaşık %30 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Talk yüzeylerinde hidrofilik magnezyum ve silikon hidroksil türlerinin artmış oluşu, ultrason varlığında da talkın doğal hidrofobikliğini hafifçe etkilediğini bildirmişlerdir.

(Fang ve diğer., 2020) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonik ön koşullandırmadan sonra ilmenitin gang minerallerinden seçici olarak ayrılması yüzey çözünmesi açısından incelenmiştir. Ön koşullandırmadan sonra ilmenit daha iyi yüzdürme kapasitesi sergilerken, titanugit ve olivin daha düşük verimlere sahiptir. Önceden koşullandırılmış titanaugit ve olivinin zeta potansiyelleri, sırasıyla ham titanaugite ve sodyum oleat ile muamele edilmiş olivine kıyasla pozitif yönde kaymıştır. Ultrasonik işlem uygulamalarında 500 W gücünde, 20 kHz frekansında bir ultrasonik prob kullanmışlardır. Flotasyon veriminin geleneksel yönteme göre yaklaşık %70 den %84'e çıktığını bildirmişlerdir.

(Özkan ve Kuyumcu, 2006) yapmış oldukları çalışmada, geleneksel yöntemlere göre kömür flotasyonunda ultrasonik enerjiyi kullanarak yanabilir verimi artırmayı ve kül içeriğini düşürmeyi amaçlamışlardır. Ultrasonik işlem uygulamalarında 600 W gücünde, 20-40 kHz frekansında bir ultrasonik prob kullanmışlardır. Sonuçlara göre, ultrasonik kömür flotasyonunun benzer reaktif dozajları kullanılarak geleneksel flotasyona göre konsantrelerde daha fazla yanabilir verim ve daha düşük kül içerikli kömürler elde edilmiştir.

(Şahinoğlu ve Uslu, 2013) yapmış oldukları çalışmada, okside olmuş ve yüksek kükürtlü ince kömür, ultrasonik işlemde sonra yağ aglomerasyon sürecine tabi tutulmuştur. Ultrasonik işlem uygulamalarında 750 W gücünde, 20 kHz frekansında bir Ultrasonik prob kullanmışlardır. Ultrasonik uygulama olmaksızın aglomerasyon işleminin yanabilir verim %63,78, kül uzaklaştırma %75,19 ve pirit kükürt uzaklaştırmada %92,64 iken ultrasonik enerji uygulandığında yanabilir verim % 66, kül uzaklaştırma %87 ve pirit kükürt uzaklaştırmada %97 olarak bulduklarını bildirmişlerdir.

(Videla ve diğer., 2016) bakır atıklarının geri kazanımı ile ilgili yaptıkları çalışmalarında, ultrason enerjisinin etkisini, flotasyon öncesi ve flotasyon sırasında ultrason uygulandığında verim ve tenördeki etkisini araştırmışlardır. Ultrasonik işlem uygulamalarında 750 W gücünde, 20 kHz frekansında bir ultrasonik prob kullanmışlardır. Çalışma sonunda verimde %3,5 bir iyileşme sağladığını ve tenörde ise %0,60 Cu'dan %0,77 Cu'ya kadar çıkarılabildiğini bildirmişlerdir.

(Cao ve diğer., 2017) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonik enerji oksitlenmiş piritin hidrofobikliği ve oksitlenmiş pirit cevherinin flotasyon üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ultrasonik işlem uygulamalarında 100 W gücünde, 28 kHz frekansında bir ultrasonik prob kullanmışlardır. Yapılan araştırma sonucunda ultrasonik enerjinin pirit yüzeyindeki oksit tabakasını temizlediği ve buna bağlı olarak flotasyon veriminin geleneksel yöntemle göre %78 den % 89'a çıktığını belirlenmiştir.

(Güngören ve diğer. 2017) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonun kuvars-amin flotasyonunun flotasyon verim üzerindeki etkisi sıcaklık etkisi açısından incelenmiştir. Bu amaçla, dodesilamin hidroklorür (DAH) varlığında kuvars yüzeylerinin koşullandırılması için ultrasonik bir prob kullanılmış ve sıcaklıktaki değişim incelenmiştir. Ultrasonik işlem uygulamalarında 30-90-150 W gücünde, 20 kHz frekansında bir ultrasonik prob kullanmışlardır. 30 ve 90 W ultrasonik güçlerde Ultrason kullanımı flotasyon verimini %45'ten sırasıyla %64 ve %66'ya çıkarmıştır. Araştırma sonuçlarına göre belirli ultrasonik güç ve sıcaklığa kadar verim artarken sonra azalmaya başladığını bildirmişlerdir.

(Güngören ve diğer., 2019) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonun kuvars-amin flotasyon sistemine etkisi, parçacık boyutu, şekil faktörü ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Ultrasonik işlem uygulamalarında

30 W gücünde, 20 kHz frekansında bir ultrasonik cihaz kullanmışlardır. Sonuç olarak, mikro-flotasyon verimi, kondisyonlama sırasında 30W ultrasonik uygulama ile % 45,45'ten % 63,64'e yükseldiği bulundu. ultrasonun parçacık boyutu, parçacık şekli ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde bir miktar etkisi olduğunu gösterdi. Bu bilgiler ışığında, ultrasonun kollektör olarak amin ile kuvars flotasyonu üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu bildirmişlerdir.

(Çelik ve diğer., 2002) yapmış oldukları çalışmada, kolemanitde bulunan kil minerallerini kondisyonlama sırasında ultrasonik enerji kullanarak uzaklaştırmayı amaçlamıştır. Araştırmışlarda ultrasonik banyo kullanılarak testler yapılmıştır. Ultrasonik enerji uygulanmayan numuneyle yapılan flotasyon verimi %5 iken, Ultrasonik enerji uygulamanın ardından verim %90'a yaklaşmıştır.

(Qi ve Aldrich, 2002) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonik enerjinin çinko hidroksit çökmesi üzerindeki etkisi ve çözünmüş hava flotasyonu kullanılarak çinko hidroksit ve alçı çökeltilerinin ayrılmasını araştırmışlardır. Ultrasonik işlem uygulamalarında 30 kHz frekansında bir ultrasonik enerji cihazı kullanmışlardır. Ultrasonik enerjiin hem çinko hidroksit taneciklerini floküle ettiğini hem de çinko hidroksiti alçı taneciklerinin yüzeyinden uzaklaştırdığını bildirmişlerdir. Bu araştırma sonucunda ultrasonik uygulamanın ardından verimin yaklaşık %90'a çıkabileceğini bildirmişlerdir.

(Aldrich ve Feng, 1999) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonik enerjisi sülfürlü cevherin kondisyonlama öncesinde ultrasonik enerji uygulanarak etkisini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda, ultrasonik enerjinin, flotasyon tenörünü ve verimini arttırdığı ve reaktif sarfiyatını ciddi oranda azalttığı tespit edilmiştir. Ultrasonik işlem uygulamalarında 20 kHz frekansında bir ultrasonik cihaz kullanmışlardır. Ultrasonik uygulanmadan önce flotasyon verimi %75 iken, ultrasonik enerji uygulama sonrasında verim %92'a yaklaşmıştır.

(Ghadyani, 2017) yapmış olduğu çalışmada, yüksek küllü kömürler için flotasyon öncesi Ultrasonik enerji uygulayarak, sonuçları geleneksel yöntemlerle karşılaştırmışlardır. İran'ın Yazd ilinde bulunan Tabaş kömürü % 50,29 kül ve % 1,10 kükürt içeren numune üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Ultrasonik işlem uygulamalarında 700 W gücünde ve 40 kHz frekansında bir ultrasonik prob kullanmışlardır. Ultrasonik uygulama sonucunda % 56,9 yanabilir verim ve % 9,21

kül içeriğine sahip kömür elde edilmiştir. Konvansiyonel koşullandırmaya kıyasla kömür flotasyonunun ortalama %10 daha hızlı olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan bu araştırma sonucunda ultrasonik enerjinin geleneksel yöntemle göre kömürün yanabilir verimini arttırdığı ve kül içeriğini düşürdüğü tespit edilmiştir.

(Özkan, 2012) yapmış olduğu bu çalışmada, daha yanıcı ve kaliteli ürünlerin kazanılması amacıyla eş zamanlı ultrasonik işlemin orijinal ve yaşlı taş kömürü şamlarının flotasyonu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ultrasonik işlem uygulamalarında 300 W gücünde ve 40 kHz frekansında bir ultrasonik prob kullanmışlardır. Orijinal ve yaşlı kömür şamlarının konvansiyonel ve ultrason destekli flotasyon testleri, özel bir kömür flotasyon reaktifi olan Montanol-531 kullanılarak değişken dozajlarda gerçekleştirilmiştir. Flotasyon testlerinin sonuçları, benzer reaktif dozajları kullanılmasına rağmen, eş zamanlı ultrasonik muamelenin geleneksel yüzdürme koşullarına kıyasla yanabilir verimi %5 arttırdığını ve konsantrelerin kül değerlerini %8 düşürdüğünü ortaya koymuştur. Ultrasonik enerji uygulanarak %15 kül içerikli bir kömür %85 yanabilir verim ile kazanılabileceğini bildirmişlerdir.

(Güngören ve diğer., 2016) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonik enerjinin etkisini mineral yüzey özelliklerine, mineral-kimyasal adsorbsiyonuna ve mineral-kabarcık etkileşimlerine etkisi klasik kuvars-amin flotasyonu, mikro-flotasyon, ultrasonik etki altında sıcaklık ve pH ölçümleri, sıcaklık kontrollü mikro-flotasyon testleri ile ortaya koymaya çalışmışlardır. Ultrasonik işlem uygulamalarında 30-150 W gücünde ve 20 kHz frekansında bir ultrasonik prob kullanmışlardır. Sonuç olarak, ultrasonik uygulama ile klasik flotasyon veriminin %46,98'den %70,20'ye, mikro-flotasyon veriminin %45,45'ten %63,64'e, temas açısının 52°'den, 62°'ye çıktığı, tane-kabarcık yapışma süresinin ise 75 ms'den 50 ms'ye düştüğünü bildirmiştir.

(Özkan, 2002) yapmış oldukları çalışmada, 38 µm manyezit şamlarına flotasyondan öncesinde ve boyunca ultrasonik enerji uygulanarak flotasyon verimlerini araştırmıştır. Geleneksel flotasyon yöntemiyle ultrosonik enerjinin uygulama yöntemi karşılaştırıldığında köpük boyutlarının küçüldüğü, köpük stabilitesinin ve flotasyon süresinin arttığı belirtilmiştir. Sonuç olarak konvansiyonel flotasyonda verim %67,56 iken ultrasonik enerjiyi eş zamanlı uygulama ile %77,44, ultrasonik ön işlem olarak uygulandığında %80,83 olarak bulunmuştur. Ayrıca,

araştırmacılar ultrasonik ön işlemin eş zamanlı uygulamaya göre daha iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

(Wen-ze ve diğer., 2009) yapmış oldukları çalışmada, yüksek kükürtlü kömüre flotasyonu boyunca daha etkin kükürt giderme ve kül uzaklaştırmak için ultrasonik enerji uygulanarak araştırmalar yapılmıştır. Çalışmada kullanılan ultrasonik üreteçlerin frekansı yaklaşık 18 kHz'dir. Gücü ise 300 W'a kadar çıkabilmektedir. Araştırma sonuçlarına göre; ultrasonik enerji uygulandıktan sonra flotasyon işleminde ince kömürden kükürt giderme verimi %18,03 den %25,19'a arttırılmıştır.

(Gürpınar, 2007) yapmış olduğu çalışmada, ultrasonik enerji kullanarak, kuvars, kalsit, barit, pirit ve galen minerallerinin flotasyonunu gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda kalsit, barit, pirit ve galen minerallerinin flotasyon verimlerinde geleneksel yöntemlere göre karşılaştırmıştır. Çalışmada kullanılan ultrasonik probun frekansı yaklaşık 38 kHz'dir. Çalışma sonucunda kalsit, barit, pirit ve galen minerallerinin flotasyon verimi sırasıyla %4,00, %13,00, %5,20 ve %3,96 oranında artarken; kuvars mineralinin flotasyon verimi %20,45 oranında düşmüştür. Kuvarstaki düşüşün nedeni Ultrasonik enerjinin kuvars ile reaktif arasındaki fiziksel bağı kırmasından dolayı düştüğünü ileri sürmüştür.

(Özkan, 2018) yapmış olduğu çalışmada, ultrasonik enerjiyi kömür numunesi kullanılarak hem eş zamanlı olarak hem de flotasyon bir ön işlem tekniği olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çalışmada kullanılan ultrasonik üreteçlerin frekansı yaklaşık 18 kHz'dir. Gücü ise 200 W'a kadar çıkabilmektedir. Araştırma sonucuna göre ultrasonik işlemler yapılmadan yanabilir verim %70 iken ultrasonik uygulamayla yanabilir verim %90 olan bir kömür elde edilmiştir. Ultrasonik uygulama ile kül içerisinde de %6 bir düşüş olduğunu bildirmiştir.

(Çilek ve Özgen, 2009) yapmış oldukları çalışmalarda ultrasonik enerjiyi sülfürlü, oksitli ve silikatlı cevherler gibi farklı cevherlerin flotasyonu sırasında hem köpük bölgesi hem de toplam flotasyon bölgesinde uygulayarak verim üzerindeki değişiklikleri araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan ultrasonik probun frekansı yaklaşık 20 kHz'dir. Gücü ise 200 W'a kadar çıkabilmektedir. Çalışma sonucunda, özellikle ince boyutta serbestleşen sülfürlü cevherler için önemli olduğunu bildirmişlerdir. Köpük bölgesinde ultrason enerjisi uygulanması ile hem mekanik

taşınmayı azalma etkisi sağladığını hem de flotasyon verimini arttırdığını bildirmişlerdir.

(Güngören ve diğer., 2016) yapmış oldukları çalışmada, potasyum etil kxantat (KEX) varlığında ultrasonik uygulama ile galenin yüzebilirliğinin iyileştirme olanaklarını araştırmaktır. Bu amaçla, çeşitli ultrasonik güç seviyelerinde ve koşullandırma süresinde zeta potansiyeli, temas açısı ve kabarcık-parçacık bağlanma süresi ölçümlerini içeren yüzey kimyası çalışmalarına ek olarak mikro flotasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak ultasonik enerji uygulanmadan verim yaklaşık %40 iken ultrasonik enerji uygulandığında %77,5 verim ile ürün kazandığını bildirmişlerdir.

(Lv ve diğer., 2020) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonik enerjiyi kömür numunesi kullanılarak flotasyon ön işlem tekniği olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan ultrasonik üreteçlerin frekansı yaklaşık 80 kHz'dir. Gücü ise 200 W'a kadar çıkabilmektedir. Araştırma sonucuna göre ultrasonik işlem yapılmadan yanabilir verim %70 iken ultrasonik uygulamayla yanabilir verim %97 olan bir kömür elde edilmiştir. Ultrasonik uygulama ile kül içerisinde de %4 bir düşüş olduğunu bildirmiştir.

(Shu ve diğer., 2019) yapmış oldukları çalışmada, ilmenit yüzeyindeki flotasyonu ve olası adsorpsiyon mekanizmasını ve ilmenitin yüzey bileşimindeki değişiklikleri ultrasonik ön işlemten önce ve sonra uygulamaları araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan ultrasonik enerji gücü ise 500 W dır. Flotasyon sonuçlarında ilmenitin 4-5 pH aralığında verimi ultrasonik uygulamayla % 43,17 den %89,54'e ulaşabildiğini bildirmişlerdir.

(Farmer ve diğer., 2000) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonik enerjiyi silikat yüzeyindeki kil ve demir oksitleri uzaklaştırmak için kullanmışlardır. Ultrasonik işlem uygulamalarında 500 W gücünde ve 20 kHz frekansında bir ultrasonik cihaz kullanmışlardır. Araştırma sonucunda geleneksel yöntemlerle %0,025 Fe₂O₃ olan içeriği ultrasonik uygulama ile % 0,012 Fe₂O₃ düşürülebildiğini bildirmişlerdir.

(Özün ve diğer., 2019) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonik enerjiyi çeşitli atmosferik ve su ortamlarında oksitlenmiş olan saf piritin yüzeyini ultrasonik enerji kullanarak bu oksitli tabakadan arındırmak için araştırma yapmışlardır. Ultrasonik işlem uygulamalarında 40 kHz frekansında bir ultrasonik cihaz kullanmışlardır.

Araştırma sonucuna göre ultrasonik işlem yapılmadan %55 verim ile pirit kazanılırken ultrasonik enerji uygulamayla %95 verimle bir ürün elde edilmiştir.

(Chen ve diğer., 2019) yapmış oldukları çalışmada, ultrasonik enerjiyi kömür numunesi kullanılarak mikro-flotasyon koşullandırma öncesi kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan ultrasonik üreteçlerin frekansı yaklaşık 20 kHz'dir. Araştırma sonucuna göre ultrasonik işlem yapılmadan yanabilir verim %90 iken ultrasonik enerji uygulamayla uygun şartlarda yanabilir verim %95 olan bir kömür elde edilmiştir.

Tüm bu literatür çalışmaları göz önüne alındığında kondisyonlama öncesi ve kondisyonlama sırasında ultrasonik enerji uygulandığında tenör ve verim değerini artırdığı belirlenmiştir.

Bu çalışmada ise özellikle sülfürlü cevherlerin önceki çalışmalardan farklı olarak kondisyonlama sonrasındaki etkileri belirlenmiş olacaktır. Ayrıca laboratuvar ölçeğinde tasarlanmış olan flotasyon test düzeneğinin tesis bazında kullanılabilirliği belirlenmiş olacaktır.

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Global endüstrinin gelişmesiyle sülfürlü baz metallere (galen, sfalerit, kalkopirit vb.) olan talep her geçen gün artmaktadır. Artan bu talebi karşılamak için cevher hazırlama proseslerin daha da geliştirilmesi gerekmektedir.

Sülfürlü cevherler genellikle ince boyutlarda serbestleşmektedir. Bu yüzden zenginleştirme yöntemi olarak flotasyon tercih edilmektedir. Bu tip cevherler flotasyon yöntemiyle zenginleştirildiğinde şlam kaplama, fazla reaktif tüketimi ve çok sayıda temizleme-süpürme devresine ihtiyaç duyulması gibi problemlerle karşılaşmaktadır. İnce boyutlarda serbestleşen cevherler flotasyon yöntemiyle zenginleştirildiğinde bu gibi bazı problemler işletme maliyetlerini artırmaktadır. Bu tez çalışmasında, flotasyonda ultrasonik enerji kullanılarak hem işletme maliyetlerini düşürmek hem de daha yüksek selektivite ve verimde ürün elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Sülfürlü saf mineraller (galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit) ve cevher yatağından temin edilen üç farklı tüvenan cevher araştırmalarda kullanılmıştır. Araştırmalar iki aşamada yapılmıştır.

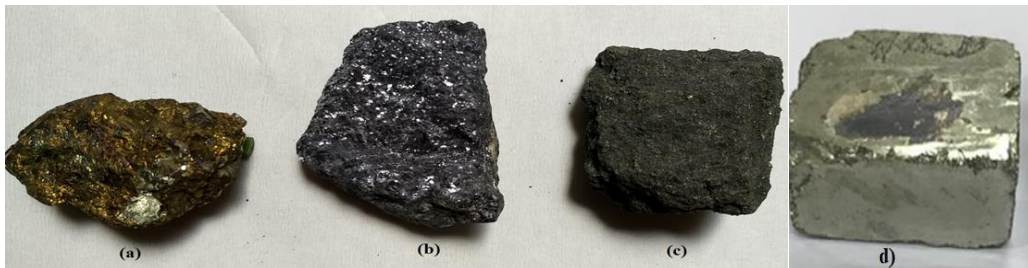
Araştırmaların ilk aşamasında, minerallerin pülp ortamında tek başlarına ultrasonik enerjiye olan etkisini tespit etmek ve minerallerin kimyasal analize gerek duymadan kısa sürede birçok flotasyon testini yapabilmek için saf mineraller kullanılmıştır. Araştırmaların ikinci aşamasında ise, ultrasonik enerji destekli flotasyon düzeneği yardımıyla ultrasonik enerjinin tüvenan cevherler üzerindeki etkisini tespit etmek için üç farklı cevher yatağından temin edilen numuneler kullanılmıştır. Bu amaçla, öncelikle ultrasonik enerjinin saf mineraller (galen, kalkopirit, pirit ve sfalerit) üzerindeki etkisi ultrasonlu ve ultrasonuz olarak mikro-flotasyon çalışmaları ile araştırılmıştır. Ultrasonlu ve ultrasonuz mikro-flotasyon çalışmalarından elde edilen uygun değerdeki konsantrelere Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) ve Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FTIR) analizleri yapılarak ultrasonik enerjinin etkileri açıklanmaya çalışılmıştır.

Saf minerallerin ultrasonlu koşullarda tespit edilmiş olan canlandırma ya da bastırma etkileri, minerallerin aynı ortamda bulunduğuda bu etkisinin devam edip etmediğini tespit etmek amacıyla, sentetik mineral karışımları ile araştırmalar yapılmıştır. Uygun toplayıcı miktarının tespiti için, ultrasonik enerji kullanarak mikro-flotasyon testleri ile araştırmalar yapılmıştır. Labratuvar ölçekli ultrasonik enerji destekli test düzeneği, saf minerallerden elde edilen mikro-flotasyon sonuçları doğrultusunda tasarlanmıştır. Cevher hazırlama tesislerinden temin edilen tüvenan cevherlere ise iki aşamada flotasyon testleri yapılmıştır. İlk aşamada mikro-flotasyon sonuçlarında tespit edilen uygun flotasyon koşullarında ultrasonuz olarak flotasyon testleri yapılmıştır. İkinci aşamada ise, ultrasonik enerji destekli test düzeneği kullanarak flotasyon testleri yapılmıştır. Yapılmış olan bu iki aşamalı flotasyon test sonuçları karşılaştırılarak ultrasonik enerjinin etkileri değerlendirilmiştir.

3.1 Malzeme

3.1.1 Mikro-Flotasyon Testlerinde Kullanılan Malzeme

Çalışma kapsamında, mikro-flotasyon testleri için saf mineraller (kalkopirit, galen, sfalerit ve pirit) ve ultrasonik destekli flotasyon düzeneği için cevher hazırlama işletmelerinden temin edilen numuneler kullanılmıştır. Mikro-flotasyon testlerinde kullanılan galen ve sfalerit kristalleri Giresun-şebinkarahisar kurşun-çinko işletmesinden, pirit ve kalkopirit kristalleri ise Rize-Çayeli bakır işletmesinden elle toplanarak temin edilmiştir. Saf minerallerin temsili fotoğrafları şekil 3.1'de verilmektedir.

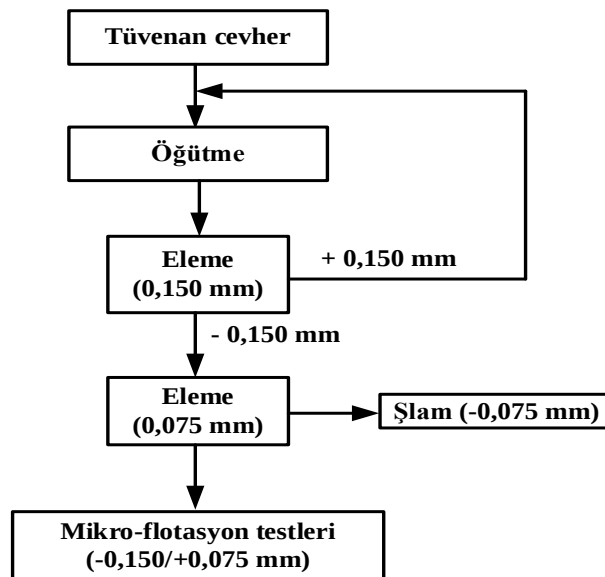


şekil 3.1 Çalışmalarda kullanılan saf mineraller (a: kalkopirit b: galen c: sfalerit ve d: pirit)

Mikro-flotasyon testlerinde her bir mineral kristalinden 1kg agat değirmeninde öğütüldükten sonra 0,150 mm ve 0,075 mm'lik eleklerden elenmiştir. Mikro-flotasyon testlerinde 0,150/0,075 mm boyut aralığındaki numuneler kullanılmıştır. Ön deneme testlerinde -0,075 mm'lik boyut fraksiyonundaki malzeme mekanik taşınmaya neden olduğu için, bu boyut fraksiyonu şlam olarak değerlendirilmiştir. Mikro-flotasyon testlerinde kullanılan numuneler oksitlenme durumuna karşı Şekil 3.2'de verilen cam tüp içerisinde saklanmıştır. Mikro-flotasyon testleri için cevher hazırlama akım şeması Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.2 Cam tüp içindeki 150/75 µm boyut aralığındaki numuneler

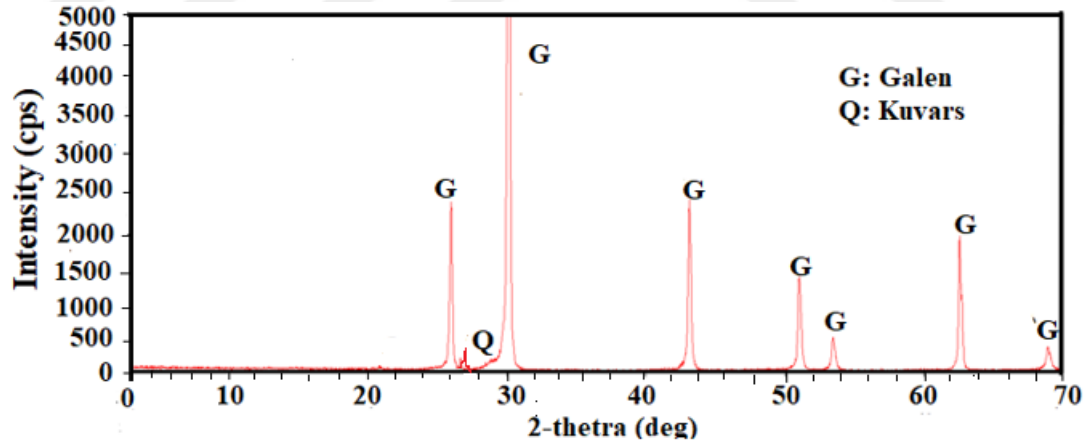


Şekil 3.3 Mikro-flotasyon testleri için cevher hazırlama akım şeması

Numunelerin mineralojik analizi, X ışını kırınım (XRD) cihazı (Rigaku; Miniflex II) ile Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Araştırma Laboratuvarı bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Saf minerallere ait XRD analiz sonuçları Şekil 3.4-3.7’de verilmiştir. Sülfürlü minerallerin (kalkopirit, galen, sfalerit ve pirit) XRD analizleri sonrasında yapılan kimyasal analizlerine göre saflık dereceleri belirlenmiştir. Kimyasal analiz için mineral örnekleri, belirlenmiş miktarda karışımlarla matris numune hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler, saf derişik HNO₃ ve saf derişik HCL ile çözündürölmüş ve 250 ml’lik balon jojeye alınmıştır. Gerekli miktarda seyreltme işlemleri yapılarak atomik absorpsiyon spektrometresinde (PerkinElmer; PinAAcle 500) Pb, Fe, Cu ve Zn analizleri yapılmıştır. XRD verilerinde minerallerin saf olduğunun teyidi yapıldığından, söz konusu elementler gravimetrik faktörler ile çarpılarak galen için PbS/Pb, pirit için FeS₂/Fe, bakır için CuFeS₂/Cu ve sfalerit için ZnS/Zn şeklinde hesaplanarak Tablo 3.1’de verilmiştir.

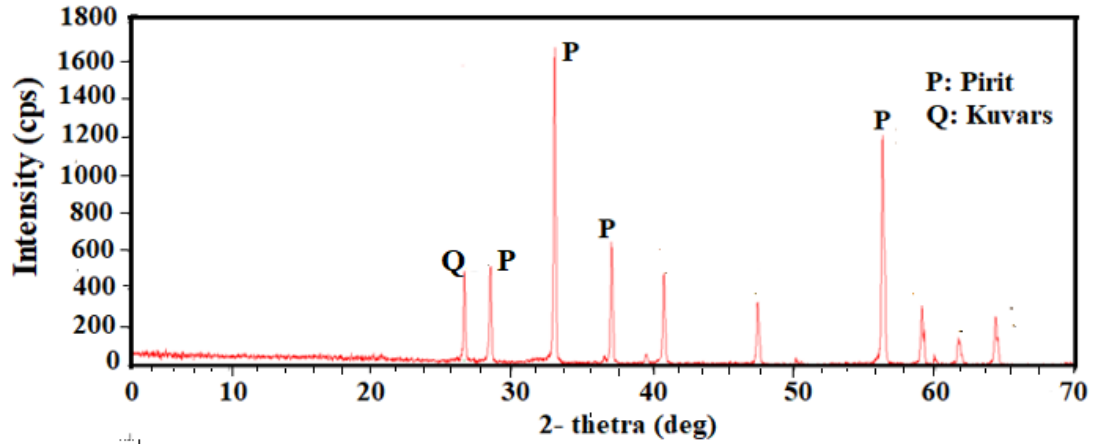
Tablo 3.1 Testlerde kullanılan minerallerin saflık dereceleri

Mineral	Galen	Pirit	Kalkopirit	Sfalerit
Saflık derecesi (%)	99,02	98,75	92,54	86,33



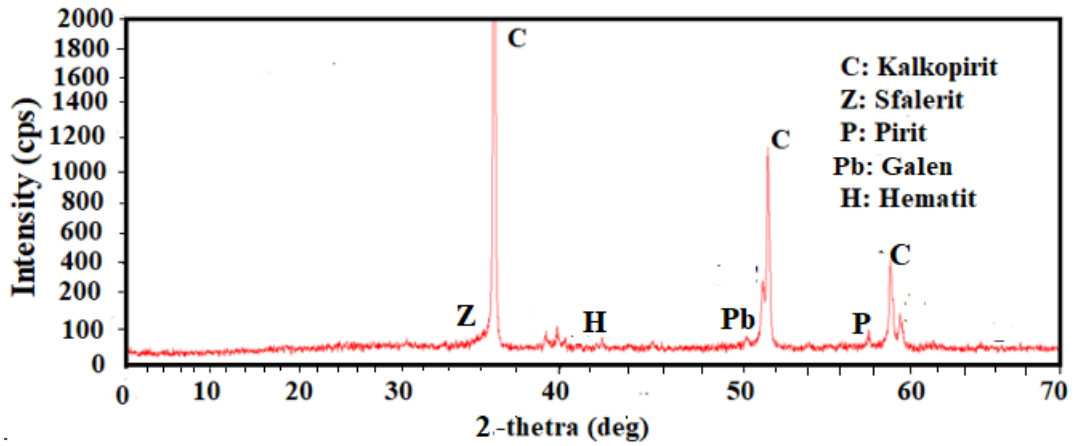
Şekil 3.4 Saf galen XRD analiz sonuçları

Şekil 3.4’de galenin XRD sonucuna göre, galen pik değeriinin çok fazla olduğu görölmektedir. Galen minerali ile birlikte çok az miktarda kuvars mineralinin de olduğu görölmektedir.



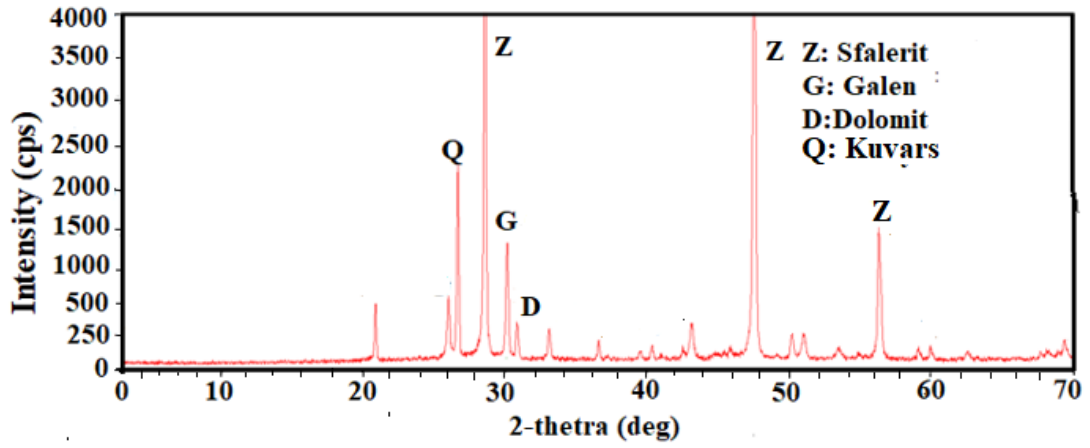
Şekil 3.5 Saf pirit XRD analiz sonuçları

Şekil 3.5’de piritin XRD sonucuna göre, pirit mineralinin yoğun olduğu ve pirit mineralinin yanında daha az miktarda kuvars mineralinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.6 Saf kalkopirit XRD analiz sonuçları

Şekil 3.6’da verilen kalkopiritin XRD sonucu incelendiğinde, kalkopirit oldukça belirgin durumdadır. Kalkopirit ile birlikte az miktarda pirit, sfalerit, galen ve hematit minerallerinin de olduğu görülmektedir.

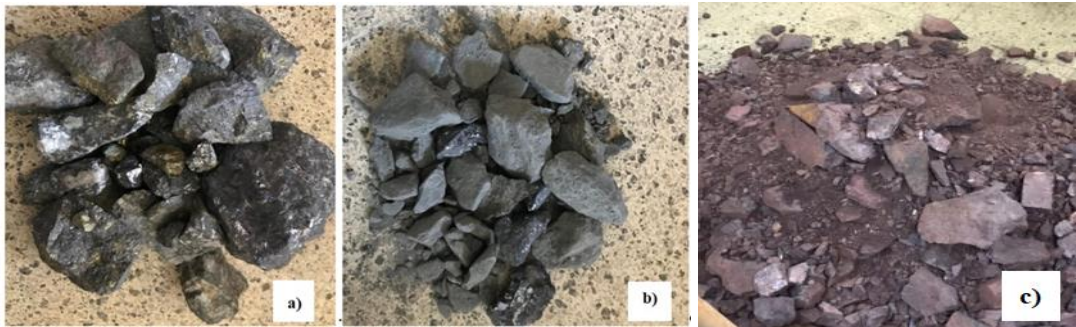


Şekil 3.7 Saf sfalerit XRD analiz sonuçları

Şekil 3.7’de sfaleritin XRD sonucuna göre, sfaleritin oldukça yoğun piklerinin olduğu ve sfalerit mineraliyle birlikte az miktarda kuvars, galen ve dolomit olduğu tespit edilmiştir.

3.1.2 Ultrasonik Destekli Flotasyon Düzeneginde Kullanılan Malzeme

Ultrasonik destekli flotasyon düzeneginde kullanılan numuneler; Giresun-Şebinkarahisar ilçesi kurşun-çinko işletmesinden, Balıkesir-Balya kurşun-çinko işletmesi ve Kütahya-Çatak demir işletmesinden temin edilmiştir. Ultrasonik destekli flotasyon düzeneginde kullanılan numunelerin temsili fotoğrafları Şekil 3.8’de verilmiştir.



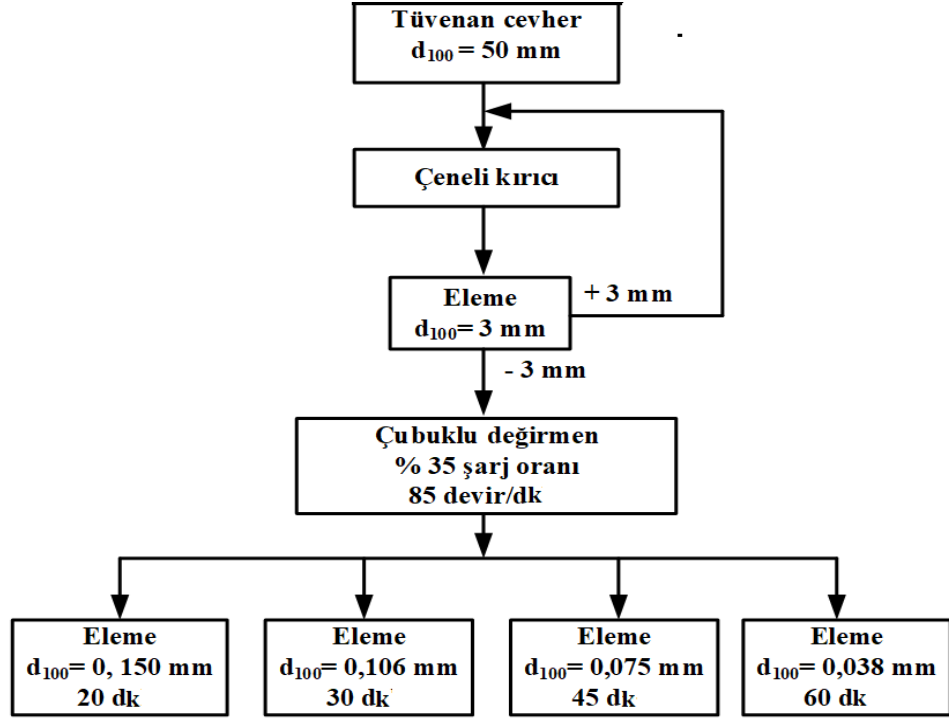
Şekil 3.8 Ultrasonik destekli flotasyon test düzeneginde kullanılan numunelerin temsili fotoğrafları (a: Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko tesisi, b: Balıkesir-Balya kurşun çinko tesisi ve c: Kütahya-Çatak demir tesisi)

Giresun-Şebinkarahisar kurşun-çinko ve Balıkesir-Balya kurşun-çinko işletmelerden kırıcı öncesi $d_{100} = 50$ mm boyutunda cevherlerden yaklaşık 20 kg temsili numune alınmıştır. Numuneler çeneli kırıcıda iki kademede $d_{100} = 3$ mm boyutuna kırılmıştır. -3mm boyutunda indirilmiş olan cevherler konileme dörtlleme metoduyla yarısı şahit numune olarak ayrılıp arşive kaldırılmıştır. -3 mm boyutundaki malzemenin diğer yarısı konileme dörtlleme metoduyla 2 kg'lık 5 adet temsili numuneye bölünmüştür. Bu beş adet numuneden 4 tanesi çubuklu değirmende $d_{100} = 0,150$ mm, $d_{100} = 0,106$ mm, $d_{100} = 0,075$ mm ve $d_{100} = 0,038$ mm tane boyutlarına öğütülmüştür.

Öğütülen cevherin tamamının istenilen boyutun altına indirilmesi sırasında, cevheri oluşturan değerli minerallerin de çok fazla ince boyutlara geçerek flotasyon işleminde şlam sorunu oluşturmaması için kademeli bir öğütme gerçekleştirilmiştir. Kademeli öğütme işlemi için, 1 kg sülfürlü cevher değirmende 5 dk öğütüldükten sonra belirtilen elekten eleme işlemi yapılmıştır. Daha sonra elek üstünde kalan cevher değirmende 5 dk daha öğütülerek tekrar eleme işlemi yapılmıştır. Bu durum malzemenin tamamının istenilen elek boyutundan geçesiye kadar tekrarlanmıştır. $d_{100} = 0,150$ mm tane boyutu için 20 dk, $d_{100} = 0,106$ mm tane boyutu için 30 dk, $d_{100} = 0,075$ mm tane boyutu için 45 dk ve $d_{100} = 0,038$ mm tane boyutu için 60 dk öğütme yapılmıştır. Tüvenan cevherler çubuklu değirmende %35 şarj oranında kuru olarak öğütmüştür. Boyut küçültme akım şeması Şekil 3.9'da verilmiştir. Değirmen şarj hesabı aşağıdaki 3.1'deki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\emptyset = [(\pi * D^2)/4] * L * d * V_p \quad (3.1)$$

$\emptyset$ = Değirmen şarjı, D = Değirmen çapı, L = Değirmen uzunluğu, d = Bilya yoğunluğu ve V_p = Değirmen doluluk oranı (Yıldız, 2007).

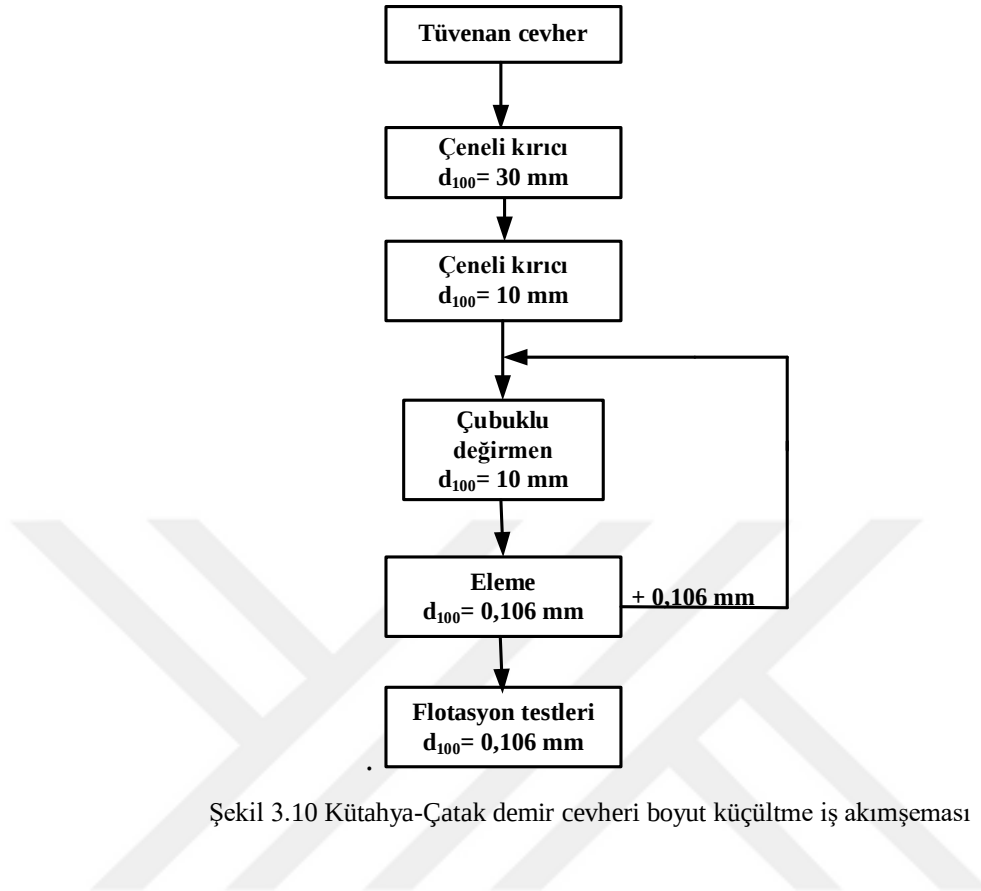


Şekil 3.9 Ultrasonik enerji destekli flotasyon düzeneği için cevher hazırlama iş akım şeması

Kütahya-Çatak yöresinden 500 kg civarında tane boyutu yaklaşık $d_{100} = 50$ mm olan temsili numune alınmıştır. Numuneler ilk aşamada kurutulup harmanlandıktan sonra konileme dörtleme yöntemi ile yaklaşık 100 kg şahit numune ayrılmış geri kalan kısım usulüne uygun olarak yapılan konileme ve dörtleme yöntemleri ile azaltma yapılarak 10 kg lık numuneler halinde getirilmiştir.

10 kg lık numunelerden bir tanesi önce $d_{100} = 30$ mm daha sonra $d_{100} = 10$ mm tane fraksiyonuna kırılmıştır. $d_{100} = 10$ mm kırılmış olan numuneden usulüne uygun olarak yapılan konileme dörtlemeyle 1 kg alınarak çubuklu değirmende $d_{100} = 106$ μ m tane boyutuna kademeli olarak öğütülmüştür.

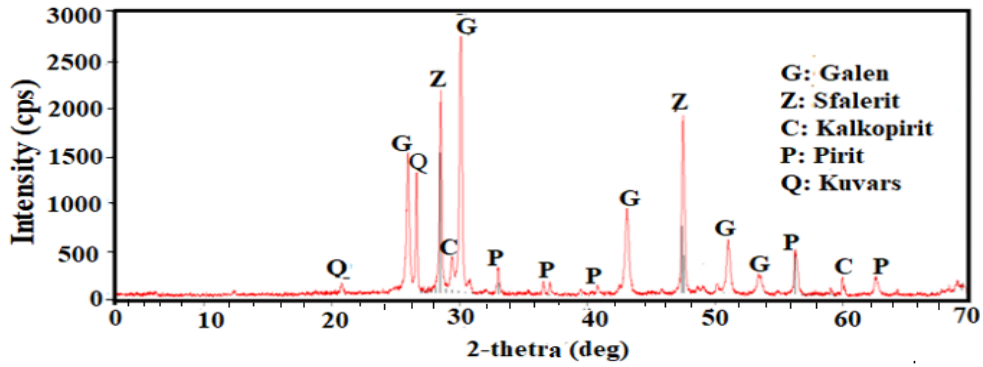
Kademeli öğütme işlemi için, 1 kg sülfürlü cevher değirmende 5 dk öğütüldükten sonra belirtilen elekten eleme işlemi yapılmıştır. Daha sonra elek üstünde kalan cevher değirmende 5 dk daha öğütülerek tekrar eleme işlemi yapılmıştır. Bu durum malzemenin tamamının $d_{100} = 106$ μ m tane boyutuna ulaşıncaya kadar öğütme işlemi yapılmıştır. Tane boyutu $d_{100} = 0,106$ mm için, 30 dk öğütme işlemi yapılmıştır. Bu öğütülmüş numuneden 250 g'lık temsili numuneler alınarak flotasyon testleri yapılmıştır. Tüvenan cevher için boyut küçültme iş akım şeması Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 Kütahya-Çatak demir cevheri boyut küçültme iş akışşeması

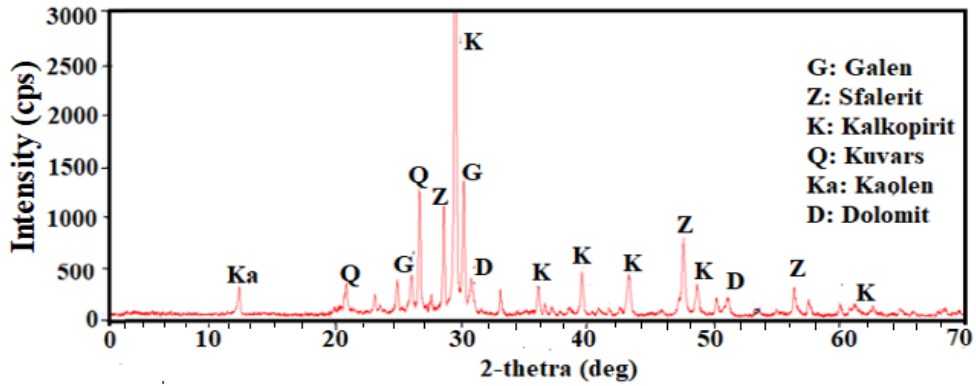
Tüvenan numunelerin mineralojik analizi, X ışını kırınım (XRD) cihazı (Rigaku; Miniflex II) ile Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Araştırma Laboratuvarı bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevherinin XRD sonuçları Şekil 3.11’de, Balıkesir-Balya kurşun-çinko cevherinin XRD sonuçları Şekil 3.12’de ve Kütahya çatak demir cevherinin XRD analiz sonuçları Şekil 3.13’de verilmektedir.

Sülfürlü tüvenan cevherlere XRD analizleri sonrasında kimyasal analizler yapılmıştır. Kimyasal analiz için mineral örnekleri, belirlenmiş miktarda karışımlarla matris numune hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler, saf derişik HNO₃ ve HCL ile çözündürülmüş ve 250 ml’lik balon jojeye alınmıştır. Gerekli miktarda seyreltme işlemi yapılarak atomik absorpsiyon spektrometresinde (PerkinElmer; PinAAcle 500) Pb, Fe, Cu ve Zn analizleri yapılmıştır. XRD verilerinde minerallerin teyidi yapıldığından, söz konusu elementler gravimetrik faktörler ile çarpılarak galen için PbS/Pb, pirit için FeS₂/Fe, bakır için CuFeS₂/Cu ve sfalerit için ZnS/Zn şeklinde hesaplanmıştır.



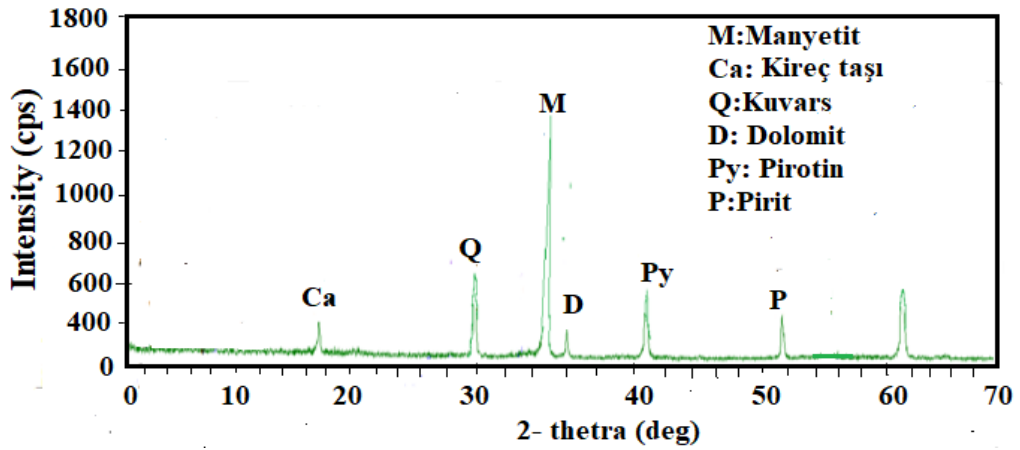
Şekil 3.10 Giresun-Şebinkarahisar kurşun-çinko cevheri XRD analiz sonuçları

Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevherinin XRD grafiği incelendiğinde, galen ve sfalerit piklerin olduğu bu minerallerin yanında çok az miktarda kalkopirit, pirit ve kuvars piklerine de rastlanmıştır. Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevherinin kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde %34,11 Pb, %14,77 Zn, %1,22 Cu ve %6,59 Fe içeriği tespit edilmiştir.



Şekil 3.11 Balıkesir-Balya kurşun-çinko cevherin XRD analiz sonuçları

Balıkesir-Balya kurşun-çinko-cevherinin XRD sonucuna göre, cevherin galen, sfalerit, kaolen, kuvars ve dolomit minerallerinden oluştuğu izlenmektedir. Cevherin kimyasal analiz sonuçlarına göre; %34,11 Pb ve %14,77 Zn içerdiği tespit edilmiştir.



3.12 Kütahya-Çatak demir cevheri XRD sonuçları

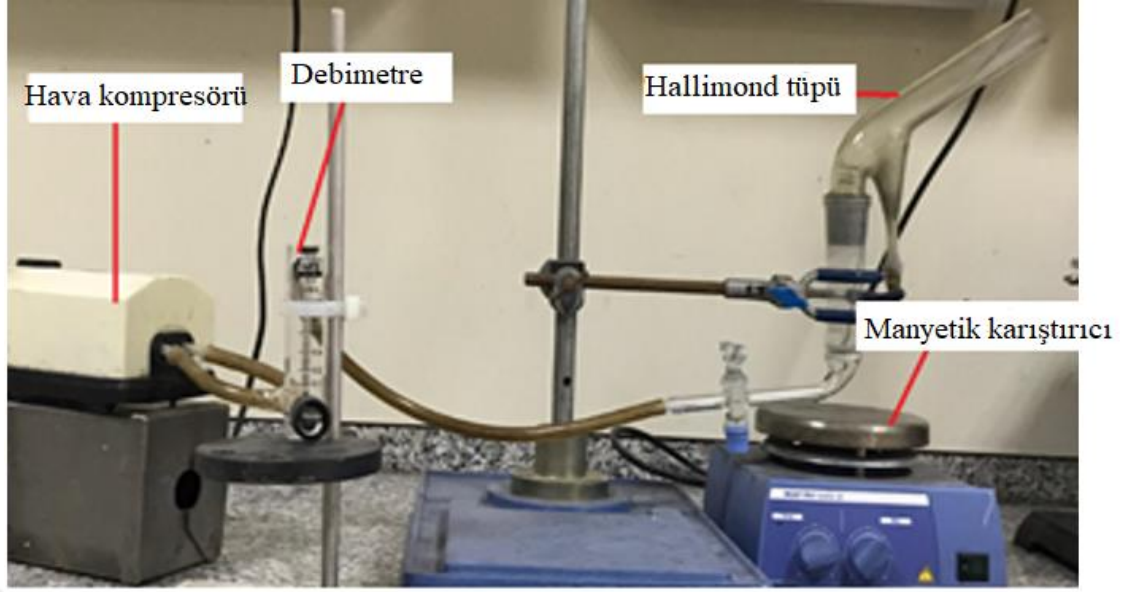
Şekil

Kütahya-Çatak demir cevherinin XRD analizine göre, cevherde ana demir minerali olarak manyetit olduğu, gang mineralleri olarak ise kuvars, pirotin, pirit, kalkopirit grossular, homblend, ortoklas, clinochloride ve dolomit'ten oluştuğu belirlenmiştir. XRD sonrası yapılan kimyasal analiz sonuçlarına göre; cevherin demir tenörünün %32 Fe olduğu, silis oranının %26-28 ve CaO+MgO oranının %13 civarında olduğu ve geriye kalan kısmında gang minerallerinin oluşturduğu belirtilmiştir.

3.2 Yöntem

3.2.1 Mikro-flotasyon Testleri

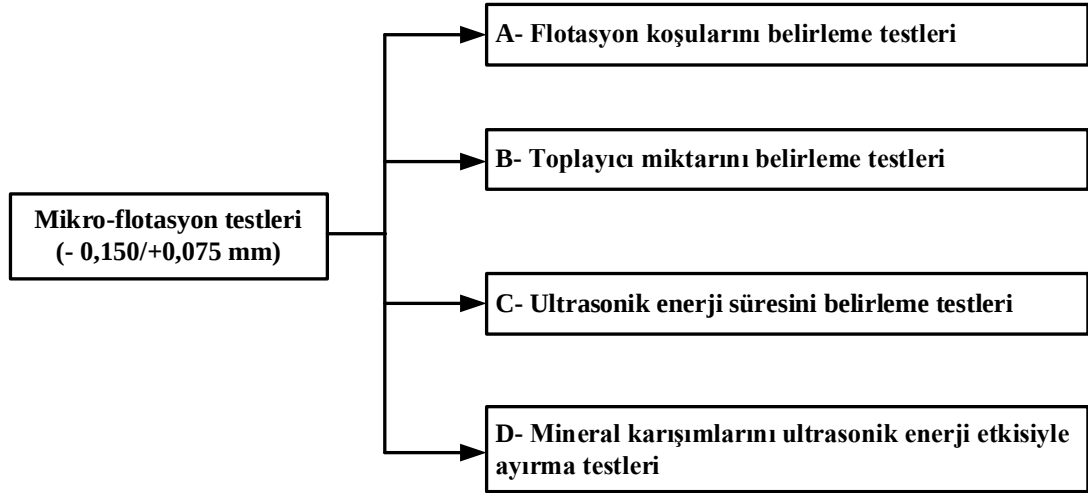
Mikro-flotasyon testleri Şekil 3.14'de verilen Hallimond tüpünde yapılmıştır. Hallimond tüpü flotasyonu için tane boyutu, hava miktarı ve kullanılacak numune miktarı daha önce yapılmış olan çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir (Drzymala, 1999; Osasere, 2000). Test çalışmalarında, 20 kHz frekans aralığına sahip ultrasonik homojenleştirici (Maoan-Model UH-250 XO 800 S) kullanılmıştır. Ultrasonik homojenleştirici Şekil 3.15'de verilmiştir. Mikro-flotasyon testleri için iş akım şeması Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.13 Mikro-Flotasyon test düzeneği (Kişisel arşiv, 2021)



Şekil 3.14 Ultrasonik homojenleştirici (Kişisel arşiv, 2021)



Şekil 3.15 Mikro-flotasyon testleri iş akım şeması

Mikro-flotasyon testlerinde toplayıcı olarak Potasyum Amil Xsantat (KAX), pH ayarlayıcı olarak H_2SO_4 ve NaOH kullanılmıştır. Test çalışmalarında 1kg'lık 0,150/0,075 mm boyut aralığındaki cevherden temsili olarak alınan 1 g numune kullanılmıştır. Gerçek flotasyon koşullarını simüle etmek için testlerde musluk suyu kullanılmıştır. 250 ml behere 0,1 L musluk suyu ve 1 g numune ilave edildikten sonra pH ayarlaması yapılarak gerekli reaktifler ilave edilmiş ve 2 dk süresince koşullandırma yapılmıştır. Daha sonra Hallimond tüpüne aktarılan süspansiyona flotasyon işlemi yapılmıştır.

Yapılan ön çalışma testlerinde, galen tanelerinin yüzmesi 1 dk içinde tamamlanırken pirit, kalkopirit ve sfalerit tanelerinin yüzmesi 5 dk içinde tamamlanmıştır. Bu nedenle, tüm mikro-flotasyon testlerde flotasyon süresi 5 dk olarak seçilmiştir. Flotasyonda yüzen ürünler bant filtreden (Reeve melek modeli, tip 305 ve boyut 12,5 cm) süzölmüş ve daha sonra 105 °C'de etüvde kurutulmuştur.

Saf minerallerin metal kazanma verimi, doğrudan yüzen ürün ağırlığının besleme malına oranı (yüzen ürün ağırlığı/beslenen ürün ağırlığı*100) hesabı yapılarak bulunmuştur. Mineral karışımındaki metal kazanma verimi ise, optik mikroskop altında taneler sayılarak (yüzen ürünlerin sayısı/beslenen ürünün sayısı*100) hesabı yapılarak belirlenmiştir.

3.3 Flotasyon testleri

Çalışmanın bu bölümünde saf halde bulunan galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit minerallerinin konvensiyonel flotasyon koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Flotasyon koşullarındaki değerler literatür araştırmaları ve yapılan ön deneme testleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Mikro-flotasyon testlerinde önce pH değeri ve hava miktarı sabit tutularak en uygun toplayıcı miktarı belirlenmiştir. Daha sonra, toplayıcı miktarı ve hava miktarı sabit tutularak en uygun pH değeri belirlenmiştir. Son olarak, uygun toplayıcı miktarı ve pH değeri belirlendikten sonra toplayıcı miktarı ve pH sabit tutularak en uygun hava miktarı belirlenmiştir.

3.3.1 Galenin Flotasyon Koşullarının Belirlenmesi

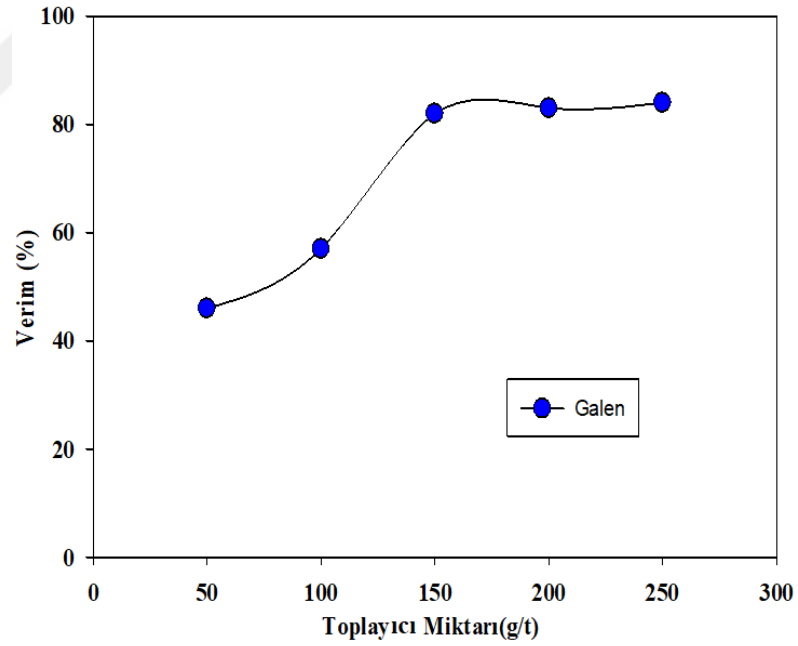
Mikro-flotasyon testlerinde pH, toplayıcı ve hava miktarı için flotasyon koşulları araştırılmıştır. Testlerde flotasyon koşulları Tablo 3.2’de, sonuçları ise Tablo 3.3’de ve Şekil 3.17-3.19’da verilmiştir.

Tablo 3.2 Galenin flotasyon koşulları

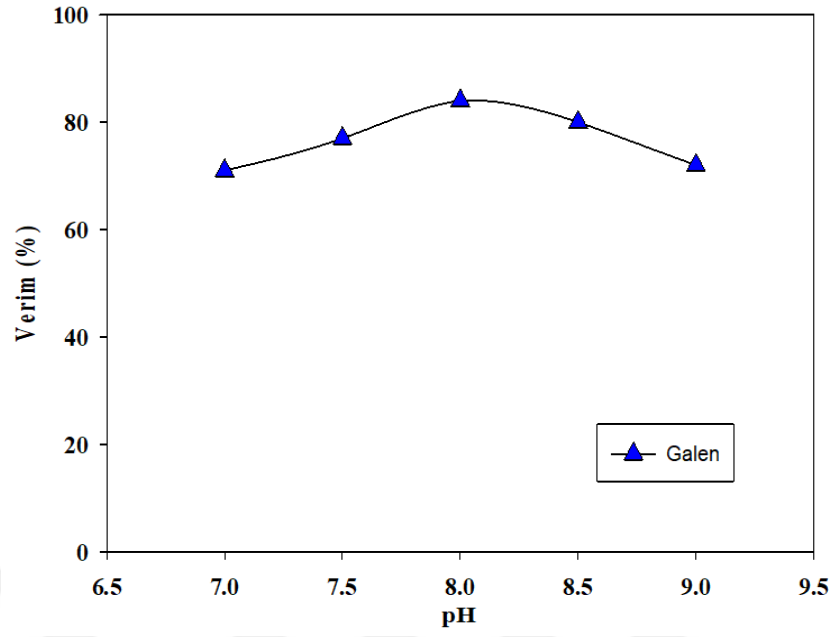
Katı miktarı (g)	1
Hava miktarı (L/dk)	0,1/0,2/0,3/0,4/0,5
KAX miktarı (g/t)	50/100/150/200/250
pH	7/7,5/8/8,5/9

Tablo 3.3 Galen için denenen flotasyon koşulları ve sonuçları

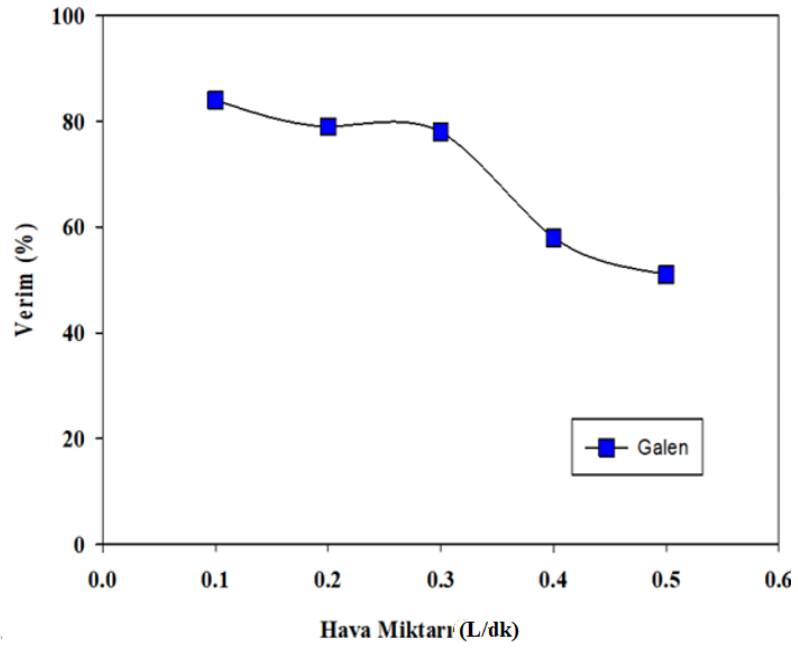
Katı miktarı (g)	Hava miktarı (L/dk).	pH	Toplayıcı miktarı (g/t)	Verim (%)
1	0,1	8	50	46
1	0,1	8	100	57
1	0,1	8	150	82
1	0,1	8	200	83
1	0,1	8	250	84
1	0,1	7	250	71
1	0,1	7,5	250	77
1	0,1	8,5	250	80
1	0,1	9	250	72
1	0,5	8	250	51
1	0,2	8	250	79
1	0,3	8	250	78
1	0,4	8	250	58



Şekil 3.16 Galen flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi



Şekil 3.17 Galen flotasyonunda pH miktarına bağlı verim değişimi



Şekil 3.18 Galen flotasyonunda hava miktarına bağlı verim değişimi

Tablo 3.3'de ve Şekil 3.17-3.19'daki sonuçlar incelendiğinde toplayıcı miktarı 250 g/t, pH = 8 ve hava miktarı 0,1 L/dk uygun flotasyon koşulları olarak belirlenmiştir. Bu flotasyon koşullarında %84 Pb verimi elde edilmiştir.

Flotasyon koşullarında, 150 g/t toplayıcı miktarına kadar verim artmaktayken 150g/t toplayıcı miktarından sonra verim değeri yaklaşık olarak stabil kaldığı

görülmektedir. pH değerine bakıldığında, pH = 8'in altındaki ve üzerindeki pH değerlerinde verimin azaldığı görülmektedir. Hava miktarı bakıldığında ise hava miktarı arttıkça verimin düştüğü görülmektedir.

3.2.2 Piritin Flotasyon Koşullarının Belirlenmesi

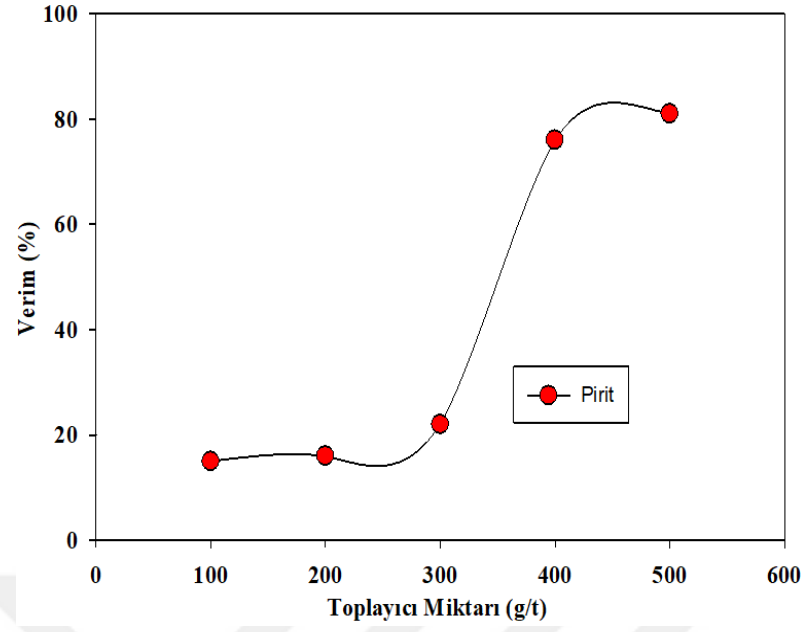
pH, toplayıcı ve hava miktarı için flotasyon koşulları araştırılmıştır. Mineral için flotasyon koşulları Tablo 3.4'de, sonuçları Tablo 3.5'de ve Şekil 3.20-3.22'de verilmiştir.

Tablo 3.4 Piritin flotasyon koşulları

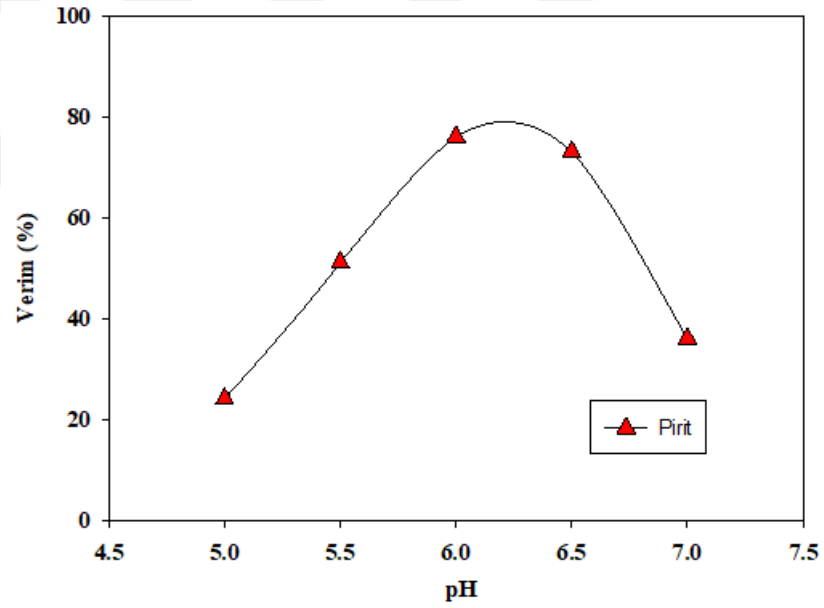
Katı miktarı (g)	1
Hava miktarı (L/dk)	0,1/0,2/0,3/0,4/0,5
KAX miktarı (g/t)	100/200/300/400/500
pH	5/5,5/6/6,5/7

Tablo 3.5 Piritin flotasyon koşulları ve sonuçları

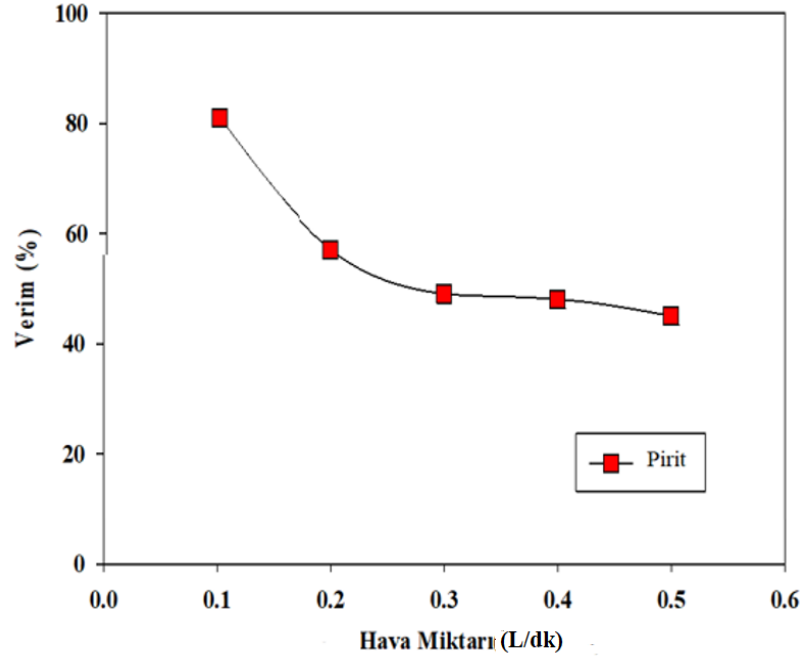
Katı miktarı (g)	Hava miktarı (L/dk)	pH	Toplayıcı miktarı (g/t)	Verim (%)
1	0,1	6	100	15
1	0,1	6	200	16
1	0,1	6	300	22
1	0,1	6	400	76
1	0,1	6	500	81
1	0,1	5	500	24
1	0,1	5,5	500	51
1	0,1	6,5	500	73
1	0,1	7	500	36
1	0,5	6	500	45
1	0,2	6	500	57
1	0,3	6	500	49
1	0,4	6	500	48



Şekil 3.190 Pirit flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi



Şekil 3.20 Pirit flotasyonunda pH miktarına bağlı verim değişimi



Şekil 3.21 Pirit flotasyonunda hava miktarına bağlı verim değişimi

Tablo 3.5’de ve Şekil 3.20-3.22’deki araştırma sonuçları incelendiğinde toplayıcı miktarı 500 g/t, pH = 6 ve hava miktarı 0,1 L/dk flotasyon koşulları olarak belirlenmiştir. Bu flotasyon koşullarında %81 verime ulaşılmıştır. Toplayıcı miktarı 100-300 g/t aralığında stabil kaldığı, 300-400 g/t aralığında artmakta olduğu ve 400-500 g/t aralığında ise verimin tekrar stabil kaldığı görülmektedir. pH değerine bakıldığında ise verimin pH = 6 kadar artmakta olduğu daha sonra ise azaldığı görülmektedir. Hava miktarıyla verimin ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Hava miktarı arttıkça verim azalmaktadır.

3.3.3 Kalkopiritin Flotasyon Koşullarının Belirlenme Testleri

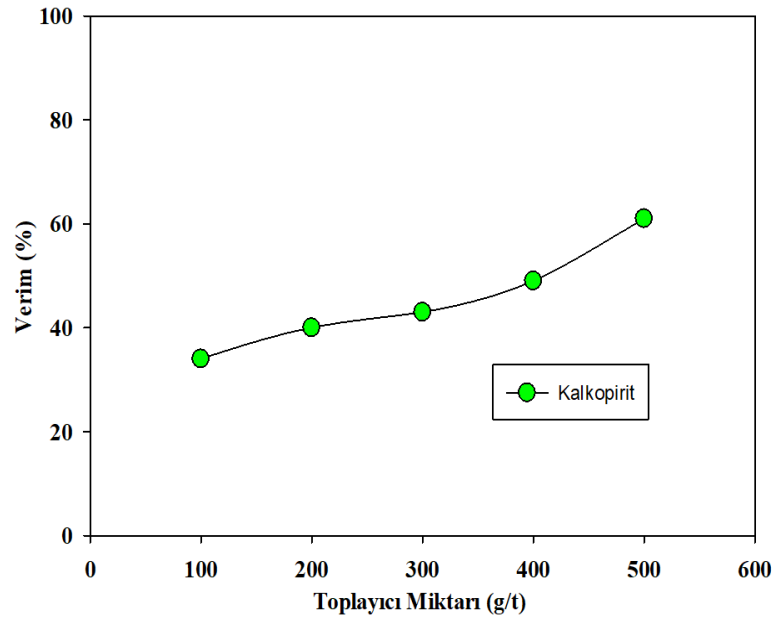
Testlerde pH, toplayıcı miktarı ve hava miktarı için flotasyon koşulları araştırılmıştır. Kalkopirit için flotasyon test koşulları Tablo 3.6’da, sonuçları Tablo 3.7’de ve Şekil 3.23-3.25’de verilmiştir.

Tablo 3.6 Kalkopiritin flotasyon koşulları

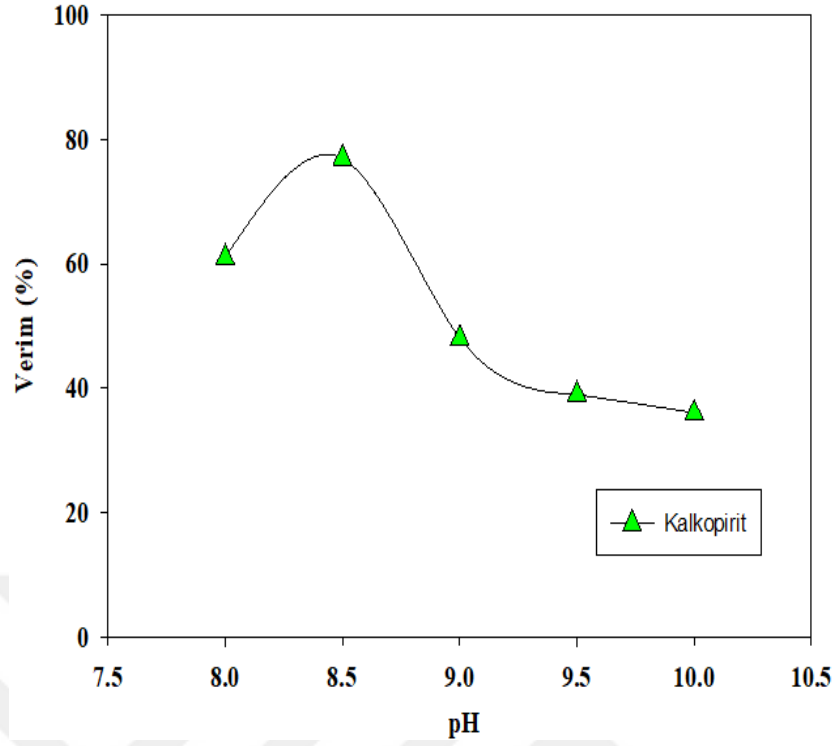
Katı miktarı (g)	1
Hava miktarı (L/dk)	0,1/0,2/0,3/0,4/0,5
KAX miktarı (g/t)	100/200/300/400/500
pH	8/8,5/9/9,5/10

Tablo 3.4 Kalkopiritin flotasyon koşulları ve sonuçları

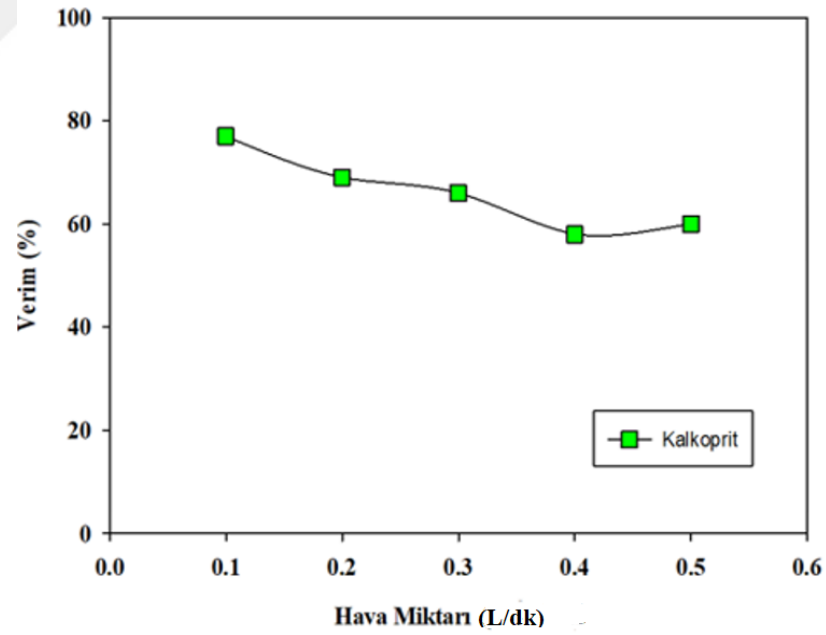
Katı miktarı (g)	Hava miktarı (L/dk)	pH	Toplayıcı miktarı (g/t)	Verim (%)
1	0,1	8	100	34
1	0,1	8	200	40
1	0,1	8	300	43
1	0,1	8	400	49
1	0,1	8	500	61
1	0,1	8,5	500	77
1	0,1	9	500	48
1	0,1	9,5	500	44
1	0,1	10	500	39
1	0,5	8,5	500	60
1	0,2	8,5	500	69
1	0,3	8,5	500	66
1	0,4	8,5	500	58



Şekil 3.22 Kalkopirit flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi



Şekil 3.23 Kalkopirit flotasyonunda pH miktarına bağlı verim değişimi



Şekil 3.24 Kalkopirit flotasyonunda hava miktarına bağlı verim değişimi

Tablo 3.7’de ve Şekil 3.23-3.25’de görüldüğü gibi, flotasyon koşulları toplayıcı miktarı 500 g/t, pH = 8,5 ve hava miktarı 0,1 L/dk flotasyon koşulları olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda %77 verim elde edilmiştir. Toplayıcı miktarıyla verimin

yaklaşık orantılı olarak arttığı görülmektedir. pH miktarına bakıldığında ise pH = 8,5'e kadar verimin artışı daha sonraki pH değerlerinde ise verimin azaldığı görülmektedir. Hava miktarı ile verim ters orantılı olarak değişmektedir. Hava miktarı arttıkça verimin azalmaktadır.

3.3.4 Sfaleritin Flotasyon Koşullarının Belirlenmesi

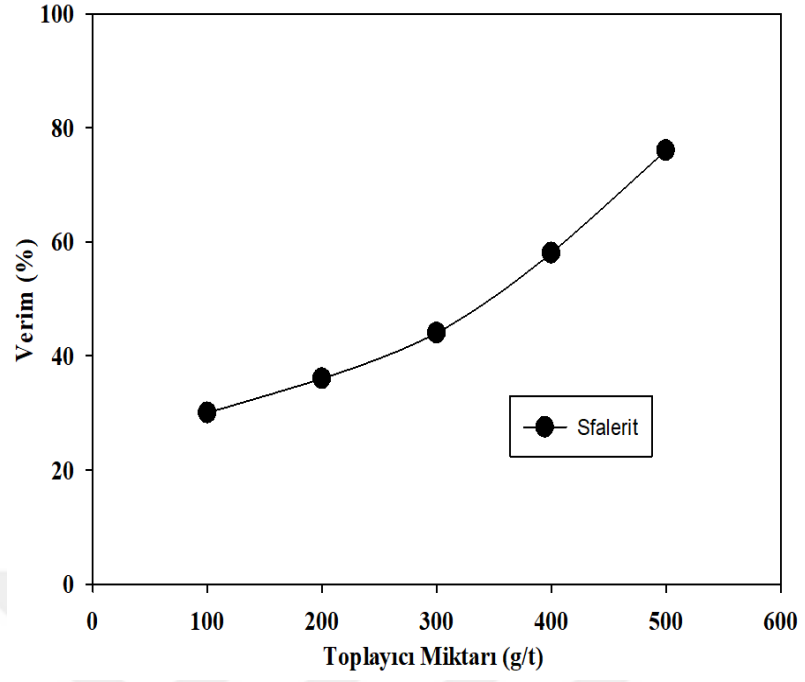
Flotasyon testlerinde pH, toplayıcı miktarı ve hava miktarı için flotasyon koşulları araştırılmıştır. Flotasyon Test koşulları Tablo 3.8'de, sonuçları Tablo 3.9'da ve Şekil 3.26-3.28'de verilmiştir.

Tablo 3.8 Sfaleritin flotasyon koşulları

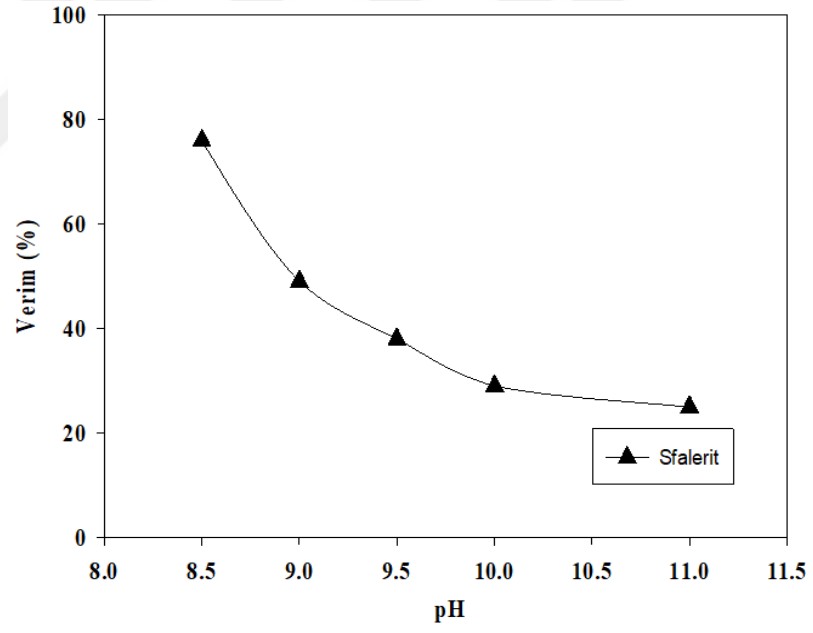
Katı miktarı (g)	1
Hava miktarı (L/dk)	0,1/0,2/0,3/0,4/0,5
KAX miktarı (g/t)	100/200/300/400/500
pH	8,5/9/9,5/10/11

Tablo 3.5 Sfalerit mineralinin flotasyon şartları ve sonuçları

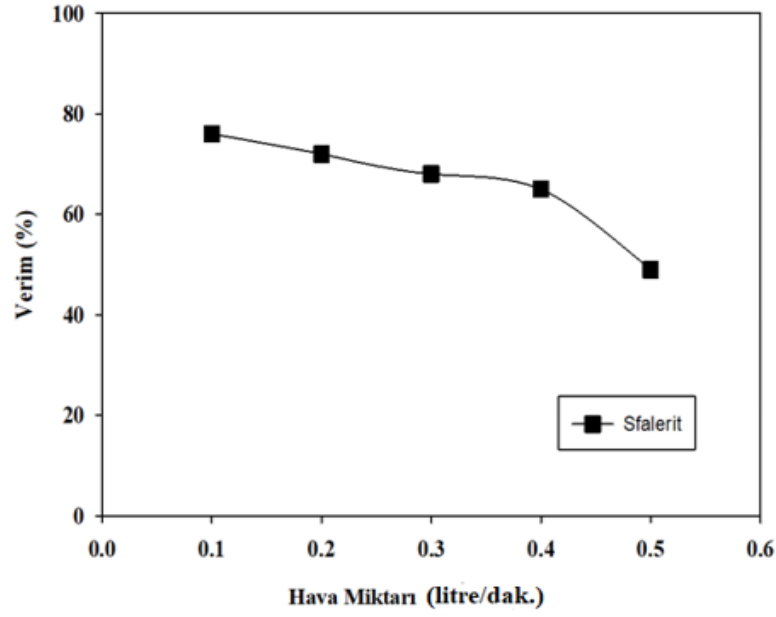
Katı miktarı (g)	Hava miktarı (L/dk)	pH	Toplayıcı miktarı (g/t)	Verim (%)
1	0,1	8,5	100	30
1	0,1	8,5	200	36
1	0,1	8,5	300	44
1	0,1	8,5	400	58
1	0,1	8,5	500	76
1	0,1	9	500	49
1	0,1	9,5	500	38
1	0,1	10	500	29
1	0,1	11	500	25
1	0,5	8,5	500	49
1	0,2	8,5	500	72
1	0,3	8,5	500	68
1	0,4	8,5	500	65
1	0,1	8,5	500	48
1	0,1	8,5	500	42
1	0,1	8,5	500	25
1	0,1	8,5	500	18



Şekil 3.25 Sfalerit flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi



Şekil 3.26 Sfalerit flotasyonunda pH miktarına bağlı verim değişimi



Şekil 3.27 Sfalerit flotasyonunda hava miktarına bağlı verim değişimi

Tablo 3.9’da ve Şekil 3.26-3.28’deki verilere göre sfalerit veriminin en yüksek olduğu flotasyon koşulları şu şekildedir; toplayıcı miktarı 500 g/t, pH 8,5 ve hava miktarının 0,1 L/dk olarak belirlenmiştir. Bu flotasyon koşullarında %76 verim elde edilmiştir. Toplayıcı miktarı arttığında verim değeri artmaktadır. pH değeri 8,5 kadar olumlu etki yaparken daha yüksek pH değerlerinde olumsuz etki yapmaktadır. Hava miktarı arttıkça verimin diğer minerallerde olduğu gibi azaldığı görülmektedir.

Genel olarak sülfürlü minerallerin flotasyon koşullarını belirlemek için yapılan araştırmalarda, toplayıcı miktarına bağlı olarak meydana gelen verimdeki artışın sebebi, toplayıcı miktarının arttıkça mineral yüzeylerine daha fazla miktarda toplayıcının bağlanması ve böylelikle hidrofob olan tüm taneleri yüzeybilir hale getirmesidir. Bu nedenle verimin arttırdığı düşünülmektedir. Ayrıca galen minerali diğer minerallere göre daha az toplayıcı miktarıyla yüzeyildiği görülmektedir. Galen mineralinin afinitesinin yüksek olmasından dolayı diğer minerallere göre daha kolay toplayıcı ile bağ kurabildiği için, diğer minerallere göre daha az miktarda toplayıcı ile yüzeyildiği düşünülmektedir.

pH miktarına bakıldığında, pirit pH = 6 asidik ortamda iyi derecede yüzüyor iken galen pH = 8, kalkopirit pH = 8,5 ve sfalerit pH = 8,5 bazik ortamlarda iyi yüzdüğü tespit edilmiştir. Piritin asidik, galen, kalkopirit ve sfalerit alkali ortamlarda iyi

yüzmesinin sebebi, bu ortamlarda mineral yüzey yüklerinin toplayıcıyla daha iyi bağ kurmasından dolayı verim değerlerinin artışı düşünülmektedir.

Hava miktarına bakıldığında ise, minerallerin hava miktarı arttıkça verimin düştüğü görülmektedir. Hava miktarının artmasıyla büyük boyutlu kabarcıklar oluşmaktadır. Büyük boyutlu kabarcıkların ise stabilitesi düşük olduğu için yüzeye çıkmadan patlamakta ve dolayısıyla verimin azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

3.4 Toplayıcı Miktarını Belirleme Testleri

Çalışmanın bu bölümünde, ultrasonik enerji kullanılarak konvensiyonel yöntemle göre daha az miktarda toplayıcı kullanarak yüksek verimlerde ürünler elde edilebilirliği mikro-flotasyon testleriyle araştırılmıştır. Testler de mikro-flotasyon testlerinde belirlenmiş olan en uygun toplayıcı miktarından geriye doğru daha az miktarlarda toplayıcı kullanılmıştır.

3.4.1 Galen Flotasyonunda Toplayıcı Miktarını Belirleme Testleri

Toplayıcı miktarının belirlenmesi için yapılan test koşulları Tablo 3.10’da verilmiştir. Araştırma sonuçları Tablo 3.11’de ve Şekil 3.29’da verilmiştir.

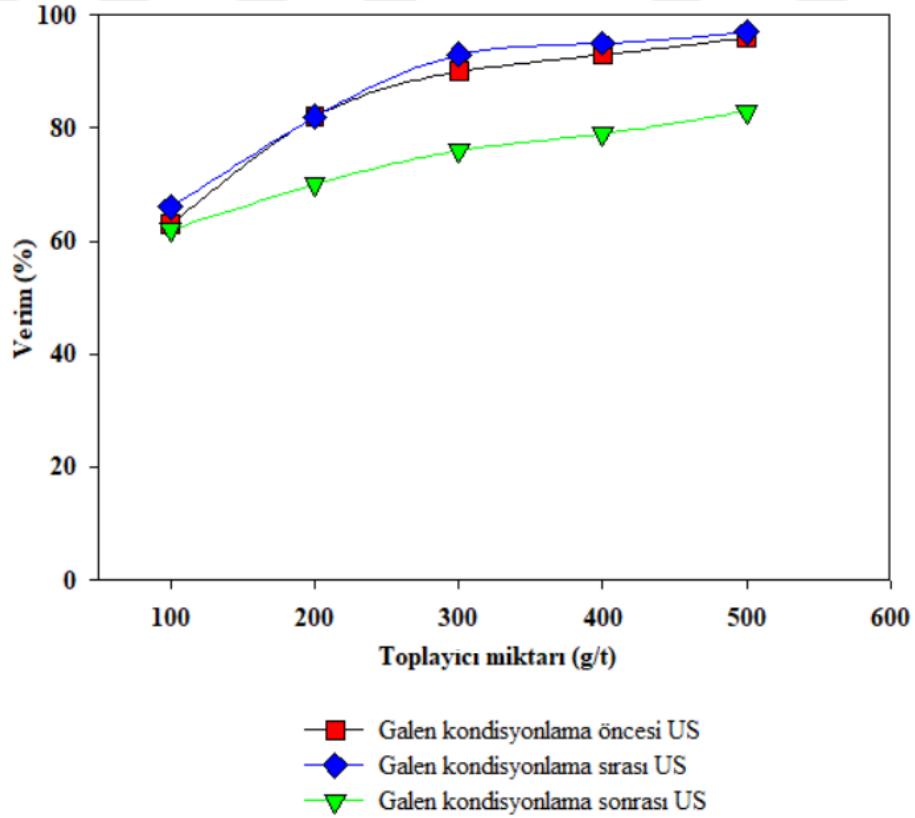
Tablo 36 Galenin toplayıcı miktarını belirleme test koşulları

Hava Miktarı (L/dk)	0,1
Toplayıcı Miktarı (g/t)	100/200/300/400/500
pH	8
Kondisyonlama süresi (dk)	2
Flotasyon süresi (dk)	5

Ultrasonik enerji kullanılmadan 500 g/t toplayıcı kullanılarak %88 Pb verimi elde edilmiştir. Kondisyonlama öncesi ultrasonik enerji uygulamasıyla 500 g/t toplayıcı kullanılarak %96 Pb verimi elde edilmiştir. Kondisyonlama boyunca 500 g/t toplayıcı kullanılarak %97 Pb verimi elde edilmiştir. Kondisyonlama sonrası 500 g/t toplayıcı kullanılarak %83 Pb verimine ulaşılmıştır. Toplayıcı miktarının azalması ile her üç durumda (kondisyon öncesi, kondisyonlama boyunca ve kondisyonlama sonrası) verimin azalarak %60’lar seviyesine düştüğü tespit edilmiştir.

Tablo 3.7 Galenin toplayıcı miktarını belirlemek için yapılan test sonuçları

Test No	Toplayıcı Miktarı (g/ton)	Kondisyon Öncesi US Süresi (sn)	Kondisyon Boyunca US Süresi (sn)	Kondisyon Sonrası US Süresi (sn)	US Uygulamalı Verim (%)	US Uygulamasız Verim (%)
G-0	500	-	-	-	-	88
G-1	500	60			96	
G-2	400	60			93	
G-3	300	60			90	
G-4	200	60			82	
G-5	100	60			63	
G-6	500		60		97	
G-7	400		60		95	
G-8	300		60		93	
G-9	200		60		82	
G-10	100		60		66	
G-11	500			60	83	
G-12	400			60	79	
G-13	300			60	76	
G-14	200			60	70	
G-15	100			60	62	



Şekil 3.28 Galen flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi

3.4.2 Pirit Flotasyonunda Toplayıcı Miktarını Belirlenme Testleri

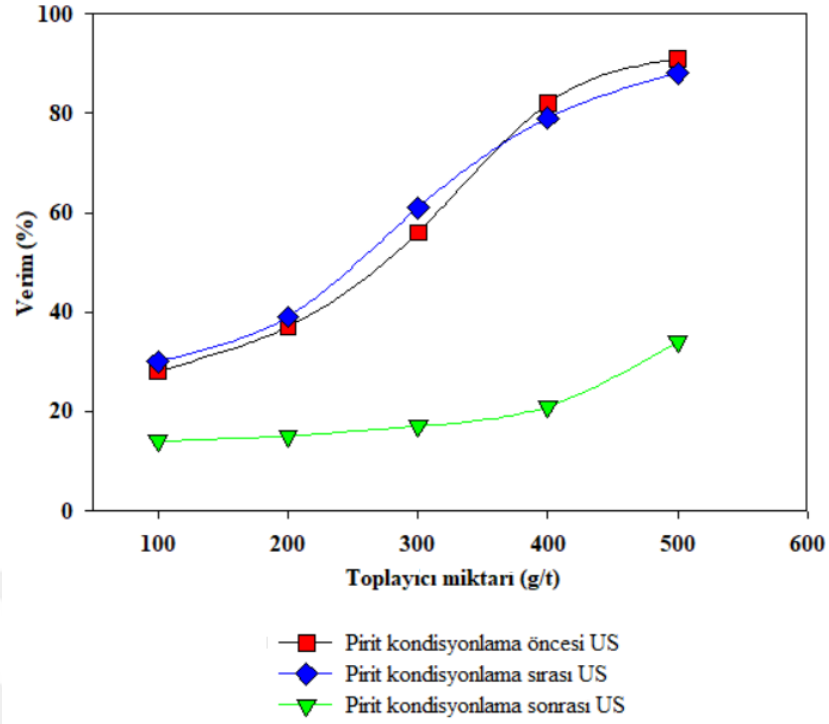
Toplayıcı miktarının belirlenmesi için yapılan test koşulları Tablo 3.12’de, test sonuçları Tablo 3.13’de ve Şekil 3.30’da verilmiştir.

Tablo 3.8 Piritin toplayıcı miktarını belirleme test koşulları

Hava miktarı (L/dk)	0,1
Toplayıcı miktarı (g/t)	100/200/300/400/500
pH	6
Kondisyonlama süresi (dk)	2
Flotasyon süresi (dk)	5

Tablo 3.9 Piritin toplayıcı miktarını belirlemek için yapılan test sonuçları

Test No	Toplayıcı Miktarı (g/ton)	Kondisyon Öncesi US Süresi (sn)	Kondisyon Boyunca US Süresi (sn)	Kondisyon Sonrası US Süresi (sn)	US Uygulamalı Verim (%)	US Uygulamasız Verim (%)
P-0	500	-	-	-	-	81
P-1	500	60	-	-	-	91
P-2	400	60	-	-	-	82
P-3	300	60	-	-	-	56
P-4	200	60	-	-	-	37
P-5	100	60	-	-	-	28
P-6	500	-	60	-	-	88
P-7	400	-	60	-	-	79
P-8	300	-	60	-	-	61
P-9	200	-	60	-	-	39
P-10	100	-	60	-	-	30
P-11	500	-	-	60	-	34
P-12	400	-	-	60	-	21
P-13	300	-	-	60	-	17
P-14	200	-	-	60	-	15
P-15	100	-	-	60	-	14



Şekil 3.290 Piritin flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi

Tablo 3.13’de ve Şekil 3.30’daki sonuçlar incelendiğinde ultrasonik enerji kullanılmadan 500 g/t toplayıcı kullanılarak %81 Fe verimi elde edilirken aynı miktarda toplayıcı kullanılarak kondisyonlama öncesi %91 Fe verimine ve kondisyonlama boyunca %88 Fe verimine ulaşılmıştır. Ancak, kondisyonlama sonrası 500 g/t toplayıcı kullanıldığında verimin %34 Fe düştüğü tespit edilmiştir.

Toplayıcı miktarının azalması ile hem kondisyon öncesi hemde kondisyonlama boyunca ultrasonik enerji kullanılarak verimin %30’lara kadar düştüğü, bununla birlikte ultrasonik enerji kondisyonlama sonrası kullanıldığında ise verimin %10’lara kadar düştüğü tespit edilmiştir.

3.4.3 Kalkopirit flotasyonunda Toplayıcı Miktarını Belirlenme Testleri

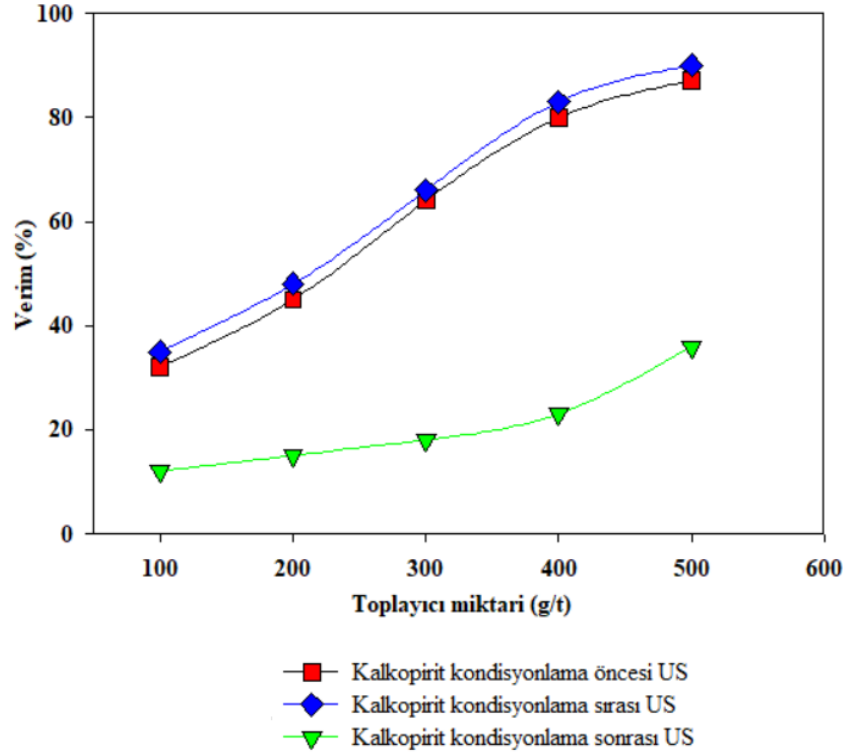
Kalkopiritin toplayıcı miktarını belirlenmek için yapılan test koşulları Tablo 3.14’de, test sonuçları ise Tablo 3.15’de ve Şekil 3.31’de verilmiştir.

Tablo 3.14 Kalkopirit toplayıcı miktarını belirleme test koşulları

Hava miktarı (L/dk)	0,1
Toplayıcı miktarı (g/t)	100/200/300/400/500
pH	8
Kondisyonlama süresi (dk)	2
Flotasyon süresi (dk)	5

Tablo 3.15 Kalkopiritin toplayıcı miktarını belirlemek için yapılan test sonuçları

Test No	Toplayıcı Miktarı (g/ton)	Kondisyon Öncesi US Süresi (sn)	Kondisyon Boyunca US Süresi (sn)	Kondisyon Sonrası US Süresi (sn)	US Uygulamalı Verim (%)	US Uygulamasız Verim (%)
K-0	500	-	-	-	-	83
K-1	500	60			87	
K-2	400	60			80	
K-3	300	60			64	
K-4	200	60			45	
K-5	100	60			32	
K-6	500		60		90	
K-7	400		60		83	
K-8	300		60		66	
K-9	200		60		48	
K-10	100		60		35	
K-11	500			60	36	
K-12	400			60	23	
K-13	300			60	18	
K-14	200			60	15	
K-15	100			60	12	



Şekil 3.30 Kalkopirit flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi

Tablo 3.15’de ve Şekil 3.31’deki sonuçlar değerlendirildiğinde, ultrasonik enerji uygulanmadan 500 g/t toplayıcı kullanılarak %83 Cu verimi elde edilirken ultrasonik enerji kondisyonlama öncesi uygulanmasıyla %87 Cu verimine ve kondisyonlama boyunca uygulanmasıyla %90 Cu verimine ulaşılmıştır. Fakat, kondisyonlama sonrası 500 g/t toplayıcı kullanıldığında verimin %35’e kadar düştüğü tespit edilmiştir. Verim değeri toplayıcı miktarının azalması ile birlikte her üç durumda da (kondisyon öncesi, kondisyonlama boyunca ve kondisyonlama sonrası) azalmıştır.

3.4.4 Sfalerit Flotasyonunda Toplayıcı Miktarını Belirlenme Testleri

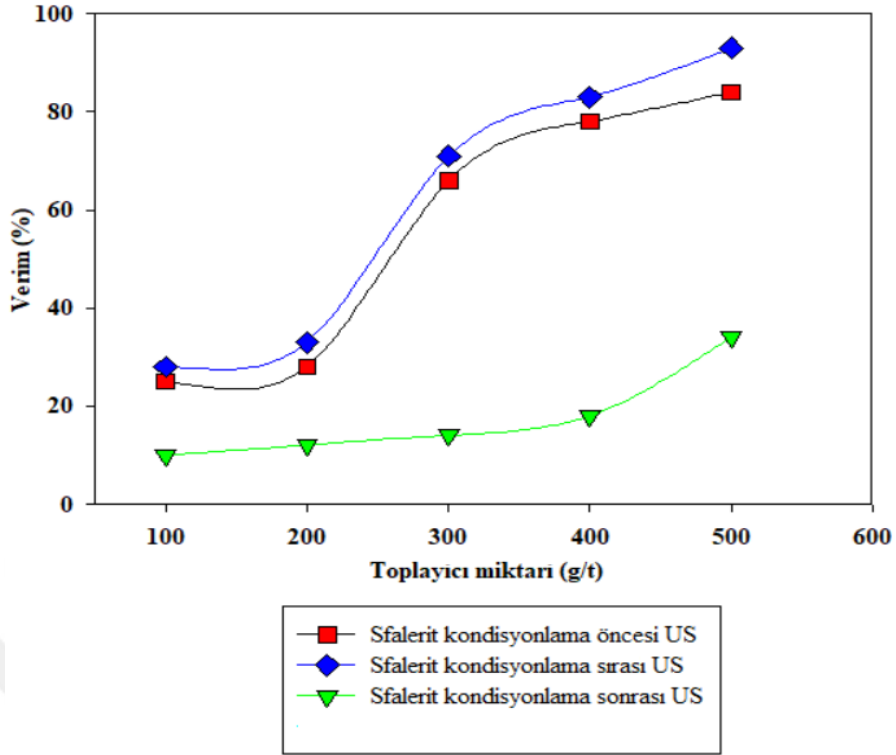
Sfaleritin toplayıcı miktarını belirlenmek için yapılan test koşulları Tablo 3.16’da, test sonuçları ise Tablo 3.17’de ve Şekil 3.32’de verilmiştir.

Tablo 3.10 Sflerit toplayıcı miktarının belirlenmesindeki test koşulları

Hava Miktarı (L/dk)	0,1
Toplayıcı Miktarı (g/t)	100/200/300/400/500
Canlandırıcı Miktarı (g/t)	800 g/t
pH	8,5
Kondisyonlama süresi (dk)	2
Flotasyon süresi (dk)	5

Tablo 3.17 Sfleritin toplayıcı miktarını belirlemek için yapılan test sonuçları

Test No	Toplayıcı Miktarı (g/ton)	Kondisyon Öncesi US Süresi (sn)	Kondisyon Boyunca US Süresi (sn)	Kondisyon Sonrası US Süresi (sn)	US Uygulamalı Verim (%)	US Uygulamasız Verim (%)
S-0	500	-	-	-	-	76
S-1	500	60	-	-	84	
S-2	400	60	-	-	78	
S-3	300	60	-	-	66	
S-4	200	60	-	-	28	
S-5	100	60	-	-	25	
S-6	500	-	60	-	93	
S-7	400	-	60	-	83	
S-8	300	-	60	-	71	
S-9	200	-	60	-	33	
S-10	100	-	60	-	28	
S-11	500	-	-	60	34	
S-12	400	-	-	60	18	
S-13	300	-	-	60	14	
S-14	200	-	-	60	12	
S-15	100	-	-	60	10	



Şekil 3.31 Sfaleritin flotasyonunda toplayıcı miktarına bağlı verim değişimi

Ultrasonik enerji uygulanmadan 500 g/t toplayıcı kullanılarak %76 Zn verimi elde edilirken aynı miktarda toplayıcı kullanıldığında kondisyonlama öncesi %84 Zn verimi ve kondisyonlama boyunca %93 Zn verimi elde edilmiştir. Fakat, kondisyonlama sonrası ise 500 g/t toplayıcı kullanıldığında verimin %34'e kadar düştüğü tespit edilmiştir. Toplayıcı miktarının azalmasıyla kondisyon öncesi ve kondisyonlama boyunca verimin %20'lere kadar düştüğü, diğer taraftan ultrasonik enerji kondisyonlama sonrası uygulanması durumunda ise verimin %10'a kadar düştüğü tespit edilmiştir.

Galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit minerallerine ultrasonik enerji kullanmadan tespit edilen toplayıcı miktarından geriye doğru, ultrasonik enerji kondisyonlama (öncesi, boyunca ve sonrası) uygulanarak yapılan araştırma testlerinde toplayıcı miktarı azaldıkça verimin düştüğü belirlenmiştir. Pirit, kalkopirit ve sfalerit kondisyonlama öncesi ve boyunca ultrasonik enerji uygulandığında genelde 300 g/t kadar verimde stabil azalma görülürken 300 g/t dan sonra keskin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Galen mineraline ise kondisyonlama öncesi, boyunca ve sonrası ultrasonik enerji uygulandığında toplayıcı miktarı azaldıkça verimde azalma görülmektedir, fakat bu

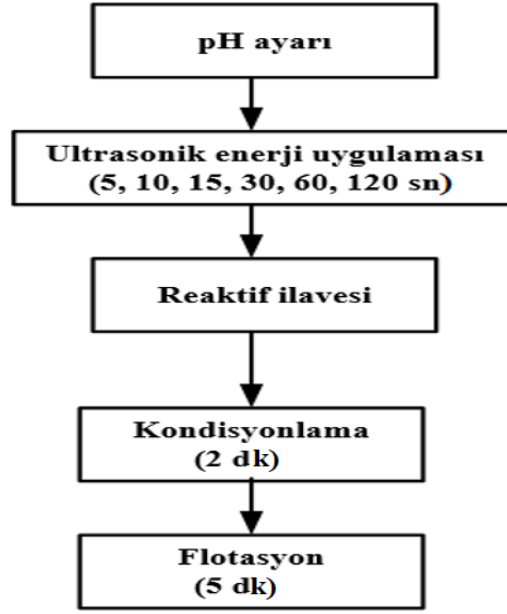
azalma diğer mineraller kadar değildir. Toplayıcı miktarı azalmasına paralel olarak mineral verim değerlerinin azalmasının başlıca nedeni, toplayıcı miktarı azaldığı için mineral tane yüzeylerine yeterli miktarda toplayıcı bağlanamaması ve bu nedenle verim değerlerinin azaldığı düşünülmektedir.

Genel olarak mineral ultrasonik enerji uygulandığında konvensiyonel yöntemle göre daha az toplayıcı kullanarak daha yüksek verimde ürünler elde edilebilir. Ultrasonik enerji mineral yüzeyindeki ince şlam tanelerini temizlediği için daha az toplayıcı kullanarak yüksek verimlere ulaşıldığı düşünülmektedir. Bu durum daha önce yapılan çalışmalarla paralellik göstermektedir (Çelik, 1988; Adrich ve Freng, 1999).

3.5 Ultrasonik Enerji Süresini Belirleme Testleri

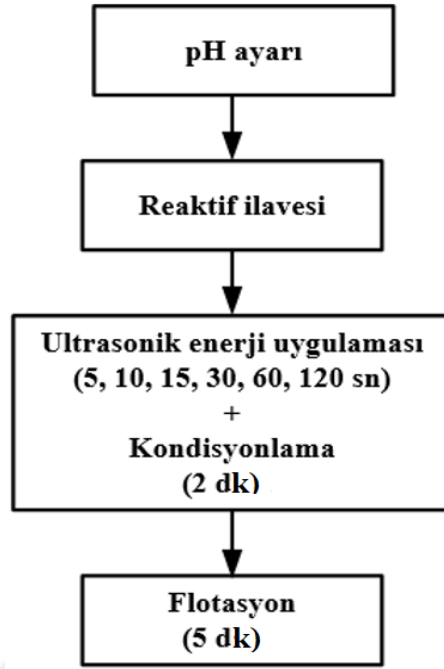
Bu bölümde galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit mineralleri kullanılarak üç farklı deney setinde ultrasonik enerji süresinin verim üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırmanın her üç setinde 5, 10, 15, 30, 60 ve 120 sn ultrasonik enerji uygulanmıştır (Çelik ve diğer., 2002).

Birinci test setinde; 250 ml beher içine 100 ml su ve 1 g malzeme ilave edilerek pülp oluşturulmuştur. Pülp'e flotasyon öncesi 5, 10, 15, 30, 60 ve 120 sn ultrasonik enerji verilmiştir. Ardından, pülp içine belirli oranda reaktifler ilave edildikten sonra 2 dk kondisyonlama işlemi yapılmıştır. Daha sonra, pülp Hallimond tüpüne konularak 5 dk boyunca flote edilmiştir. Ultrasonik enerji süresinin belirlenmesi için yapılan birinci test seti iş akım şeması Şekil 3.33'de verilmiştir.



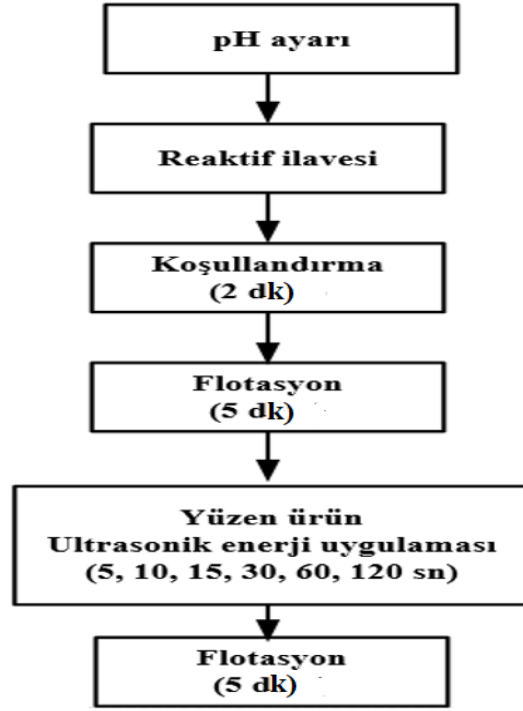
Şekil 3.32 Ultrasonik enerji süresinin belirleme testleri birinci test seti iş akım şeması

İkinci test setinde; 250 ml beher içine 100 ml su ve 1 g malzeme ilave edilerek pülp oluşturulmuştur. Pülp pH ayarlandıktan sonra, kondisyonlama boyunca 5, 10, 15, 30, 60 ve 120 sn ultrasonik enerji verilmiştir. Reaktif varlığında ultrasonik enerji uygulanmıştır. Toplam koşullandırma süresi, ultrasonik uygulama süresi artı 2 dk şeklinde yapılmıştır. Ultrasonik enerji uygulaması ve kondisyonlaması tamamlanan pülp, Halimond tüpünde 5 dk boyunca flotasyon işlemine tabi tutulmuştur. Ultrasonik enerji süresinin belirlenmesi için yapılan ikinci test seti iş akım şeması Şekil 3.34’de verilmiştir. Bu yapılan iki set testin amacı, ultrosonik enerji sayesinde tane yüzeylerindeki şamları ve oksit tabakalarını temizlenmesini sağlayarak tanelerin toplayıcıya daha iyi adsorpsiyon olduğu süreyi tespit etmektir.



Şekil 3.33 Ultrasonik enerji süresinin belirleme testleri ikinci test seti iş akım şeması

Üçüncü test setinde; üçüncü test setinde mineraller, ultrasonik enerji uygulanmaksızın bulunan koşullarda (pH ayarı, 2 dk reaktif koşullandırma ve hava uygulaması) yapıldıktan sonra 5 dk boyunca flote edilmiştir. Yüzen ürünler 0,1 L hacimli destile edilmiş su içeren kap içersine konularak birinci ve ikinci setlere benzer şekilde ultrasonik enerji 5, 10, 15, 30, 60 ve 120 sn uygulanmıştır. Ultrasonik enerji uygulaması tamamlanan ürünler Hallimond tüpüne aktarıldıktan sonra 5 dk boyunca flotasyon işlemi yapılmıştır. Üçüncü test setinin amacı, ultrasonik enerjinin mineral tane yüzeyleri üzerindeki ayırt edici canlandırma yada bastırma etkisini yaptığı süreyi belirlemektir. Üçüncü test seti iş akım şeması Şekil 3.35’de verilmiştir.



Şekil 3.34 Ultrasonik enerji süresinin belirleme testleri üçüncü test seti iş akım şeması

3.5.1 Galen flotasyonunda ultrasonik enerji süresinin belirleme testleri

Galen flotasyonunda ultrasonik enerji süresinin belirlenmesi için daha önce saf mineraller ile belirlemiş olduğumuz flotasyon koşullarında araştırmalar yapılmıştır (Tablo 3.3), (Şekil 3.17-3.19). Galen flotasyon test koşulları Tablo 3.18’de, test sonuçları Tablo 3.19’da ve Şekil 3.36’da verilmiştir.

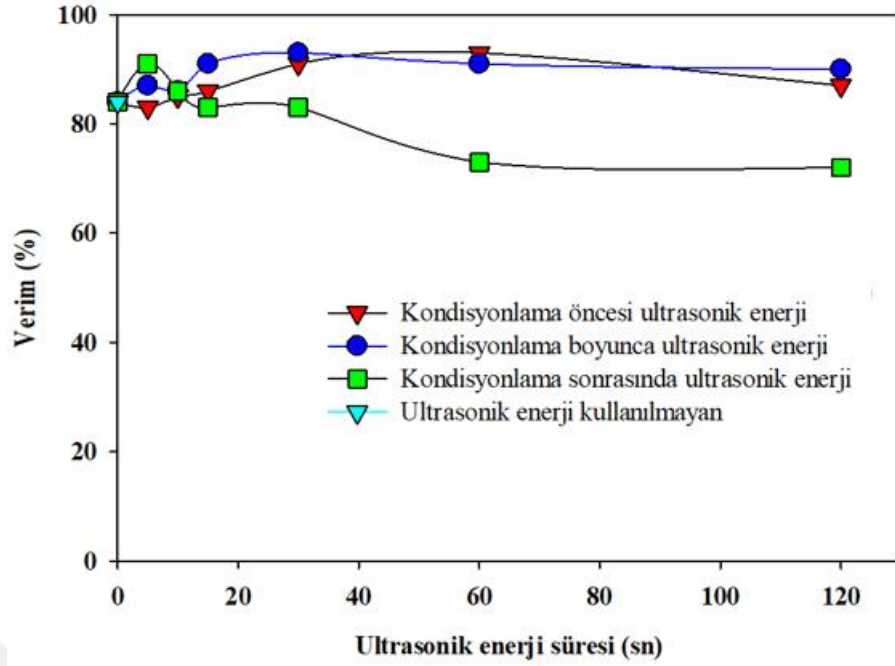
Tablo 3.11 Galenin ultrasonik enerji süresinin belirlenmesinde kullanılan test koşulları

Katı miktarı (g)	1					
Hava miktarı (L/dk)	0,1					
Toplayıcı miktarı (g/t)	250					
pH	8					
Kondisyonlama süresi (dk)	2					
Flotasyon süresi (dk)	5					
Ultrasonik enerji süresi (sn)	5	10	15	30	60	120

Tablo 3.19’da ve Şekil 3.36’daki test sonuçları incelendiğinde kondüsyonlama öncesi ve kondüsyonlama boyunca ultrasonik enerji uygulandığında verimde konvensiyonel yöntemle göre artma meydana geldiği tespit edilmiştir. Ancak, kondüsyonlama sonrası ultrasonik enerji uygulandığında ise konvensiyonel yöntemle göre verimin önce arttığı daha sonra giderek azaldığı görülmektedir. Ultrasonik enerji kullanılmadan flotasyon yapıldığında verim %84 iken, kondüsyonlama öncesi 60 sn’de %93 verim, kondüsyonlama boyunca 30 sn’de %93 verim ve kondüsyonlama sonrası 5 sn de %91 verime ulaşabildiği görülmektedir.

Tablo 3.12 Galenin ultrasonik enerji süresini tespit için yapılan test sonuçları

Test No	Kondisyon Öncesi US Süresi (sn)	Kondisyon Boyunca US Süresi (sn)	Kondisyon Sonrası US Süresi (sn)	US Uygulamalı Verim (%)	US Uygulamasız Verim (%)
G-0	-	-	-	-	84
G-1	5			83	
G-2	10			85	
G-3	15			86	
G-4	30			91	
G-5	60			93	
G-6	120			87	
G-7		5		87	
G-8		10		86	
G-9		15		91	
G-10		30		93	
G-11		60		91	
G-12		120		90	
G-13			5	91	
G-14			10	86	
G-15			15	83	
G-16			30	83	
G-17			60	73	
G-18			120	72	



Şekil 3.35 Galen ultrasonik enerji süresi bağlı olarak verim değişimi

3.5.2 Pirit Flotasyonunda Ultrasonik Enerji Süresinin Belirleme Testleri

Ultrasonik enerji süresinin tespiti için daha önceki araştırmalarımızda belirlemiş olduğumuz flotasyon koşulları dikkate alınarak testler yapılmıştır (Tablo 3.5) (Şekil 3.20-3.22). Pirit için flotasyon test koşulları Tablo 3.20’de, test sonuçları Tablo 3.21’de ve Şekil 3.37’de verilmiştir.

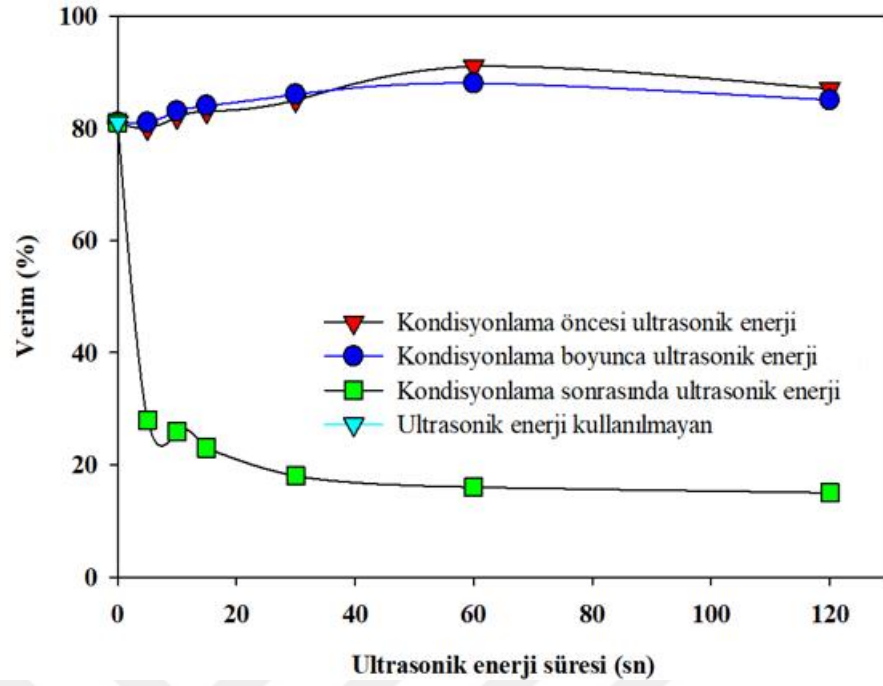
Tablo 3.13 Piritin ultrasonik enerji süresinin belirlenmesinde kullanılan test koşulları

Katı miktarı (g)	1					
Hava miktarı(L/dk)	0,1					
Toplayıcı miktarı (g/t)	500					
pH	6					
Kondisyonlama süresi (dk)	2					
Flotasyon süresi (dk)	5					
Ultrasonik enerji süresi (sn)	5	10	15	30	60	120

Tablo 3.21 ve Şekil 3.37’deki test sonuçları incelendiğinde konvansiyonel yöntemle göre, ultrasonik enerji kondüsyonlama öncesi ve kondüsyonlama boyunca uygulandığında verim değeri artmasına rağmen koşullandırma sonrasında ultrasonik enerji uygulandığında ise verimin azaldığı tespit edilmiştir. Ultrasonik enerji kullanılmadan flotasyon yapıldığında verim %81 iken, kondüsyonlama öncesi 60 sn’de % 91 verim, kondüsyon boyunca 60 sn’de %88 verim ve kondüsyon sonrası 5 sn de %28 verim elde edilmiştir. Piritin ultrasonik enerji süresi, kondisyonlama öncesi ve kondisyonlama sonrasında 60 sn, kondisyonlama sonrası ultrasonik enerji süresi 5 sn olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 3.14 Piritin ultrasonik enerji süresini tespit için yapılan test sonuçları

Test No	Kondisyon Öncesi US Süresi (sn)	Kondisyon Boyunca US Süresi (sn)	Kondisyon Sonrası US Süresi (sn)	US Uygulamalı Verim (%)	US Uygulamasız Verim (%)
P-0	-	-	-	-	81
P-1	5			80	
P-2	10			82	
P-3	15			83	
P-4	30			85	
P-5	60			91	
P-6	120			87	
P-7		5		81	
P-8		10		83	
P-9		15		84	
P-10		30		86	
P-11		60		88	
P-12		120		85	
P-13			5	28	
P-14			10	26	
P-15			15	23	
P-16			30	18	
P-17			60	16	
P-18			120	15	



Şekil 3.36 Pirit ultrasonik enerji süresi bağlı olarak verim değişimi

3.5.3 Kalkopiritin Flotasyonunda Ultrasonik enerji Süresinin Belirleme Testleri

Kalkopiritin flotasyonunda ultrasonik enerji süresinin tespit etmek için daha önce saf minerallerle yapmış olan araştırma sonuçları değerlendirilerek flotasyon koşulları belirlenmiştir (Tablo 3.7) (Şekil 3.23-3.25). Kalkopiritin flotasyon test koşulları Tablo 3.22’de, test sonuçları Tablo 3.23’de ve Şekil 3.38’de verilmiştir.

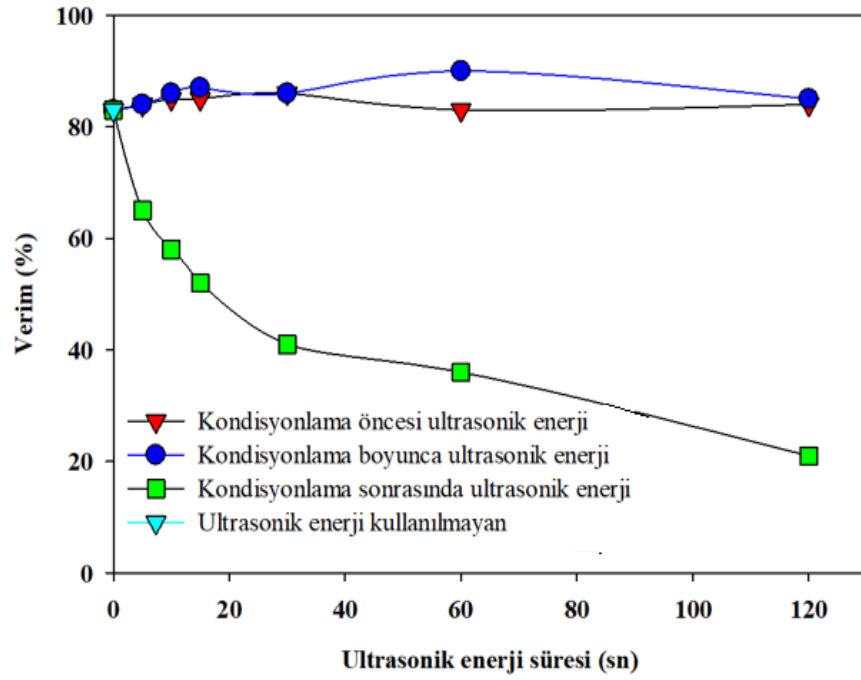
Tablo 3.15 Kalkopiritin ultrasonik enerji süresinin belirlenmesinde kullanılan test koşulları

Katı miktarı (g)	1					
Hava miktarı(L/dk)	0,1					
Toplayıcı miktarı (g/t)	500					
pH	8,5					
Kondisyonlama süresi (dk)	2					
Flotasyon süresi (dk)	5					
Ultrasonik enerji süresi (sn)	5	10	15	30	60	120

Kalkopirit mineralinin ultrasonik enerji süresini tespit için yapılan test sonuçları Tablo 3.23’de ve Şekil 3.38’de verilmiştir. Deyensel çalışmalar sonucunda; kondüsyonlama öncesi ve kondüsyonlama boyunca ultrasonik enerji uygulandığında verimde konvensiyonel yöntemle göre artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Ancak, kondüsyonlama sonrası ultrasonik enerji uygulandığında ise konvensiyonel yöntemle göre verimin azaldığı tespit edilmiştir. Ultrasonik enerji kullanılmadan flotasyon yapıldığında verim %83 iken, kondüsyon öncesi 60 sn’de %87 verim, kondüsyon boyunca 60 sn’de %90 verim ve kondüsyon sonrası 5 sn de %65 verime ulaşılabileceği görülmektedir

Tablo 3.16 Kalkopiritin ultrasonik enerji süresini tespit için yapılan test sonuçları

Test No	Kondisyon Öncesi US Süresi (sn)	Kondisyon Boyunca US Süresi (sn)	Kondisyon Sonrası US Süresi (sn)	US Uygulamalı Verim (%)	US Uygulamasız Verim (%)
K-0	-	-	-		83
K-1	5			84	
K-2	10			85	
K-3	15			85	
K-4	30			86	
K-5	60			87	
K-6	120			84	
K-7		5		84	
K-8		10		86	
K-9		15		87	
K-10		30		86	
K-11		60		90	
K-12		120		85	
K-13			5	65	
K-14			10	58	
K-15			15	52	
K-16			30	41	
K-17			60	36	
K-18			120	21	



Şekil 3.37 Kalkopiritin ultrasonik enerji süresi bağlı olarak verim değişimi

3.5.4 Sfalerit Ultrasonik Enerji Süresinin Belirlenme Testleri

Sfalerit flotasyonunda ultrasonik enerji süresinin tespiti için önceki araştırmalarımızda belirlemiş olduğumuz flotasyon koşulları dikkate alınarak flotasyon testleri yapılmıştır (Tablo 3.9) ve (Şekil 3.26-3.28). Mineralin test koşulları Tablo 3.24’de, test sonuçları Tablo 3.25’de ve Şekil 3.39’da verilmiştir.

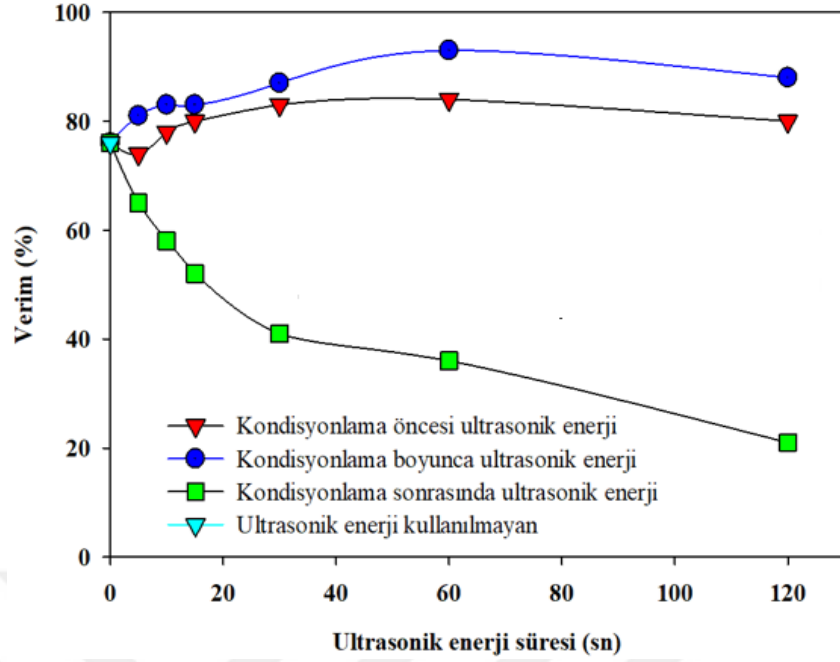
Tablo 3.17 Sfaleritin ultrasonik enerji süresinin belirlenmesinde kullanılan test koşulları

Katı miktarı (g)	1					
Hava miktarı(L/dk)	0,1					
Toplayıcı miktarı (g/t)	500					
Canlandırıcı miktarı (g/t)	800					
pH	8,5					
Kondisyonlama süresi (dk)	2					
Flotasyon süresi (dk)	5					
Ultrasonik enerji süresi (sn)	5	10	15	30	60	120

Sfalerit mineraline ultrasonik enerji süresini belirlemek için yapılan testlerin sonuçlarına bakıldığında konvensiyonel yöntemle göre, kondüsyonlama öncesi ve kondüsyonlama boyunca ultrasonik enerji uygulandığında verimin arttığı tespit edilmiştir. Ancak kondüsyonlama sonrasında ultrasonik enerji uygulandığında ise verimin azaldığı tespit edilmiştir. Konvensiyonel yöntemle flotasyon yapıldığına verim %76 iken ultrasonik enerji kondüsyon öncesi 60 sn'de uygulandığında %84 verim, kondüsyon boyunca 60 sn'de %93 verim ve kondüsyonlama sonrası 5 sn'de %65 verime elde edilmiştir.

Tablo 3.18 Sfaleritin ultrasonik enerji süresini tespit için yapılan çalışma sonuçları

Test No	Kondisyon Öncesi US Süresi (sn)	Kondisyon Boyunca US Süresi (sn)	Kondisyon Sonrası US Süresi (sn)	US Uygulamalı Verim (%)	US Uygulamasız Verim (%)
S-0	-	-	-	-	76
S-1	5			74	
S-2	10			78	
S-3	15			80	
S-4	30			83	
S-5	60			84	
S-6	120			80	
S-7		5		81	
S-8		10		83	
S-9		15		83	
S-10		30		87	
S-11		60		93	
S-12		120		88	
S-13			5	68	
S-14			10	65	
S-15			15	48	
S-16			30	42	
S-17			60	25	
S-18			120	18	



Şekil 3.38 Sfaleritin ultrasonik enerji süresine bağlı olarak verim değişimi

Ultrasonik enerji süresinin belirlenmesi için yapılan testlerde, galen pirit, kalkopirit ve sfalerit kondisyonlama öncesi ve boyunca ultrasonik enerji uygulandığında süre arttıkça veriminde 60 sn kadar artmış olduğu, fakat daha sonra düşmeye başladığı görülmektedir. Minerallerin süreye bağlı olarak verimdeki artışın sebebi ultrasonik enerjinin 60 sn ye kadar tane yüzeyindeki oksit ve şlam tabakalarını temizlediği için toplayıcı reaktif mineral yüzeyini daha iyi kapladığı ve böylece verimin arttığı düşünülmektedir. Minerellerinin 60 sn'den sonra verimin düşmesinin sebebi ise ultrasonik enerjinin tane yüzeylerini aşındırmaya başlamasıyla tekrar şlam oluştuğu, ve bu şlamın toplayıcının mineral yüzeyinin kaplanmasını engellediği için verimin azaldığı düşünülmektedir.

Kondisyonlama sonrasında ise ultrasonik enerji uygulandığında galen veriminde çok az bir azalma meydana gelirken pirit, kalkopirit ve sfalerit verimin çok fazla azalma görülmektedir. Kondisyonlama sonrasında pirit, kalkopirit ve sfalerit süreye bağlı olarak verimdeki düşüşün sebebi ultrasonik enerjinin tane yüzeylerini aşındırmaya başlamasıyla tekrar şlam oluştuğu ve bu şlamın toplayıcının mineral yüzeyinin kaplanmasını engellediği için verimin azaldığı düşünülmektedir. Galenin diğer minerallere göre afinitesi yüksek olması ve tane yüzeyinde aşınma daha uzun

sürede başladığı için verim diğer minerallere göre yüksektir ve galen yüzmeye devam ettiği düşünülmektedir.

Galen pirit, kalkopirit ve sfalerit için kondisyonlama öncesi ve boyunca en uygun ultrasonik enerji süresi 60 sn, kondisyonlama sonrası ise en uygun ultrasonik enerji süresi 5 sn'dir. Kondisyonlama sonrası ultrasonik enerji uygulandığında galen hariç tüm minerallerin verimi düşmektedir. Bu durum galenin kondisyonlama sonrası uygulandığında galen diğer minerallerden selektif şekilde ayrılabilceğinin göstergesidir.

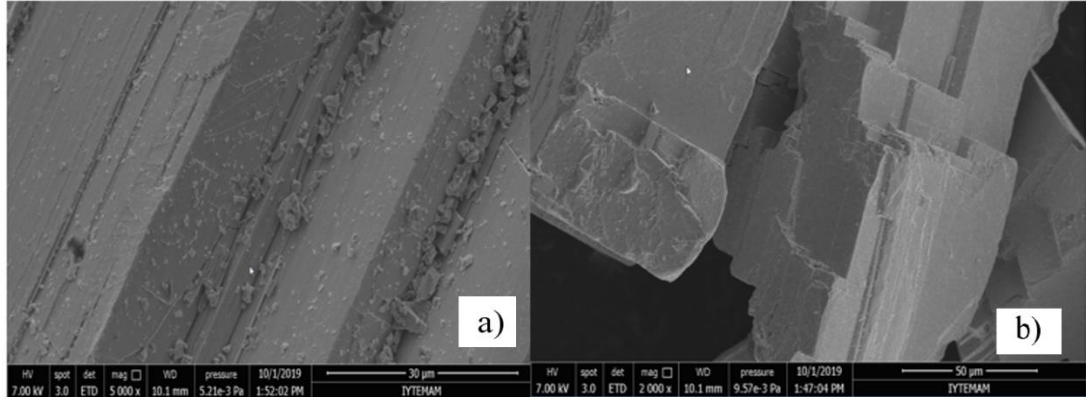
Genel olarak değerlendirildiğinde, galen pirit, kalkopirit ve sfalerit kondisyonlama öncesi ve boyunca ultrasonik enerji uygulandığında selektivite ve verim değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu selektivite ve verimdeki artış önceki yapılan çalışmalara paralel olduğu tespit edilmiştir (Aldrich ve Feng, 1999; Gürpınar, 2007; Çilek ve Özgen, 2009; Özün ve diğer., 2019; Güngören ve diğer., 2016). Önceki yapılan çalışmalardan farklı olarak, galen pirit, kalkopirit ve sfalerit kondisyonlama sonrasında ultrasonik enerji uygulandığında belirli süreye kadar galen hariç tüm minerallerin verimi düşmektedir. Bu tespit edilen özellikten yararlanılarak galen pirit, kalkopirit ve sfalerit kondisyonlama sonrası ultrasonik enerji uygulandığında diğer minerallerden ayrılabilceği tespit edilmiştir.

3.6 Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) Analizleri

Saf galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit minerallerinin yüzeylerindeki şlam tanerini incelemek için SEM görüntüleri çekilmiştir. SEM analizlerinde JEOL SEM-7100 elektron mikroskobu kullanılmıştır. Ultrasonik enerji uygulanarak ve uygulanmadan yapılan testlerde elde edilen bazı ürünlere SEM görüntü analizi yapılmıştır. SEM görüntü analizleri Şekil 3.40-3.43'de verilmiştir.

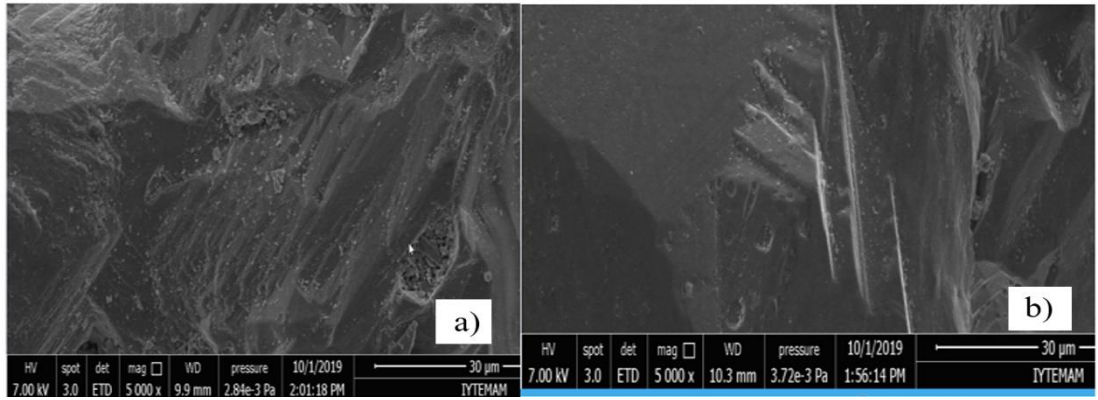
Ultrasonik enerji uygulanmayan SEM görüntüleri, galen (Tablo 3.19'da G-0), pirit (Tablo 3.21'de P-0), kalkopirit (Tablo 3.23'de K-0) ve sfalerit (Tablo 3.25'de S-0) çekilmiştir.

Ultrasonik enerji uygulanan SEM görüntüleri, galen (Tablo 3.19'da G-5), pirit (Tablo 3.21'de P-5, kalkopirit (Tablo 3.23'de K-5) ve sfalerit (Tablo 3.25'de S-5) çekilmiştir.



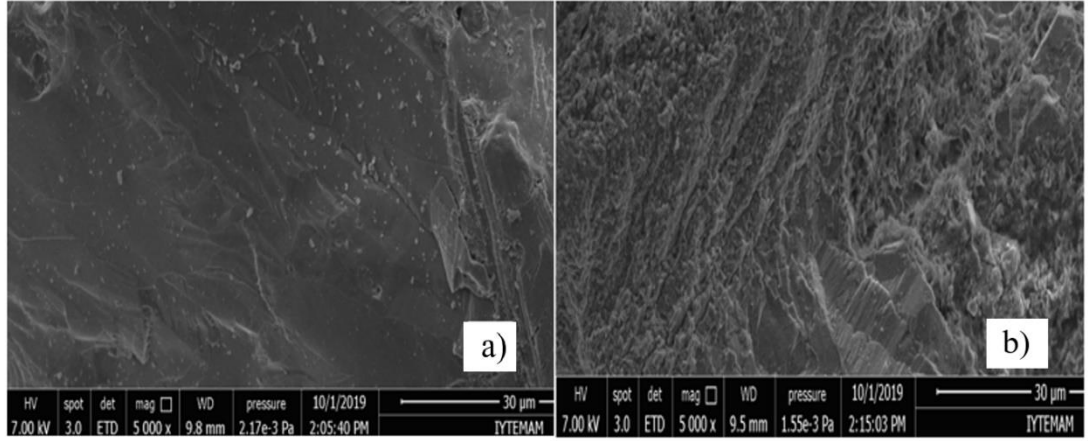
Şekil 3.39 Galen SEM görüntü analizleri (a: ultrasonik işlem görmemiş, b: ultrasonik işlem görmüş)

Şekil 3.40’da galen mineralinin SEM görüntüleri incelendiğinde, ultrasonik enerji kullanılmayan mineral yüzeylerinde bir çok şlam taneleri gözlemlenirken, ultrasonik enerji kullanılan minerallerin tane yüzeylerinde ise şlam tanelerinin olmadığı gözlemlenmiştir.

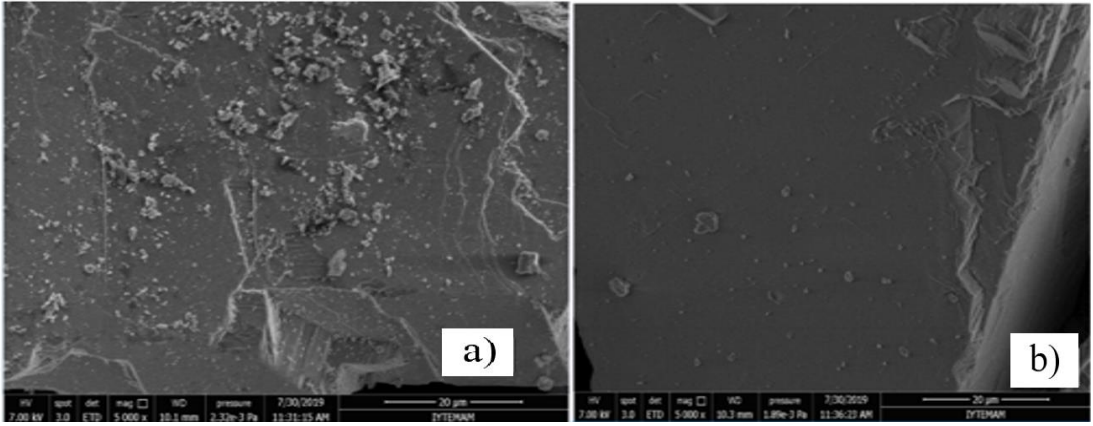


Şekil 3.40 Pirit SEM görüntü analizleri (a: ultrasonik işlem görmemiş, b: ultrasonik işlem görmüş)

Şekil 3.41’deki pirit mineralinin SEM görüntüleri incelendiğinde galen mineraline benzer şekilde ultrasonik enerji kullanılmayan pirit mineralinin yüzeyinde şlam taneleri görülürken, ultrasonik enerji kullanılan pirit mineralinin yüzeyinin ise temiz olduğu görülmektedir.



Şekil 3.41 Kalkopirit SEM görüntü analizleri (a: ultrasonik işlem görmemiş, b: ultrasonik işlem görmüş)



Şekil 3.42 Sfalerit SEM görüntü analizleri (a: Ultrasonik işlem görmemiş, b: Ultrasonik işlem görmüş)

Kalkopirit Şekil 3.42 ve sfalerit Şekil 3.43’de minerallerin SEM görüntüleri incelendiğinde ultrasonik enerji uygulanmayan yüzeylerde toz tabakası gözlemlenirken, ultrasonik enerji kullanılan minerallerin yüzeyinin temiz olduğu tespit edilmiştir.

Genel olarak saf minerallere yapılan SEM analizlerine göre, galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit yüzeyine ultrasonik enerji koşullandırma öncesi uygulandığında ultrasonik enerji mineral yüzlerindeki ince toz tabakalarını temizlemekte ve aynı zamanda oksit tabakalarını temizlediği düşünülmektedir. Ultrasonik enerji sayesinde minerallerin yüzeyleri temizlendiği için verimde artış meydana gelmektedir.

3.7 Fourier Transform Infrared (FTIR) Spektroskopisi Analizleri

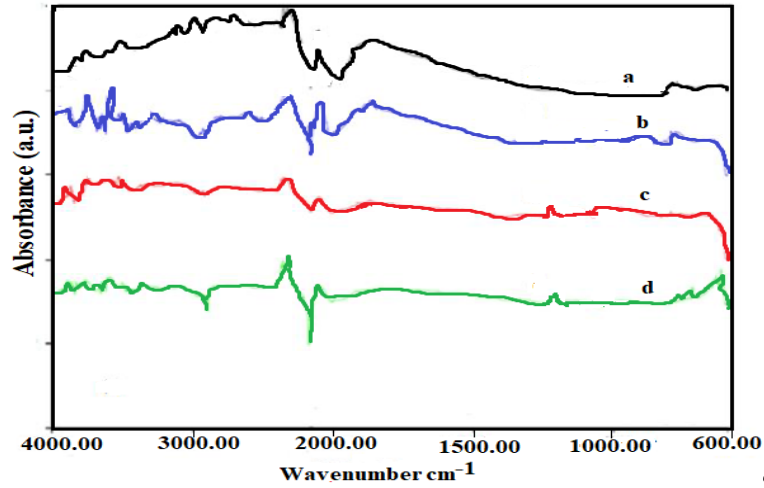
Fourier Transform Infrared (FTIR) spektroskopisi, organik veya inorganik bileşiklerin karakterize edilmesi amacıyla kullanılan bir araçtır. Her maddenin kendine has bir spektruma sahiptir. (FTIR) maddeyi oluşturan atomlar arasındaki bağların titreşimiyle oluşan frekanslara karşılık gelen absorpsiyon piklerini göstermektedir. Fourier Transform Infrared (FTIR) spektroskopisinde, moleküllerin IR ışığını ($400-4000\text{ cm}^{-1}$ dalga sayılı) adsorpsiyonuyla titreşim yaparak kimyasal kompozisyonda herhangi bir değişiklik olup olmadığını tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır (Büyüksirt ve Kuleasan, 2014).

Minerallerin büyük çoğunluğunun KAX (Potasyum Amil ksantat) ile yapmış olduğu bağlar ($400-4000\text{ cm}^{-1}$) dalga boyu aralığında yer almaktadırlar. KAX sülfürlü minerallerle C-O-C bağını oluşturmaktadır. Sülfür minerali ile KAX reaktifi arasında oluşan bağa dixsantojen denir. Dixsantojen (AX_2) mineral yüzeyinde oluştuğunda dalga boyu $1240-1270\text{ cm}^{-1}$ şeklinde ölçülmektedir (Fuerstenau ve Miller 1968; Leja, 1982; Persson, 1991; Hosseini ve diğer., 2007).

Mineral yüzeyinde, mineral ile KAX arasında dixsantojen (AX_2) bağının oluşup oluşmadığını belirlemek amacıyla, ultrasonik enerji uygulanmayan ve ultrasonik enerji uygulanan minerallerin FTIR analizleri yapılmıştır. (FTIR) analizleri Şekil 3.44-3.47’de verilmiştir.

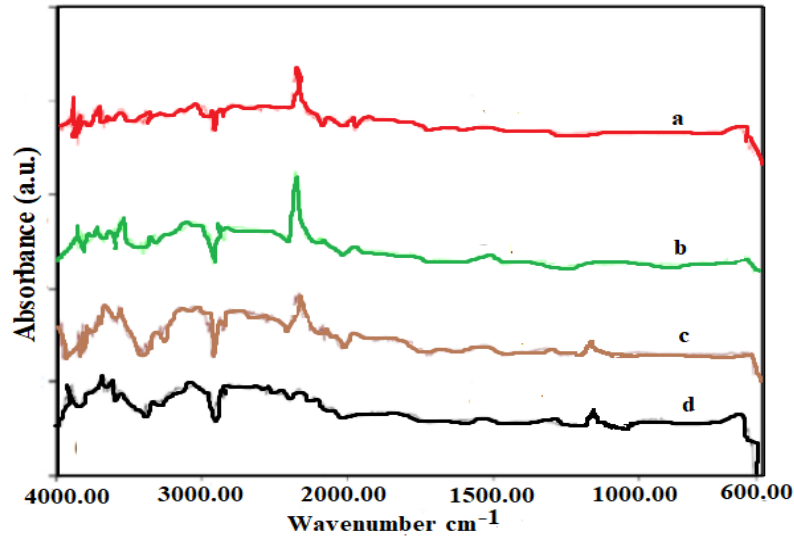
Fourier Transform Infrared (FTIR) Spektroskopisi, ultrasonik enerji uygulanmayan galen (Tablo 3.19’de G-0), pirit (Tablo 3.21’de P-0), kalkopirit (Tablo 3.23’de K-0,) ve sfalerit (Tablo 3.25’de S-0) ürünlerine analiz yapılmıştır.

Fourier Transform Infrared (FTIR) Spektroskopisi, ultrasonik enerji uygulanan galen (Tablo 3.19’de G-5, G-10 ve G-18), pirit (Tablo 3.21’de P-5, P-11 ve P-18), kalkopirit (Tablo 3.23’de K-5, K10 ve K-18) ve sfalerit (Tablo 3.25’de S-5, S-10 ve S-18) ürünlerine analiz yapılmıştır.

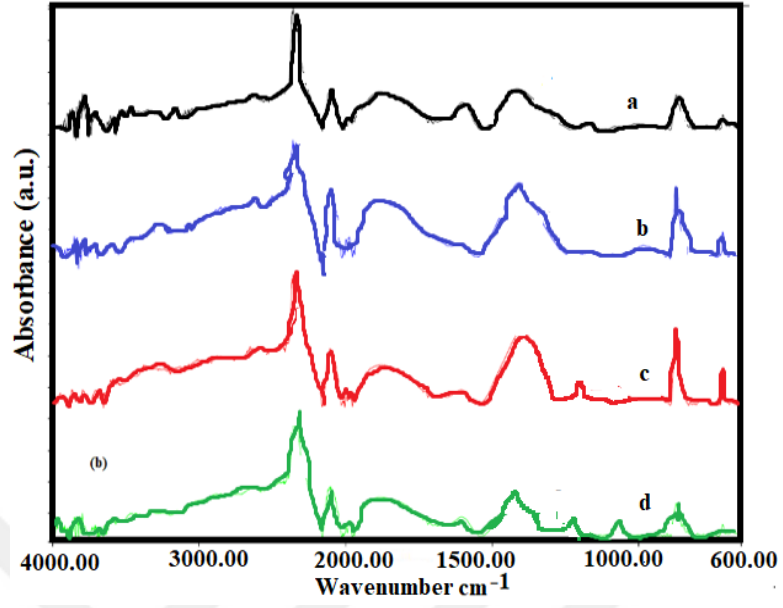


Şekil 3.43 Galen FTIR spektrumları (a: kondisyonlama yapılmayan, b: kondisyonlama sonrası c: kondisyonlama öncesi, d: kondisyonlama boyunca)

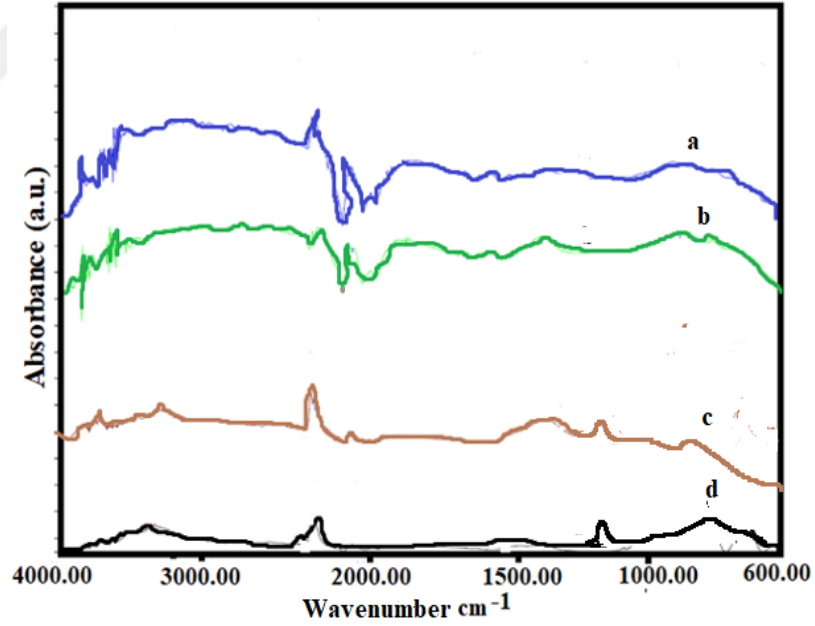
Şekil 3.44’de verilmiş olan galenin (FTIR) analizi incelendiğinde, kondisyonlama öncesi, boyunca ve sonrası ultrasonik işlem uygulanan ürünlerin dalga boyu değerleri mineral yüzeyde diksantojen bağı varlığından dolayı ($1240-1270\text{ cm}^{-1}$) dalga boyu aralığında pik vermektedir. Galen yüzeyinde kondisyonlama öncesi, boyunca ve sonrasında diksantojen varlığından dolayı galen minerali her üç durumda yüzmeye devam etmektedir.



Şekil 3.44 Pirit FTIR) spektrumları (a: kondisyonlama yapılmayan, b: kondisyonlama sonrası c: kondisyonlama öncesi, d: kondisyonlama boyunca)



Şekil 3.45 Kalkopirit FTIR spektrumları (a: kondisyonlama yapılmayan, b: kondisyonlama sonrası c: kondisyonlama öncesi, d: kondisyonlama boyunca)



Şekil 3.46 Sfalerit FTIR spektrumları (a: kondisyonlama yapılmayan, b: kondisyonlama sonrası c: kondisyonlama öncesi, d: kondisyonlama boyunca)

Pirit, kalkopirit ve sfalerit minerallerine sırasıyla çekilen Şekil 3.45, 3.46 ve 3.47'deki (FTIR) analizleri incelendiğinde, kondisyonlama öncesi ve kondisyonlama boyunca $1240\text{-}1270\text{ cm}^{-1}$ dalga boyunda mineralin yüzeylerinde dixsantojen bağı

varlığından dolayı pik vermektedir. Ancak, ultrasonik enerji uygulanmayan ve kondisyonlama sonrası ultrasonik enerji uygulanan minerallerin tane yüzeylerinde dixsantojen bağı oluşmadığı için bu dalga boyuda $1240-1270\text{ cm}^{-1}$ pik değeri görülmektedir. Söz konusu minerallerin kondisyonlama öncesi ve kondisyonlama boyunca ultrasonik enerji uygulanmış mineral tanelerinin yüzeyinde, dixsantojen bağı varlığı sebebiyle mineral taneleri yüzmektedir. Fakat, ultrasonik enerji uygulanmayan ve ultrasonik enerji kondisyonlama sonrasında uygulanan mineral tanelerinin yüzeyinde, dixsantojen bağı olmaması sebebiyle bu mineral taneleri yüzmemektedir.

FTIR analizlerine göre, kondisyonlama öncesi ve boyunca galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit'in mineral yüzeylerinde dixsantojen varlığı sebebiyle mineraller yüzmektedir. Ancak kondisyonlama sonrası minerallere ultrasonik enerji uygulanmasıyla birlikte, galen yüzeyinde dixsantojen bulunurken diğer minerallerin yüzeylerinde dixsantojen bağı olmadığı tespit edilmiştir.

Galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit minerallerine kondisyonlama sonrası ultrasonik enerji uygulandığında mineral yüzeylerinde fiziksel aşınma meydana gelmekte bu durum tane yüzeyindeki toplayıcı tabakalarında giderek azalmasına neden olmaktadır. Ancak galen, diğer minerallere göre toplayıcıya karşı afinitesi çok yüksek olması ve tane yüzeyindeki aşınma daha uzun sürede olmasından dolayı yüzmeye devam ettiği düşünülmektedir.

FTIR analizleri, saf minerallere ultrasonik enerjinin kondisyonlama aşamasından önce ve kondisyonlama boyunca uygulanmasında, tüm minerallerin yüzeyinde dixsantojen bağı olması sebebiyle mineraller üzerinde canlandırma etki gösterdiği tespit edilmiştir. Fakat, kondisyonlama sonrasında ultrasonik enerji uygulandığında kalkopirit, sfalerit ve pirit üzerinde dixsantojen bağı oluşmadığı için bastırıcı etki yapmasına rağmen, galende ise dixsantojen varlığı sebebiyle canlandırıcı etkisi devam ettiği tespit edilmiştir. Ultrasonik enerjinin bu özelliğinden yararlanılarak, koşullandırma sonrası uygulandığında galen minerali diğer sülfürlü minerallerden yüksek selektivite ve verimde ayrılabilirdiği gözlenmektedir. Tablo 3.26'da ultrasonik enerjinin mineral yüzeylerindeki dixsantojen bağına etkisi verilmiştir.

Tablo 3.19 Ultrasonik enerjinin mineral yüzeylerindeki dıxsantojen bağına etkisi (+: dıxsantojen bağı oluştuğu, - : dıxsantojen bağı oluşmadığı)

Mineral	Kondisyonlama öncesi US	Kondisyonlama boyunca US	Kondisyonlama sonrası US
Galen	+	+	+
Pirit	+	+	-
Kalkopirit	+	+	-
Sfalerit	+	+	-

Adsorpsiyon iki farklı cismin birbirine fiziksel yada kimyasal olarak bağlanmasıdır. Fiziksel adsorpsiyon, iki cismin yüzeyleri arasında zayıf bağlar mevcutsa, o yüzeyler arasında fiziksel adsorsorpsiyon vardır. Eğer cisimler birbirine iki cismin yüzeyleri arasında kimyasal reaksiyon oluşarak bağlanıyorsa, o yüzeyler arasında kimyasal adsorsiyon vardır. Diğer taraftan, iki cisim arasındaki bağ enerjisini ölçerek (entalpi) oradaki adsorplanmanın türünü belirleyebiliriz. Yüzeydeki bağ enerjisi 40- 800 kJ/mol arasında ise kimyasal adsorpsiyon, yüzeydeki bağ enerjisi 4-40 kJ/mol arasında ise fiziksel adsorpsiyon vardır (Levine, 2003).

Ultrasonik enerjinin katı yüzeyinde etki ettiği enerji miktarını direkt olarak ölçmek çok güçtür. Bu yüzden, yüzeyde etki ettiği enerji yapılmış olan önceki çalışmalara bakılarak yaklaşık 1000 - 5000 K bir etki yaptığı görülmektedir (Farmer ve diğer., 2003; Donskoi ve diğer., 2012, Güngören ve diğer., 2017). Bu etkiyi entapi cinsinden ifade edildiğinde ultrasonik enerji bir tane yüzeyine yaklaşık 9,5 kJ/mol bir etki yapmaktadır. Sonuç olarak, ultrasonik enerji katı yüzeylerine 4- 40 kJ/mol arasında bir etki yaptığı için sadece fiziksel olarak etki etmektedir.

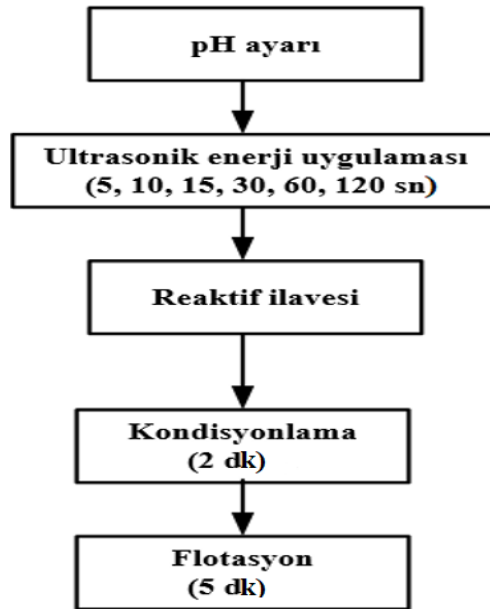
3.8 Mineral Karışımlarına Ultrasonik Enerjinin Etkisi

Saf minerallere ultrasonik enerji kondisyonlama öncesi ve boyunca uygulandığında tüm mineraller üzerinde canlandırma etkisi gösterdiği tespit edilmiştir. Fakat, kondisyonlama aşamasından sonra ultrasonik enerji kalkopirit, sfalerit ve pirit üzerinde bastırıcı etki göstermesine rağmen, galen üzerindeki canlandırıcı etkisinin devam ettiği tespit edilmiştir.

Bu bölümde mineraller aynı ortamda beraber bulunduğu zaman ultrasonik enerjinin canlandırma yada bastırma etkisinin devam edip etmediğini tespit etmek amacıyla,

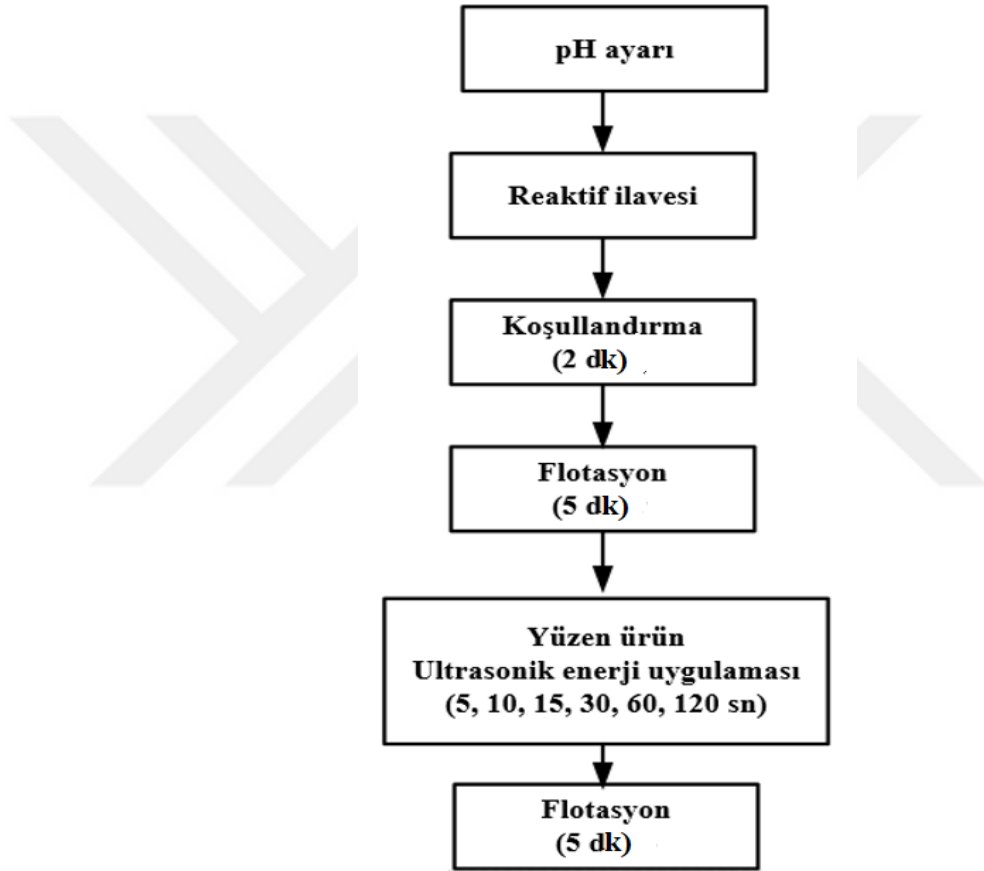
sentetik mineral karışımları hazırlanarak mikro-flotasyon testleri yapılmıştır. Mineral çiftleri (0,5+0,5 = 1 g) galen/sfalerit, galen/pirit ve galen/kalkopirit şeklinde sentetik olarak hazırlanmıştır. Mineral karışımlarına kondisyonlama öncesi ve kondisyonlama sonrası şeklinde ultrasonik enerji iki set şeklinde uygulanmıştır. Birinci test setinde amaç, mineraller bir arada bulunduklarında ultrasonik enerjinin canlandırma etkisinin devam edip etmediğini, ikinci test setinde ise ultrasonik enerjinin canlandırıcı-bastırıcı özelliğinden yararlanarak sentetik mineral karışımlarını seçici bir şekilde ayrılıp ayrılmadığını tespit etmektir. Saf numunelerle yapılan testlerde, ultrasonik uygulama kondisyonlama öncesi ve kondisyonlama boyunca yaklaşık aynı etki gözlemlenmiştir. Bu yüzden, bu bölümde koşullandırma öncesi tercih edilmiştir.

Birinci test setinde Pülp pH ayarlandıktan sonra, flotasyon öncesi 5, 10, 15, 30, 60 ve 120 sn ultrasonik enerjisi verilmiştir. Ultrasonik enerji uygulanan pülp içine reaktifler ilave edildikten sonra 2 dk kondisyonlanmış, sonrasında Hallimond tüpünde 5 dk boyunca flotasyon işlemi yapılmıştır. Mineral karışımlarında ultrasonik enerji süresinin belirlenmek amacıyla yapılan birinci test seti iş akım şeması Şekil 3.48’de verilmiştir.



Şekil 3.47 Mineral karışımlarına ultrasonik enerjinin etkisi belirlemek için yapılan birinci test seti iş akım şeması

İkinci test setinde; Mineral karışımı ilk önce ultrasonik enerji uygulanmadan tespit edilen Tablo 3.3, 3.5, 3.7 ve 3.9'daki flotasyon koşullarında yüzdürülmüştür. Yüzen ürünler 0,1 L destile edilmiş su içeren bir kap içersine 5, 10, 15, 30, 60 ve 120 sn ultrasonik enerji uygulandıktan sonra Hallimond tüpünde flote edilmiştir. Mineral karışımlarında ultrasonik enerji süresinin belirlenmesi için yapılan ikinci test seti iş akış şeması Şekil 3.49'da verilmiştir.



Şekil 3.48 Mineral Karışımlarına ultrasonik enerjinin etkisi belirlemek için yapılan ikinci test seti iş akış şeması

3.8.1 Galen/sfalerit Karışımlarına Ultrasonik Enerjinin Etkisi

Birinci test setinde 0,5 g galen + 0,5 g sfalerit karışımından alınarak 1 g numuneyle 0,1 L su karıştırılarak pülp elde edilmiştir. Pülp'e 5, 10, 15, 30, 60 ve 120 sn ultrasonik enerji verildikten sonra, 800 g/t CuSO₄ ilave edilerek 2 dk kondisyonlanmıştır. Daha

sonra 500 g/t KAX ilave edilerek 2 dk daha kondisyonlandıktan sonra 5 dk flote edilmiştir.

İkinci test setinde ise, birinci test setine benzer şekilde hazırlanan pülp'e 800 g/t CuSO₄ ilave edilerek 2 dk kondisyonlama sonrası 500 g/t KAX ilave edilip 2 dk daha kondisyonlama yapıldıktan sonra 5 dk flotasyon yapılmıştır. Elde edilen yüzen ürünler yüzen ürünler 0,1 L temiz su içine alındıktan sonra 5,10,15,30,60 ve 120 sn ultrasonik enerji uygulanarak flote edilmiştir. Galen/sfalerit karışımları flotasyon test koşulları Tablo 3.27'de verilmiştir.

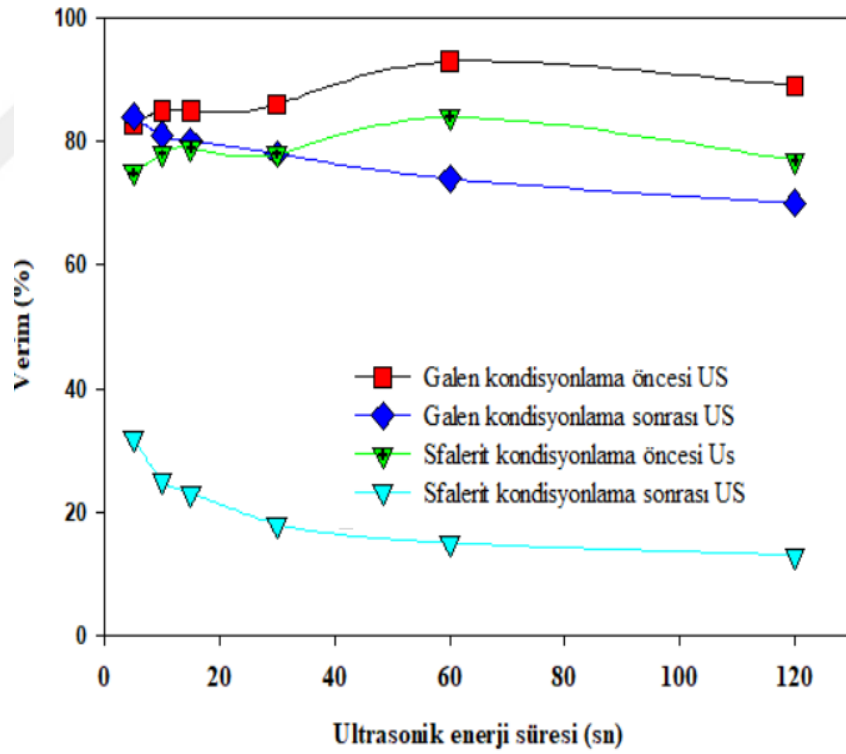
Tablo 3.27 Galen/sfalerit karışımı flotasyon test koşulları

	Kondisyonlama öncesi US	Kondisyonlama sonrası US
Numune miktarı(g)	1	1
Hava miktarı (L/dk)	0,1	0,1
Canlandırıcı miktarı (g/t)	800	800
Toplayıcı miktarı (g/t)	500	500
pH	8,5	8,5
Kondisyonlama süresi (dk)	2	2
Flotasyon süresi (dk)	5	5

Galen/sfalerit mineral karışımlarında ultrasonik enerji süresi tespiti için yapılan test sonuçları Tablo 3.28'de ve Şekil 3.50'de verilmiştir. Tablo 3.28'de ve Şekil 3.50'deki sonuçlar değerlendirildiğinde mineral karışımlarına kondisyonlama öncesi ultrasonik enerji uygulandığında 60 sn süreye kadar galenin veriminin %83'ten %95'e, sfaleritin veriminin ise %74'ten %84'e artmıştır. Ultrasonik enerji 120 sn uygulandığında sfalerit veriminin % 77'ye, galen veriminin ise %89'a azaldığı görülmektedir. Mineral karışımlarına kondisyonlama sonrası ultrasonik enerji uygulandığında ultrasonik enerji süresi arttıkça Pb ve Zn kazanma verimlerinin azaldığı tesbit edilmiştir.

Tablo 3.20 Galen/sfalerit numunesi ile yapılmış test sonuçları

Test No	Kondisyon Öncesi US Süresi (sn)	Kondisyon Sonrası US Süresi (sn)	Verim (%)	
			Pb	Zn
GS-1	5	-	83	75
GS -2	10	-	85	78
GS -3	15	-	85	79
GS -4	30	-	86	78
GS -5	60	-	95	84
GS -6	120	-	89	77
GS -7	-	5	84	32
GS -8	-	10	81	25
GS -9	-	15	80	23
GS-10	-	30	78	18
GS-11	-	60	74	15
GS-12	-	120	70	13



Şekil 3.50 Kondisyonlama öncesi-sonrası yüzen ürünlerdeki galen ve sfalerit verimi

Galen/sfalerit bir arada bulunduklarında ultrasonik enerjinin kondisyonlama öncesinde uygulandığında canlandırma etki gösterdiği, ultrasonik enerjinin kondisyonlama sonrasında uygulandığında ise galeni canladırmasına rağmen, sfalerit

mineraline bastırıcı etki yaptığı tespit edilmiştir. Galen/sfalerit karışımına ultrasonik enerjinin kondisyonlama sonrasında uygulandığında minerallerin herhangi bir reaktif kullanmadan birbirinden ayrılabilceği tespit edilmiştir.

3.8.2 Galen/pirit Karışımlarına Ultrasonik Enerjinin Etkisi

Birinci test setide 0,5 g galen + 0,5 g sfalerit karışım numunesine 0,1 L su ile karıştırılarak elde edilmiş olan pülp'e 5, 10, 15, 30, 60 ve 120 sn ultrasonik enerji verildikten sonra 2 dk kondisyonlama yapılmış, daha sonra 500 g/t KAX ilave edilerek 2 dk daha kondisyonlandıktan sonra 5 dk flote edilmiştir.

İkinci test setinde ise birinci test setinde olduğu gibi 1 gram karışım numunesi 0,1 L su karıştırılarak oluşturulan pülp'e 500 g/t KAX ilave edilip 2 dk kondisyonlama yapıldıktan sonra 5 dk flotasyon yapılmıştır. Elde edilmiş olan yüzen ürün 0,1 L temiz su içine alındıktan sonra 5,10,15,30,60 ve 120 sn ultrasonik enerji uygulanarak flote edilmiştir. Galen/pirit karışımları flotasyon test koşulları Tablo 3.29'da verilmiştir.

Tablo 3.21 Galen/pirit karışımları flotasyon test koşulları

	Kondisyonlam a öncesi US	Kondisyonlama sonrası US
Tane boyutu (µm)	150-75	150-75
Numune miktarı(g)	1	1
Hava miktarı (L/dk)	0,1	0,1
Toplayıcı miktarı (g/t)	500	500
pH	8,5	8,5
Kondisyonlama süresi(dk)	2	2
Flotasyon süresi (dk)	5	5

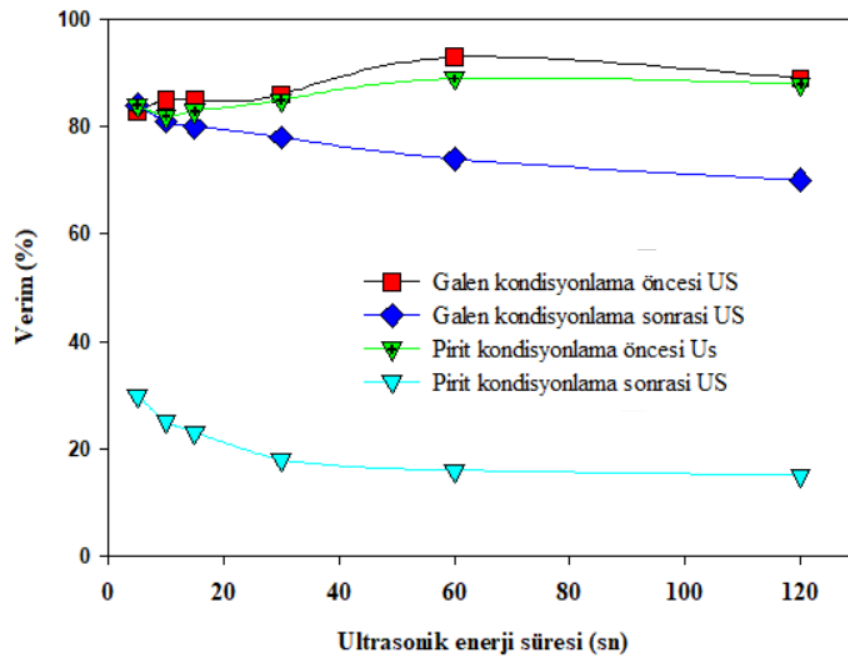
Galen/pirit mineral karışımlarında ultrasonik enerji süresini tespit etmek amacıyla yapılan test sonuçları Tablo 3.30'da ve Şekil 3.51'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, mineral karışımlarına kondisyonlama öncesi ultrasonik enerji uygulandığında 60 sn süreye kadar galenin veriminin %83'ten %95'e, pirit veriminin ise %84'ten %89'a yükseldiği görülmektedir. Ultrasonik enerji uygulamasının 60 sn'den sonra galen veriminin % 74'e, pirit veriminin ise %16'ya kadar azaldığı görülmektedir.

Galen/pirit karışımına ultrasonik enerjinin kondisyonlama öncesinde uygulandığında minerallerin ultrasonik enerji uygulanmayan koşullara göre daha

yüksek verimde ürünlerin alınabileceği tespit edilmiştir. Galen/pirit karışımına ultrasonik enerjinin kondisyonlama sonrasında uygulandığında ise mineral karışımına herhangi bir bastırıcı reaktif ilave edilmeden ultrasonik enerjinin etkisi ile birbirinden ayrılabilceği tespit edilmiştir.

Tablo 3.30 Galen/pirit numunesi ile yapılmış test sonuçları

Test No	Kondisyon Öncesi US Süresi (sn)	Kondisyon Sonrası US Süresi (sn)	Verim (%)	
			Pb	Fe
GP-1	5	-	83	84
GP -2	10	-	85	82
GP -3	15	-	85	83
GP -4	30	-	86	85
GP -5	60	-	95	89
GP -6	120	-	89	88
GP -7	-	5	84	32
GP -8	-	10	81	25
GP -9	-	15	80	23
GP-10	-	30	78	18
GP-11	-	60	74	16
GP-12	-	120	72	15



Şekil 3.49 Kondisyonlama öncesi-sonrası yüzen ürünlerdeki galen ve pirit verimi

Galen/pirit bir arada bulunduklarında ultrasonik enerjinin kondisyonlama öncesinde uygulandığında canlandırma etkisinin saf minerallerde olduğu gibi devam ettiği, ultrasonik enerjinin kondisyonlama sonrasında uygulandığında ise galene canlandırma etkisi devam etmesine rağmen, pirit mineraline bastırıcı etkisinin devam ettiği tespit edilmiştir. Galen/pirit karışımına ultrasonik enerjinin kondisyonlama sonrasında uygulandığında minerallerin birbirinden ayrılabilceği tespit edilmiştir.

3.8.3 Galen/kalkopirit Karışımlarına Ultrasonik Enerjinin Etkisi

Birinci test setinde, galen/ kalkopirit'den alınan 1 g numuneyle 0,1 L su ile karıştırılarak oluşturulan pülp'e 5, 10, 15, 30, 60 ve 120 sn ultrasonik enerji uygulandıktan sonra 2 dk kondisyonlama yapılmıştır. Daha sonra, 500 g/t KAX ilave edilip 2 dk daha kondisyonlandıktan sonra Hallimond tüpünde 5 dk boyunca flote edilmiştir.

İkinci test setide, birinci test setinde olduğu gibi 1 g karışıma 0,1 L su ilave edilerek oluşturulan pülp'e 500 g/t KAX ilave edilip 2 dk kondisyonlandıktan sonra flote edilmiştir. Daha sonra yüzen ürünler 0,1 L destile edilmiş su içine konularak 5,10,15,30,60 ve 120 sn ultrasonik enerji verildikten sonra Halimond tüpünde 5 dk boyunca flote edilmiştir. Galen/kalkopirit karışımları flotasyon test koşulları Tablo 3.31'de verilmiştir.

Tablo 3.22 Galen/kalkopirit karışımları flotasyon test koşullar

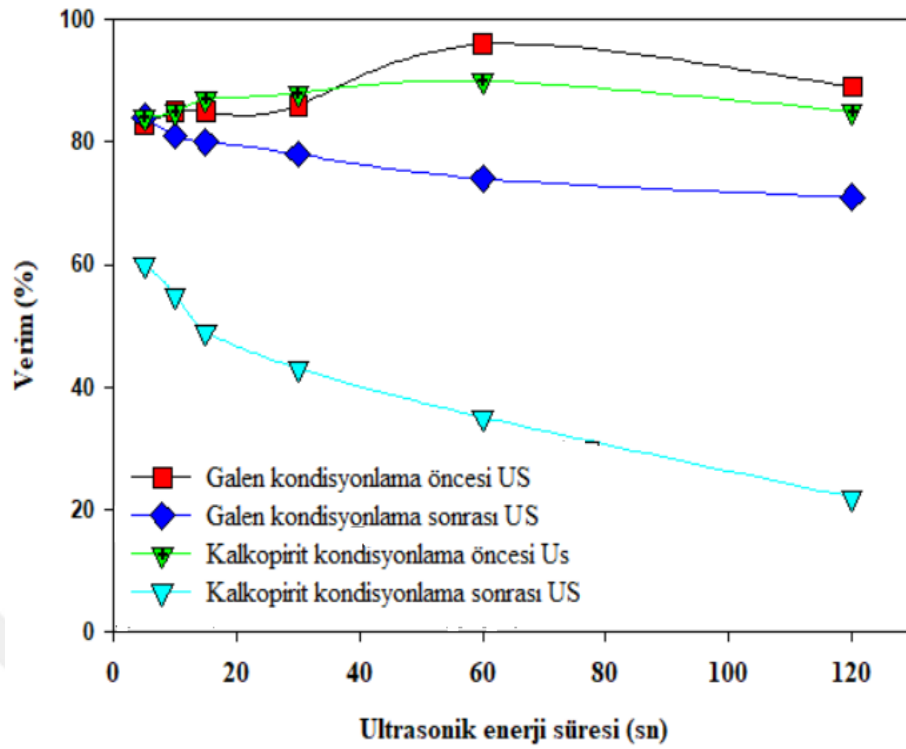
	Kondisyonlama öncesi US	Kondisyonlama sonrası US
Numune miktarı (g)	1	1
Hava miktarı (L/dk)	0,1	0,1
Toplayıcı miktarı (g/t)	500	500
pH	8,5	8,5
Kondisyonlama süresi	2	2
Flotasyon süresi	5	5

Galen/kalkopirit mineral karışımlarında ultrasonik enerji süresi tespiti için yapılan test sonuçları Tablo 3.32'de ve Şekil 3.52'de verilmiştir.

Tablo 3.32 ve Şekil 3.52'deki test sonuçları incelendiğinde, mineral karışımlarına kondisyonlama öncesi 60 sn ultrasonik enerji uygulandığında galenin verimi, %83'ten %96'e, kalkopirit veriminin ise %84'ten %90'a yükseldiği görülmektedir. Ultrasonik enerji kondisyonlama sonrası ultrasonik enerji süresinin artmasına bağlı olarak her iki mineralin verimleri azalmaktadır.

Tablo 3.23 Galen/kalkopirit numunesi ile yapılmış test sonuçları

Test No	Kondisyon Öncesi US Süresi (sn)	Kondisyon Sonrası US Süresi (sn)	Verim (%)	
			Pb	Cu
KP-1	5	-	83	84
KP -2	10	-	85	85
KP -3	15	-	85	87
KP -4	30	-	86	88
KP -5	60	-	96	90
KP -6	120	-	89	85
KP -7	-	5	84	60
KP -8	-	10	81	55
KP -9	-	15	80	49
KP-10	-	30	78	43
KP-11	-	60	74	35
KP-12	-	79	71	22



Şekil 3.50 Kondisyonlama öncesi–sonrası yüzen ürünlerdeki galen ve kalkopirit verimi

Galen/kalkopirit bir arada bulunduklarında, ultrasonik enerji kondisyonlama öncesi ve kondisyonlama sonrasında uygulandığında galenin verimi artmaya devam ederken kalkopiritin veriminin azaldığı tespit edilmiştir. Ultrasonik enerji kondisyonlama sonrasında galen/kalkopirit karışımına uygulandığında minerallerin birbirinden ayrılacağı görülmektedir.

Genel olarak, ultrasonik enerjinin saf mineraller üzerinde tespit edilen bazı özellikleri mineral karışımlarında da tespit edilmiştir. Mineral karışımları bir arada bulunduklarında ultrasonik enerjinin kondisyonlama öncesinde uygulandığında tüm minerallerde saf minerallerde olduğu gibi verimde artış olduğu için canlandırma etkisi yaptığı tespit edilmiştir. Ultrasonik enerjinin kondisyonlama sonrasında uygulandığında ise, yine saf minerallerde olduğu gibi galenin veriminde artış devam ettiği için canlandırma etkisi yaptığı sfalerit, pirit ve kalkopirit mineralide ise verimde azalma görüldüğü için bastırıcı etkisi yaptığı tespit edilmiştir.

3.9 Ultrasonik Enerji Destekli Flotasyon Test Düzeneği ve Flotasyon Testleri

Ultrasonik enerji cevher hazırlamada laboratuvar ölçekli olarak birçok çalışmada kullanılmasına rağmen, endüstriyel ölçekli çalışma bulunmamaktadır. Çalışmanın bu bölümünde endüstriyel ölçekte kullanılabilecek laboratuvar ölçekli sürekli çalışan bir test düzeneği kurulmuştur. Test düzeneğinde mevcut tesislerden getirilen cevherler ile çalışmalar yürütölmüştür. Bu test düzeneği ile hem mevcut tesislerin selektivite ve veriminde artış sağlanması, hem de bazı madenlerin işletilebilir hale gelmesi beklenmektedir.

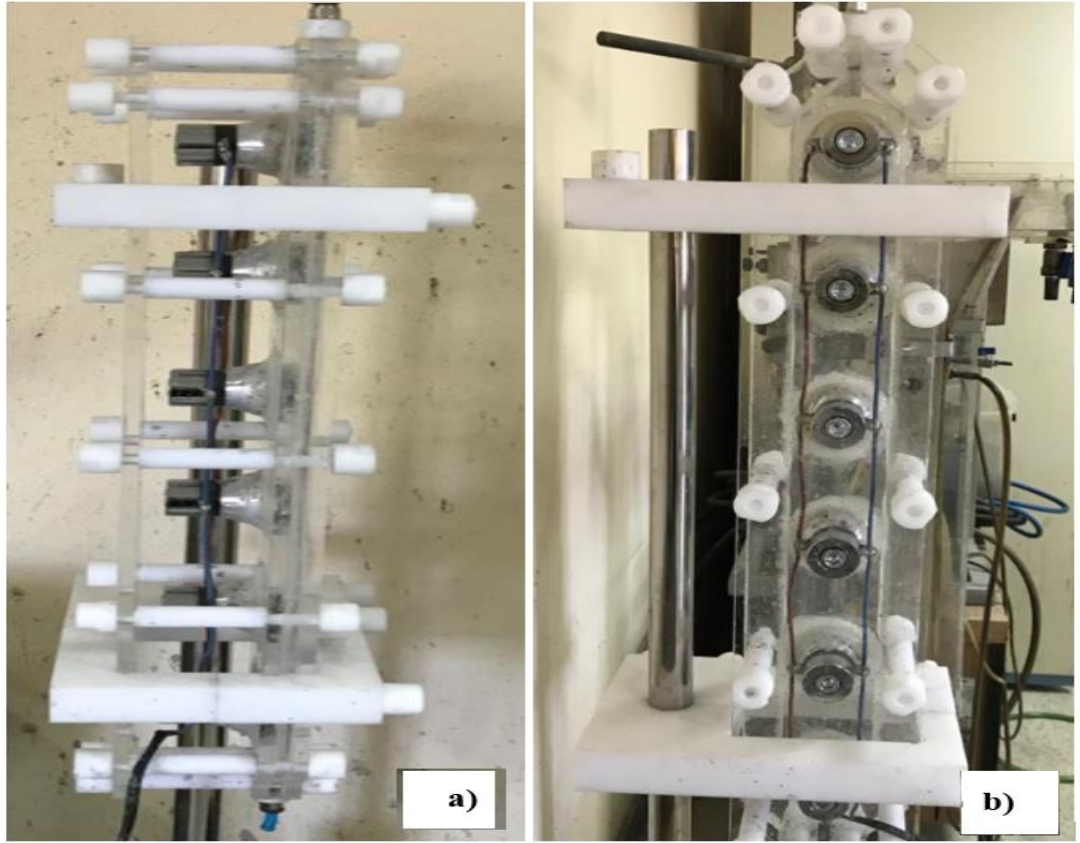
Ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneği, 6 adet ultrasonik başlık (20 kHz frekans) ve 1 adet ultrasonik jeneratörden oluşmaktadır. Ultrasonik jeneratör (UCE-NT600, 600W) 6-12 adet ultrasonik başlığı (UCE-UT-2060 PZT-4) çalıştırabilecek kapasitededir. Bu test düzeneğinde ürünün ultrasonik enerjiye maruz kaldığı bölgede enerji kayıpları olmaması için, ultrasonik başlıklar haricinde metal aksan kullanılmamıştır. Test düzeneğinin kolon kısmının boyutları (boy: 500 mm, genişlik: 75mm ve derinliği: 5mm) kolon şeklinde tasarlanmıştır. Test düzeneğinin kolon kısmının pleksiglas levha ve plastik ciavatalar kullanılarak kurulumu yapılmıştır. Yine test düzeneğinin kolon kısmı cevher tanelerinin ultrasonik enerjiye uzun süre maruz kalabilmeleri için dik bir şekilde tasarlanmıştır. Ultrasonik jeneratör Şekil 3.53’de, ultrasonik başlıklar ve montajı Şekil 3.54’de verilmiştir. Test düzeneğinin görüntüsü (a: sol yan b: arka plan) Şekil 3.55’de, ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneği Şekil 3.56’da ve tasarımı ise Şekil 3.57’de verilmiştir.



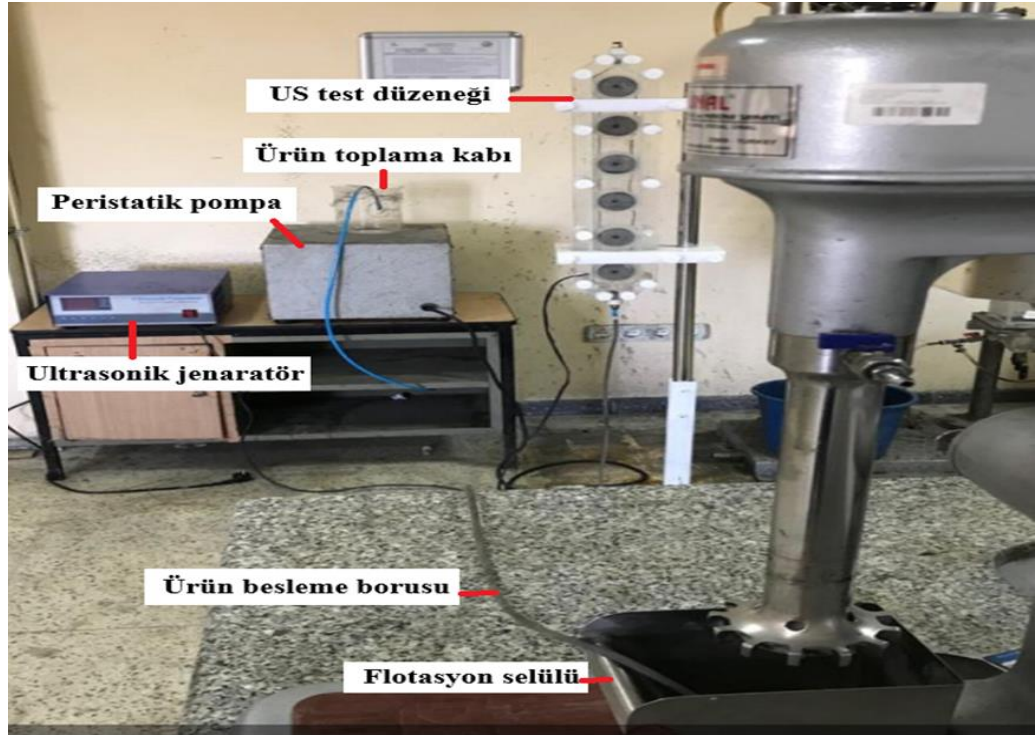
Şekil 3.51 Ultrasonik jeneratör (Kişisel arşiv, 2021)



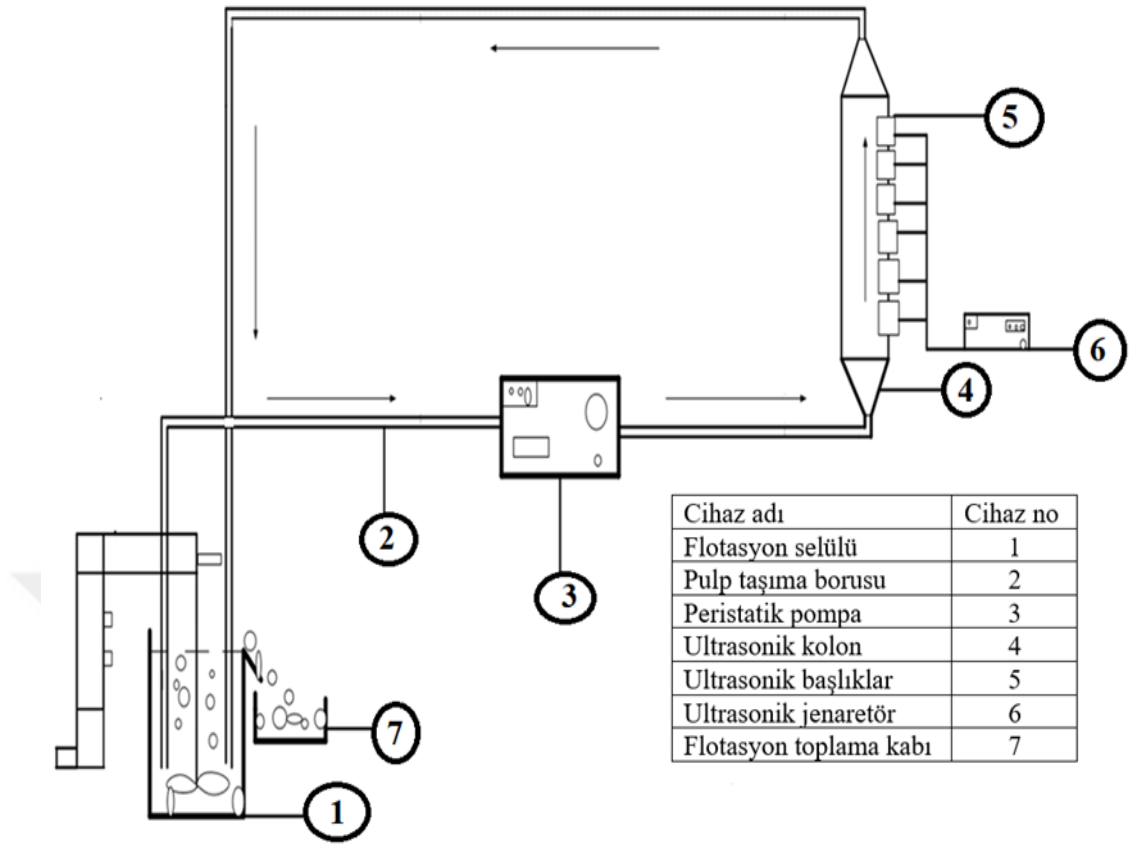
Şekil 3.52 Ultrasonik başlıklar ve montajı (a: Tek başlık b: Test düzeniğinin ön görüntüsü) (Kişisel arşiv, 2021)



Şekil 3.53 Test düzeneğinin plan görüntüsü (a: sol yan b: arka plan) (Kişisel arşiv, 2021)



Şekil 3.54 Ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneği (Kişisel arşiv, 2021)



Şekil 3.55 Ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneğinin tasarımı

Deneyisel çalışmalarda 1 L'lik selülde 250 g cevher kullanılarak %30 katı oranında yapılmıştır. Test düzeneğinde cevher peristatik pompa kullanılarak beslenmiştir. Peristatik pompadan test düzeneğine malzeme taşınması 3 mm çapında ve 160 mm uzunluğunda elastik boru kullanılarak yapılmıştır. Malzemenin ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneği içinde kalma süresi peristatik pompayla ayarlanmıştır. Ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneğinde 38 µm galen tanesinin çökmemesi için besleme hızı eşitlik 3.2'deki bağıntıdan yararlanılarak hesaplanmıştır. Bu hızda besleme yapıldığında, cevher 5 sn'de selülden ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneğine gelmektedir. Ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneğinde bir tanenin yaklaşık 30 sn kalacağı şekilde tasarlanmıştır.

Bir mineral tanesinin terminal hızı eşitlik 3.2'deki Stokes bağıntısından yararlanılarak hesaplanmıştır. Test düzeneğinde kalma süresi ise eşitlik 3.3'deki bağıntıdan yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$V_t = \frac{g \cdot d^2 \cdot (d_k - d_s)}{18\eta} \quad (3.2)$$

V_t = Tanesinin terminal hızı (cm/sn)

q = Yer çekimi ivmesi (9,81cm/san²)

d = Katı tanenin boyutu (cm)

dk = Katının yoğunluğu (g/cm³)

d_s = Sıvının yoğunluğu (g/cm³)

η = Sıvının vizkositesi (g/cm.san)

$$Q = A.V \quad (3.3)$$

Q = Debi (cm³/sn)

A = Kesit alanı (cm²)

V = Hız (cm/sn)

Galenin tane boyutuna göre terminal hızları;

Galen tanesinin 150, 106, 75 ve 38 µm bir terminal hızı Stokes eşitliği yardımıyla şu şekilde hesaplanmıştır.

q = Yer çekimi ivmesi 9,81cm/sn

d = 0,0150 (cm)

$dk.$ = 7 (g/cm³)

d_s = 1 (g/cm³)

η = 0,01 g\cm.sn

$$V = \frac{g.d^2.(dk-ds)}{18\eta}$$

V = 8,58 cm/sn

Diğer boyutlarda 3.2'deki eşitlik yardımıyla galen tanesinin terminal hızları (106 µm; V_t = 4,29 cm/sn, 75 µm; V_t = 2,14 cm/sn ve 38 µm; V_t = 0,55 cm/sn) hesaplanmıştır.

Bir galen tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$A = 7,5 \text{ (test düzeneğinin kesit alanı cm}^2 \text{)}$$

$$V = 16,67 \text{ (bizim belirlediğimiz suyun hızı cm/sn)}$$

$$Q = 7,5 \text{ cm}^2 \times 16,67 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 125 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 125 \text{ cm}^3$$

$$\times \quad \underline{3750 \text{ cm}^3}$$

$$x = 30 \text{ sn}$$

150 μm galen tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı= Suyun hızı – terminal hız = 16,67 cm/sn– 8,58 cm/sn= 8,09 cm/sn

150 μm galen tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 8,09 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 60,67 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 60,67 \text{ cm}^3$$

$$\times \quad \underline{3750 \text{ cm}^3}$$

$$x = 61,80 \text{ sn}$$

106 μm galen tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı= Suyun hızı – terminal hız = 16,67 cm/sn – 4,29 cm/sn= 10,38 cm/sn

75 μm galen tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 10,38 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 77,85 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 77,85 \text{ cm}^3$$

$$\times \quad \underline{3750 \text{ cm}^3}$$

$$x = 48,16 \text{ sn}$$

75 µm galen tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı = Suyun hızı – terminal hız = 16,67 cm/sn – 2,14 cm/sn = 14,53 cm/sn

106 µm galen tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 14,53 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 108,98 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 108,98 \text{ cm}^3$$

$$\times \quad \underline{3750 \text{ cm}^3}$$

$$x = 34,41 \text{ sn}$$

38 µm galen tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı = Suyun hızı – terminal hız = 16,67 cm/sn – 0,55 cm/sn = 16,12 cm/sn

38 µm galen tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 16,12 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 120,9 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 120,9 \text{ cm}^3$$

$$\times \quad \underline{3750 \text{ cm}^3}$$

$$x = 31,02 \text{ sn}$$

Piritin tane boyutuna göre terminal hızları;

Pirit tanesinin 150, 106, 75 ve 38 µm bir terminal hızı 3.2'deki stokes eşitliği yardımıyla şu şekilde hesaplanmıştır.

$$q = \text{Yer çekimi ivmesi } 9,81 \text{ cm/sn}$$

$$d = 0,0150 \text{ (cm)}$$

$$dk = 5 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$d_s = 1 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$\eta = 0,01 \text{ g/cm.sn}$$

$$V = \frac{g \cdot d^2 \cdot (dk - ds)}{18\eta}$$

$$V = 6,13 \text{ cm/sn (150 } \mu\text{m)}$$

Diğer boyutlarda 3.2'deki eşitlik yardımıyla 106 μm ; $V_t = 5,51 \text{ cm/sn}$, 75 μm ; $V_t = 1,53 \text{ cm/sn}$ ve 38 μm ; $V_t = 0,39 \text{ cm/sn}$ hesaplanmıştır.

Bir pirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

150 μm pirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı = Suyun hızı – terminal hız = $16,67 \text{ cm/sn} - 6,13 \text{ cm/sn} = 10,54 \text{ cm/sn}$

150 μm pirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A \cdot V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 10,54 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 79,05 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 79,05 \text{ cm}^3$$

$$\times \frac{3750 \text{ cm}^3}{79,05 \text{ cm}^3/\text{sn}}$$

$$x = 47,44 \text{ sn}$$

106 μm pirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı = Suyun hızı – terminal hız = $16,67 \text{ cm/sn} - 5,51 \text{ cm/sn} = 11,16 \text{ cm/sn}$

106 μm pirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A \cdot V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 11,16 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 83,70 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 83,70 \text{ cm}^3$$

$$\times \frac{3750 \text{ cm}^3}{83,70 \text{ cm}^3/\text{sn}}$$

$$x = 44,80 \text{ sn}$$

75 μm pirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı = Suyun hızı – terminal hız = $16,67 \text{ cm/sn} - 1,53 \text{ cm/sn} = 15,14 \text{ cm/sn}$

75 μm pirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A \cdot V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 15,14 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 113,55 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 113,55 \text{ cm}^3$$

$$\times \frac{3750 \text{ cm}^3}{113,55 \text{ cm}^3/\text{sn}}$$

$$x = 33,03 \text{ sn}$$

38 µm pirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı = Suyun hızı

– terminal hız = 16,67 cm/sn – 0,39 cm/sn = 16,28 cm/sn

38 µm pirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 16,28 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 113,55 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 122,10 \text{ cm}^3$$

$$\times \frac{3750 \text{ cm}^3}{122,10 \text{ cm}^3/\text{sn}}$$

$$X = 30,71 \text{ sn}$$

Kalkopirit tane boyutuna göre terminal hızları;

Kalkopirit tanesinin 150, 106, 75 ve 38 µm bir terminal hızı 3.2'deki Stokes eşitliği yardımıyla şu şekilde hesaplanmıştır.

$$q = \text{Yer çekimi ivmesi } 9,81 \text{ cm/sn}$$

$$d = 0,0150 \text{ (cm)}$$

$$dk = 3,9 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$ds = 1 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$\eta = 0,01 \text{ g/cm.sn}$$

$$V = \frac{g.d^2.(dk-ds)}{18\eta}$$

$$V = 3,56 \text{ cm/sn (150 µm)}$$

Diğer boyutlarda 3.1'deki eşitlik yardımıyla 106 µm; $V_t = 1,78 \text{ cm/sn}$, 75 µm; $V_t = 0,89 \text{ cm/sn}$ ve 38 µm; $V_t = 0,23 \text{ cm/sn}$ hesaplanmıştır.

Bir kalkopirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

150 µm kalkopirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı =
Suyun hızı – terminal hız = $16,67 \text{ cm/sn} - 3,56 \text{ cm/sn} = 13,11 \text{ cm/sn}$

150 µm kalkopirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 13,11 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 98,33 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 98,33 \text{ cm}^3$$

$$\times \quad \underline{3750 \text{ cm}^3}$$

$$x = 38,14 \text{ sn}$$

106 µm kalkopirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı =
Suyun hızı – terminal hız = $16,67 \text{ cm/sn} - 1,78 \text{ cm/sn} = 14,90 \text{ cm/sn}$

106 µm kalkopirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 14,90 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 110,85 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 111,75 \text{ cm}^3$$

$$\times \quad \underline{3750 \text{ cm}^3}$$

$$x = 33,56 \text{ sn}$$

75 µm kalkopirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı =
Suyun hızı – terminal hız = $16,67 \text{ cm/sn} - 0,89 \text{ cm/sn} = 15,78 \text{ cm/sn}$

75 µm kalkopirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 15,78 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 118,35 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 118,35 \text{ cm}^3$$

$$\times \frac{3750 \text{ cm}^3}{118,35 \text{ cm}^3}$$

$$x = 31,69 \text{ sn}$$

38 μm kalkopirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı =
Suyun hızı – terminal hız = 16,67 cm/sn – 0,23 cm/sn = 16,44 cm/sn

38 μm kalkopirit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 16,44 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 123,30 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 123,23 \text{ cm}^3$$

$$\times \frac{3750 \text{ cm}^3}{123,23 \text{ cm}^3}$$

$$x = 30,41 \text{ sn}$$

Sfalerit tane boyutuna göre terminal hızları;

Sfalerit tanesinin 150, 106, 75 ve 38 μm bir terminal hızı 3.2'deki Stokes eşitliği yardımıyla şu şekilde hesaplanmıştır.

$$q = \text{Yer çekimi ivmesi } 9,81 \text{ cm/sn}$$

$$d = 0,0150 \text{ (cm)}$$

$$dk = 4,1 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$ds = 1 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$\eta = 0,01 \text{ g/cm.sn}$$

$$V = \frac{g \cdot d^2 \cdot (dk - ds)}{18\eta}$$

$$V = 3,80 \text{ cm/sn (150 } \mu\text{m)}$$

Diğer boyutlarda 3.1'deki eşitlik yardımıyla 106 μm ; $V_t = 1,89 \text{ cm/sn}$, 75 μm ; $V_t = 0,95 \text{ cm/sn}$ ve 38 μm ; $V_t = 0,24 \text{ cm/sn}$ hesaplanmıştır.

Bir sfalerit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

150 µm sfalerit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı = Suyun

hızı – terminal hız= 16,67 cm/sn – 3,80 cm/sn = 12,87 cm/sn

150 µm sfalerit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 12,87 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 96,53 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 96,53 \text{ cm}^3$$

$$\times \frac{3750 \text{ cm}^3}{96,53 \text{ cm}^3/\text{sn}}$$

$$x = 38,85 \text{ sn}$$

106 µm sfalerit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı = Suyun

hızı – terminal hız = 16,67 cm/sn – 1,89 cm/sn = 14,78 cm/sn

106 µm sfalerit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 14,78 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 110,85 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 110,85 \text{ cm}^3$$

$$\times \frac{3750 \text{ cm}^3}{110,85 \text{ cm}^3/\text{sn}}$$

$$x = 33,83 \text{ sn}$$

75 µm sfalerit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı = Suyun

hızı – terminal hız = 16,67 cm/sn – 0,95 cm/sn = 15,72 cm/sn

75 µm sfalerit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 15,72 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 117,90 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 117,90 \text{ cm}^3$$

$$\times \frac{3750 \text{ cm}^3}{117,90 \text{ cm}^3/\text{sn}}$$

$$x = 31,81 \text{ sn}$$

38 µm sfalerit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma hızı = Suyun hızı – terminal hız = 16,67 cm/sn – 0,24 cm/sn = 16,43 cm/sn

38 µm sfalerit tanesinin ultrasonik enerji destekli düzenek içinde kalma süresi;

$$Q = A.V$$

$$Q = 7,5 \text{ cm} \times 16,43 \text{ cm/sn}$$

$$Q = 121,20 \text{ cm}^3/\text{sn}$$

$$\text{Kolon toplam hacmi} = 7,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 500 \text{ cm} = 3750 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ sn} \quad 121,23 \text{ cm}^3$$

$$\times \frac{3750 \text{ cm}^3}{121,23 \text{ cm}^3}$$

$$x = 30,43 \text{ sn}$$

Mineral tanelerinin boyuta göre test düzeneğinde kalma süreleri Tablo 3.33'de verilmiştir. Tablo 3.33 incelendiğinde mineral tanelerinin boyutu azaldıkça test düzeneğinde kalma süresi de azalmaktadır. Bununla birlikte mineral yoğunluğu arttıkça tanelerin test düzeneğinde kalma süresi artmaktadır. Genel olarak en yoğun ve en büyük tane test düzeneğinde en fazla sürede kalırken, en hafif ve en küçük tane test düzeneğinde en az sürede kaldığı tespit edilmiştir.

Tablo 3.24 Tanelerin test düzeneğinde kalma süreleri

	150 µm	106 µm	75 µm	38 µm
Galen (sn)	61,80	48,16	34,41	31,02
Pirit (sn)	47,44	44,80	33,03	30,71
Kalkopirit (sn)	38,14	33,56	31,69	30,41
Sfalerit(sn)	38,85	33,83	31,81	30,43

3.10 Flotasyon testleri

Giresun-Şebinkarahisar kuşun-çinko tesisi, Balıkesir-Balya kurşun-çinko tesisi ve Kütahya-Çatak demir tesisi'nden temin edilen sülfürlü cevherlerle flotasyon testleri yapılmıştır. Burada amaç farklı özelliklerdeki kompleks yapıli cevherlerin zenginleştirilmesinde ultrasonik enerjinin etkisini incelemektir. Flotasyon testleri iki aşamada yapılmıştır. İlk aşamada konvensiyonel (ultrasonik enerji uygulanmayan) yöntemlerle flotasyon testleri yapılmıştır. İkinci aşamada ise ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneği kullanılarak flotasyon testleri yapılmıştır. Flotasyon testleri

sonucunda, her iki aşamadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak ultrasonik enerjinin gerçek cevherler üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

3.10.1 Giresun-Şebinkarahisar Kurşun-Çinko Cevheri Flotasyon Testleri

Giresun-Şebinkarahisar kurşun-çinko tesisi'nden temin edilen cevher içerisinde galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit minerallerinin olduğu Şekil 3.11'de verilen XRD analiz sonucuyla tespit edilmiştir. Cevher hem ultrasonik flotasyon test düzeneğinde hem de konvensiyonel flotasyon test düzeneğinde testlere tabi tutulmuştur. Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevheri ultrasonlu ve konvensiyonel flotasyon testleri iş akım şeması Şekil 3.58'de verilmiştir.

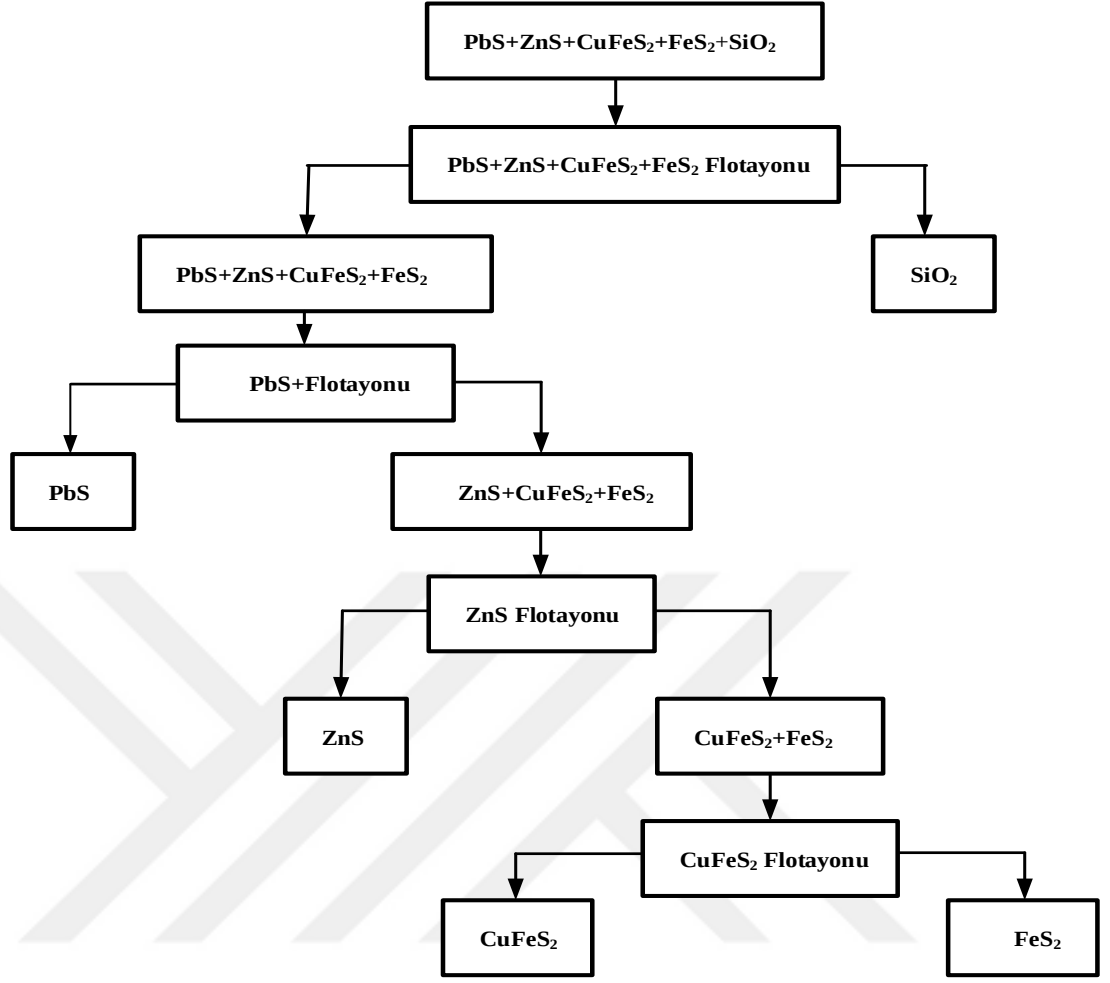
Tüm flotasyon testlerinde toplayıcı olarak Potasyum Amil Xsantat (KAX), pH ayarlayıcı olarak H_2SO_4 ve NaOH kullanılmıştır. Sfaleriti canlandırmak için 800 g/t $CuSO_4$ kullanılmıştır. Sfaleriti bastırmak için 500 g/t $ZnSO_4$, silikatları bastırmak için 1000 g/t Na_2SiO_3 , kalkopiriti bastırmak için 10000 g/t Na_2S , piriti bastırmak için ise $pH > 11,5$ NaOH ve köpürtücü olarak 20 g/t MIBC kullanılmıştır (Gaudin, 1957; Boulton, 2005; Çilek, 2006; Kurşun ve Ulusoy, 2015; Atak, 2017)

Konvensiyonel flotasyon yönteminde;

Cevhere sırasıyla $PbS+ZnS+CuFeS_2+FeS_2$ flotasyonu, PbS flotasyonu, $CuFeS_2$ flotasyonu ve ZnS flotasyonu yapılmıştır.

Ultrasonik enerjinin kullanıldığı flotasyon test düzeneğinde ise;

Cevhere sırasıyla $PbS+ZnS+CuFeS_2+FeS_2$ flotasyonu, PbS flotasyonu, $CuFeS_2$ flotasyonu ve ZnS flotasyonu yapılmıştır. Hem ultrasonlu hem de konvensiyonel flotasyon testlerinde önce galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit mineralleri toplu olarak konsantreye alınmıştır. Daha sonra galen, kalkopirit ve sfalerit minerali konsantre olarak alınmıştır. Tüm flotasyon testlerinde bir temizleme ve bir süpürme flotasyonu yapılmıştır.



Şekil 3.56 Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevheri ultrasonlu ve konvensiyonel flotasyon testleri iş akım şeması

3.10.1.1 Giresun-Şebinkarahisar Kurşun-Çinko Cevherinin konvensiyonel flotasyon testleri

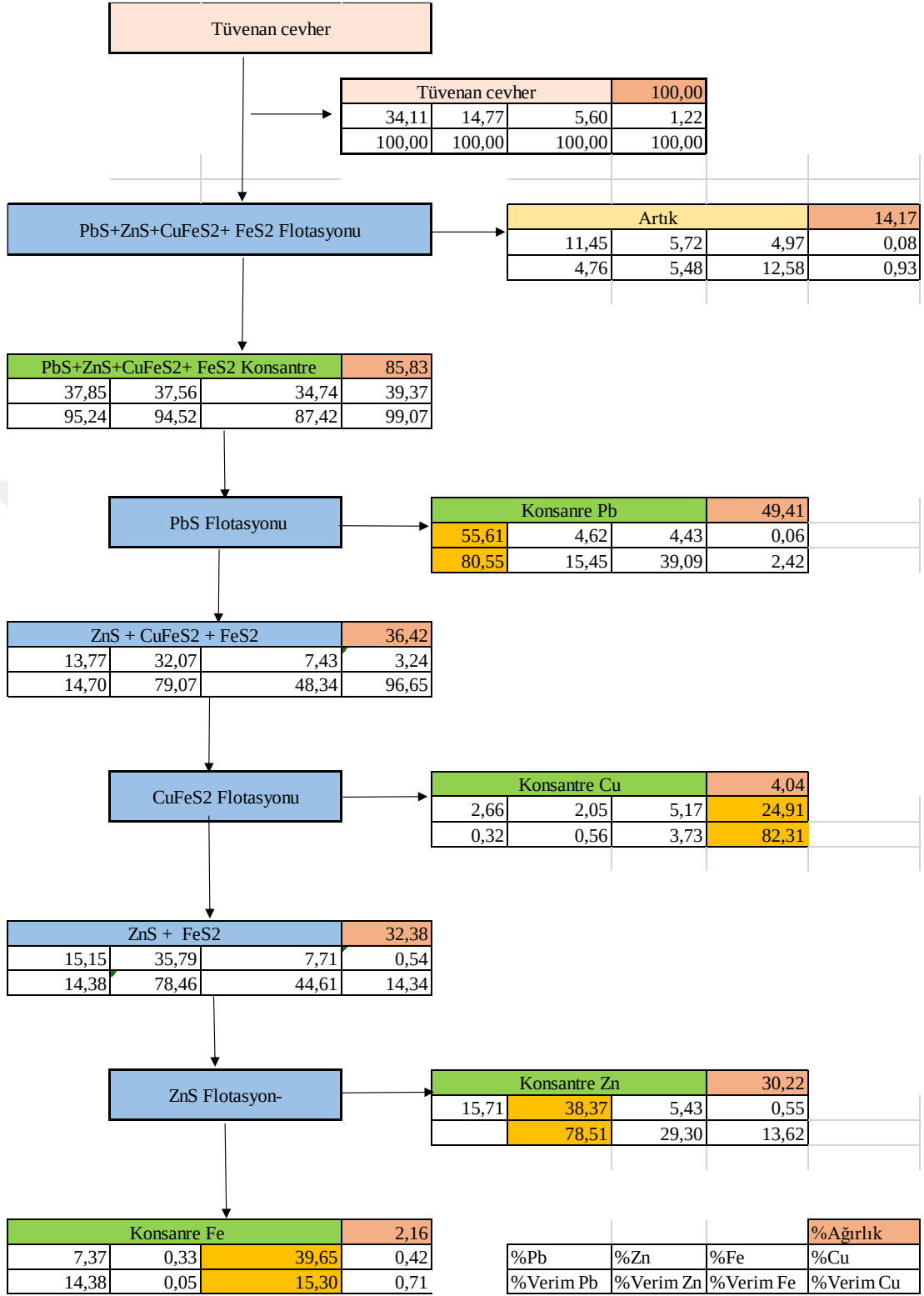
Konvensiyonel yöntemle yapılan flotasyon testlerinde, sülfürlü cevher kolektif ve selektif flotasyon yapılarak mineraller birbirinden ayrılmıştır. Konvensiyonel yöntemle yapılan flotasyon test koşulları daha önce yapılan mikro-flotasyon ve literatür çalışmalarından yararlanılarak belirlenmiştir. Testlerde uygulanan koşulları Tablo 3.34’de ve sonuçları Tablo 3.35’de verilmiştir. Giresun-Şebinkarahisar kurşun-çinko cevherinin en uygun tane boyutu olan 106 µm kütle-metal balansı Şekil 3.59’da verilmiştir.

Tablo 3.25 Giresun-Şebinkarahisar kurşun-çinko cevheri konvensiyonel flotasyon test koşulları

	PbS+CuFeS ₂ ZnS+FeS ₂	PbS Flotasyonu	CuFeS ₂ Flotasyonu	ZnS Flotasyonu
Katı oranı	%30	%30	%30	%30
pH	(8,5)	(8,5)	(11)	(11,5)
Canlandırıcı	800 g/t CuSO ₄	-	-	800 g/t CuSO ₄
Bastırıcı	1000 g/t Na ₂ SiO ₃	300 g/t ZnSO ₄ 10000g/t Na ₂ S pH ≥ 11,5	300 g/t ZnSO ₄ pH ≥ 11,5	pH ≥ 8,5
Köpürtücü	20 g/t MIBIC	20 g/t MIBIC	20 g/t MIBIC	20 g/t MIBIC
Devir	1200 dev/dk	1200 dev/dk	1200 dev/dk	1200 dev/dk
Toplayıcı:	500 g/t KAX	500 g/t KAX	500 g/t KAX	500 g/t KAX
Kondüsyonlama süresi	2 dk	2 dk	2 dk	2dk
Flotasyon süresi	5 dk	5 dk	5 dk	5 dk

Tablo 3.35 Giresun-Şebinkarahisar konvensiyonel yöntemle yapılan flotasyon test sonuçları

Tane Boyutu (µm)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)				Verim (%)		
			Pb	Zn	Fe	Cu	Pb	Zn	Cu
-150	Konsantre (Pb)	44,24	51,73	5,87	3,88	0,08	67,09	17,58	2,90
	Konsantre (Zn)	27,86	20,33	35,08	4,79	1,19	16,60	66,17	27,16
	Konsantre (Fe)	3,86	8,03	6,07	39,13	1,15	0,91	2,02	3,64
	Konsantre (Cu)	3,99	3,02	9,02	3,97	17,67	0,35	2,44	57,76
	Artık	20,05	25,60	9,01	4,36	0,52	15,05	12,23	8,54
	Besleme malı	100,00	34,11	14,77	6,59	1,22	100,00	100,43	100,00
-106	Konsantre (Pb)	49,41	55,61	4,62	4,43	0,06	80,55	15,45	2,42
	Konsantre (Zn)	30,22	15,71	38,37	5,43	0,55	13,92	78,46	13,59
	Konsantre (Fe)	2,16	7,37	0,33	39,65	0,42	0,47	0,05	0,74
	Konsantre (Cu)	4,04	2,66	2,05	5,17	24,91	0,32	0,56	82,31
	Artık	14,17	11,45	5,72	4,97	0,08	4,76	5,48	0,93
	Besleme malı	100,00	34,11	14,77	6,59	1,22	100,00	100,00	100,00
-75	Konsantre (Pb)	51,09	49,57	4,95	5,83	0,08	74,23	17,12	3,35
	Konsantre (Zn)	32,86	19,23	34,12	4,59	1,1	18,52	75,89	29,60
	Konsantre (Fe)	3,46	7,16	2,21	41,88	0,1	0,73	0,52	0,28
	Konsantre (Cu)	4,81	9,32	1,11	5,15	16,06	1,31	0,36	63,26
	Artık	7,78	22,84	11,61	5,28	0,55	5,21	6,11	3,50
	Besleme malı	100,00	34,11	14,77	6,59	1,22	100,00	100,00	100,00
-38	Konsantre (Pb)	48,19	50,15	10,23	3,06	0,75	70,85	33,37	29,43
	Konsantre (Zn)	31,89	26,85	28,19	5,03	0,45	25,10	60,86	11,69
	Konsantre (Fe)	6,51	1,13	2,79	43,99	1,1	0,22	1,23	5,83
	Konsantre (Cu)	5,36	0,34	3,27	4,67	11,87	0,05	1,19	51,81
	Artık	8,05	16,01	6,16	5,03	0,19	3,78	3,36	1,25
	Besleme malı	100,00	34,11	14,77	6,59	1,22	100,00	100,00	100,00



Şekil 3.57 Giresun-Şebinkarahisar Kurşun-Çinko Cevherinin konvensiyonel 106 µm tane boyu kütle-metal balansı

Giresun-Şebinkarahisar kurşun-çinko cevheri konvensiyonel Tablo 3.35 ve Şekil 3.59'daki flotasyon test sonuçları incelendiğinde mineraller için en yüksek tenör ve verim -106 µm tane boyutunda olduğu tespit edilmiştir. Bu tane boyutunda galen %55,61 Pb tenörü ve %80,55 verimin, sfalerit %38,37 Zn tenörü ve %78,46 verim ve kalkopirit %24,91 Cu tenörü ve %82,31 verime ulaşılmıştır.

150 µm dan 106 µm tane boyutuna kadar minerallerin tenör ve verimleri arttarken 106 µm tane boyutundan sonra minerallerin tenör ve verimlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Tane boyutu azaldıkça minerallerin serbestleşme dercesi artmasına rağmen tenör ve verimlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Bu tenör ve verimdeki düşüşün sebebi tane yüzeylerini kaplayan ince toz ve oksit tabakaların varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.10.1.2 Giresun-Şebinkarahisar Kurşun-Çinko Cevherinin Ultrasonik Enerji uygulanan flotasyon testleri

Ultrasonik enerjinin uygulandığı flotasyon testlerinde, sülfürlü cevher içindeki mineraller kollektif ve selektif flotasyon yapılarak birbirinden ayrılmıştır. Bu bölümde test koşulları, daha önce saf mineraller ile yapılan mikro-flotasyon çalışmaları ve daha önce yapılan literatür çalışmalarından yararlanılarak belirlenmiştir. Testlerde uygulanan flotasyon koşullar Tablo 3.36'da ve sonuçları Tablo 3.37'de verilmiştir. Giresun-Şebinkarahisar kurşun-çinko cevherinin ultrasonik enerji uygulandığı en uygun boyut olan 38 µm kütle-metal balansı Şekil 3.60'da verilmiştir.

PbS+CuFeS₂+ZnS+FeS₂ flotasyonu için, 1 L selül içine 250 g malzeme ilave edilerek %30 katı oranında pülp oluşturulmuştur. Ardından pülp'e minerallerin yüzeyinin temizlenmesi için 60 sn ultrasonik enerjisi verilmiştir. Daha sonra ultrasonik enerji uygulanan pülp içine reaktifler ilave edildikten sonra 2 dk kondisyonlanmış, sonrasında pülp flotasyon selülünde 5 dk boyunca flote edilmiştir.

PbS flotasyon için, 1 L selül içine 250 g malzeme ilave edilerek %30 katı oranında pülp oluşturulmuştur. Ardından pülp'e minerallerin yüzeyi temizlenmesi için 60 sn ultrasonik enerji verilmiştir. Daha sonra pülp içine reaktifler ilave edildikten sonra 2 dk kondisyonlanmış, sonrasında sfalerit, pirit ve kalkopiriti bastırmak için 1 L'lik

selülde temiz su içinde 60 sn ultrasonik enerji verilen pülp flotasyon selülünde 5 dk. boyunca flote edilmiştir.

CuFeS₂ flotasyonu için 1 L selül içine 250 g malzeme ilave edilerek %30 katı oranında pülp oluşturulmuştur. Ardından pülp'e minerallerin yüzeyinin temizlenmesi için 60 sn ultrasonik enerjisi verilmiştir. Ultrasonik enerji uygulanan pülp içersine reaktifler ilave edilip 2 dk daha kondisyonlandıktan sonra 5 dk flote edilmiştir.

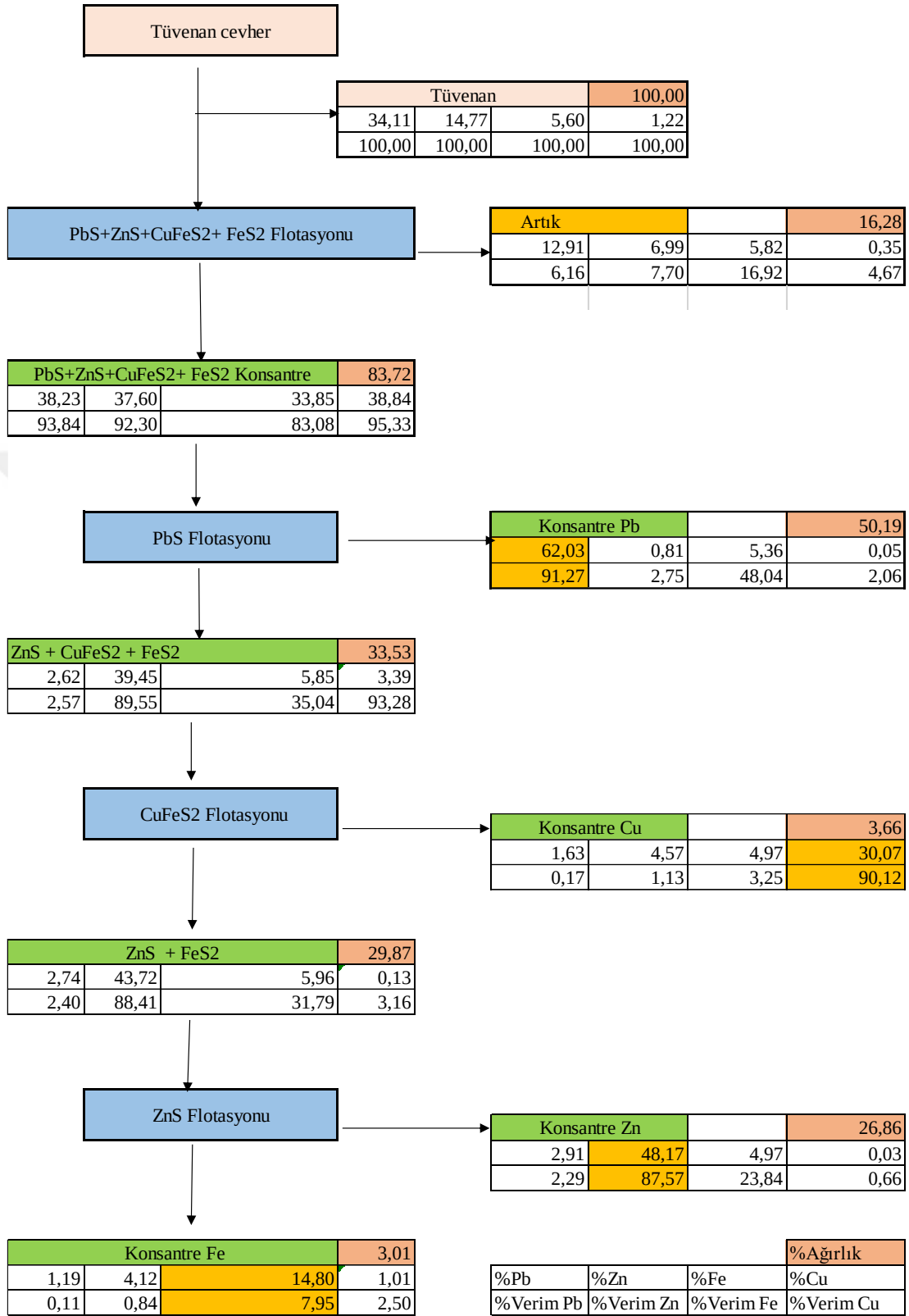
ZnS flotasyonu için, 1 L selül içine 250 g malzeme ilave edilerek %30 katı oranında pülp oluşturulmuştur. Ardından pülp'e minerallerin yüzeyinin temizlenmesi için 60 sn ultrasonik enerjisi verilmiştir. Ultrasonik enerji uygulanan pülp içersine reaktifler ilave edilip 2 dk daha kondisyonlandıktan sonra 5 dk flote edilmiştir

Tablo 3.36 Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevherine ultrasonik enerji kullanılarak yapılan flotasyon test koşulları

	PbS+CuFeS ₂ ZnS+FeS ₂	PbS Flotasyonu	CuFeS ₂ Flotasyonu	ZnS Flotasyonu
Katı oranı	%30	%30	%30	%30
pH	8,5	8,5	11	11,5
Canlandırıcı	800 g/t CuSO ₄ US enerji	US enerji	US enerji	800 g/t CuSO ₄ US enerji
Bastırıcı	1000 g/t Na ₂ SiO ₃	US enerji	300 g/t ZnSO ₄ pH ≥ 11,5	pH ≥ 8,5
Köpürtücü	20 g/t MIBIC	20 g/t MIBIC	20 g/t MIBIC	20 g/t MIBIC
Devir	1200 dev/dk	1200 dev/dk	1200 dev/dk	1200 dev/dk
Toplayıcı:	500 g/t KAX	500 g/t KAX	500 g/t KAX	500 g/t KAX
Kondüsyonlama süresi	2 dk	2 dk	2 dk	2dk
Flotasyon süresi	5 dk	5 dk	5 dk	5 dk

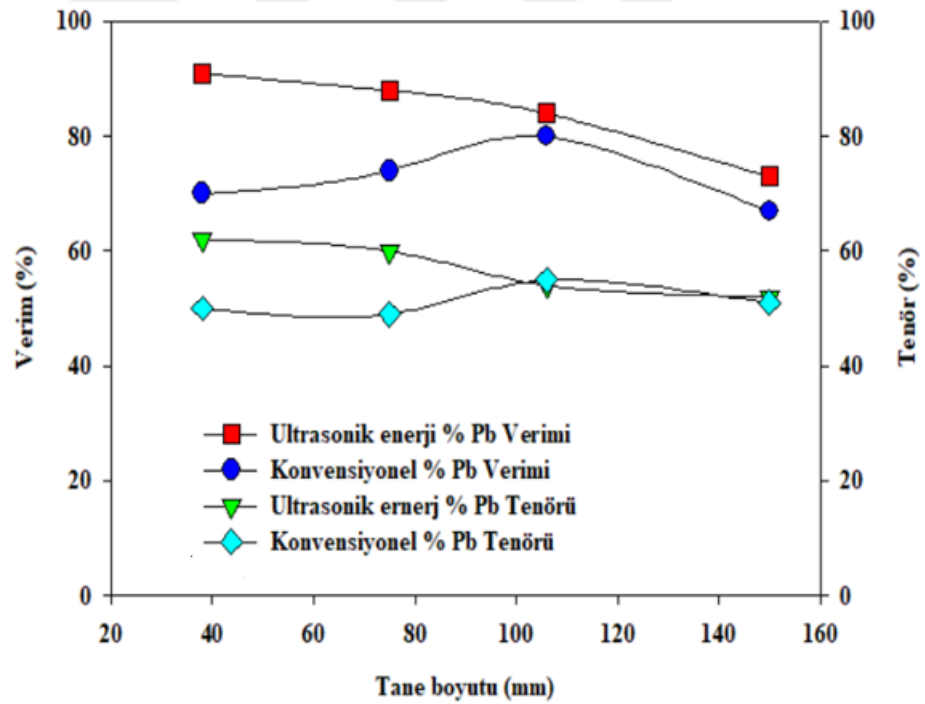
Tablo 3.26 Giresun-Şebinkarahisar ultrasonik enerji uygulanarak yapılan flotasyon test sonuçları

Tane Boyutu (µm)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)				Verim(%)		
			Pb	Zn	Fe	Cu	Pb	Zn	Cu
-150	Konsantre (Pb)	48,09	52,07	6,87	5,65	0,08	73,40	22,35	3,14
	Konsantre (Zn)	24,36	18,23	42,22	4,43	0,91	13,02	69,59	18,09
	Konsantre (Fe)	4,46	9,16	2,21	35,58	0,1	1,20	0,67	0,36
	Konsantre (Cu)	5,71	12,02	1,84	5,35	16,46	2,01	0,71	76,70
	Artık	17,38	20,36	5,68	5,23	0,12	10,37	6,68	1,70
	Besleme malı	100,00	34,11	14,77	6,59	1,22	100,00	100,00	100,00
-106	Konsantre (Pb)	53,41	54,11	4,07	4,98	0,03	84,72	14,71	1,31
	Konsantre (Zn)	30,52	12,01	39,07	5,93	0,50	10,74	80,69	12,48
	Konsantre (Fe)	2,86	3,77	1,82	48,84	0,49	0,32	0,35	1,15
	Konsantre (Cu)	4,04	0,66	1,95	4,39	25,51	0,08	0,53	84,31
	Artık	9,17	15,42	5,99	6,05	0,10	4,14	3,72	0,75
	Besleme malı	100,00	34,11	14,77	6,59	1,22	100,00	100,00	100,00
-75	Konsantre (Pb)	50,09	60,07	0,7	5,32	0,01	88,21	2,37	0,41
	Konsantre (Zn)	29,86	10,03	43,12	4,96	0,18	8,78	87,12	4,40
	Konsantre (Fe)	3,46	0,66	0,76	46,87	0,41	0,07	0,18	1,16
	Konsantre (Cu)	3,81	0,32	1,11	4,05	27,26	0,04	0,29	85,03
	Artık	12,78	7,77	11,61	5,26	0,86	2,91	10,04	9,00
	Besleme malı	100,00	34,11	14,77	6,59	1,22	100,00	100,00	100,00
-38	Konsantre (Pb)	50,19	62,03	0,81	5,36	0,05	91,27	2,75	2,06
	Konsantre (Zn)	26,86	2,91	48,17	4,97	0,03	2,29	87,57	0,66
	Konsantre (Fe)	3,01	1,19	4,12	47,95	1,01	0,11	0,84	2,49
	Konsantre (Cu)	3,66	1,63	4,57	4,97	30,07	0,17	1,13	90,13
	Artık	16,28	12,91	6,99	5,82	0,35	6,16	7,70	4,67
	Besleme malı	100,00	34,11	14,77	6,59	1,22	100,00	100,00	100,00

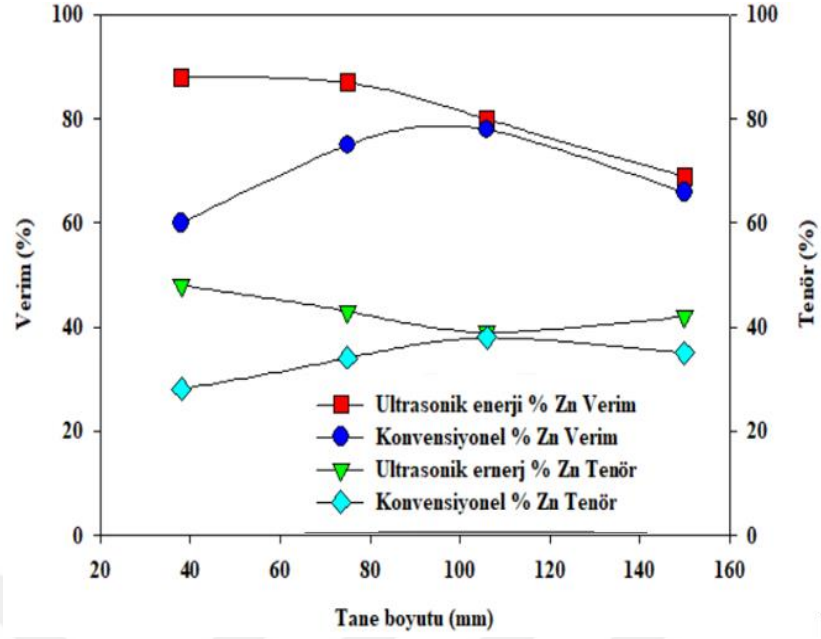


Şekil 3.58 Giresun-Şebinkarahisar Kurşun-Çinko Cevherinin ultrasonik enerji uygulanan 38 µm tane boyutu kütle-metal balansı

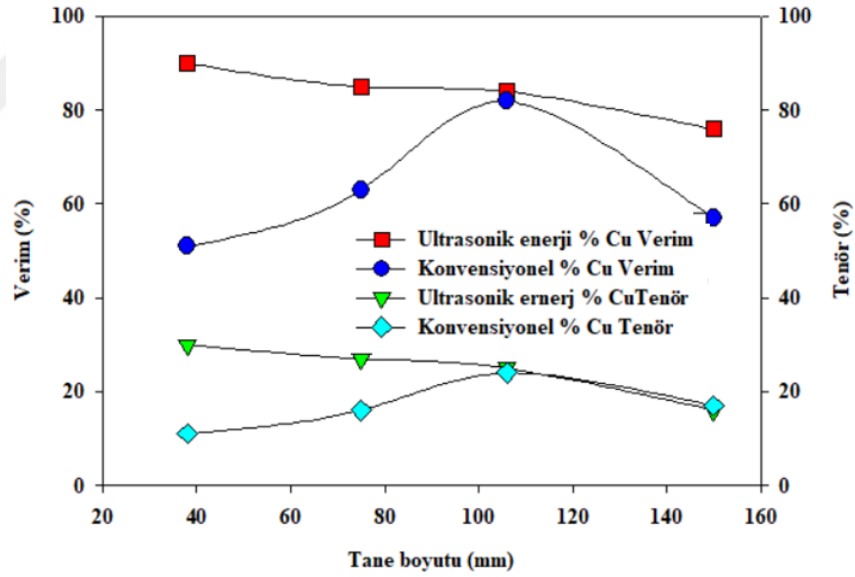
Giresun-Şebinkarahisar kurşun-çinko cevheri ultrasonik enerjinin uygulandığı test sonuçları Tablo 3.37’de ve Şekil 3.60’da verilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde tane boyutu azaldıkça minerallerin tenör ve verim değerinin arttığı tespit edilmiştir. Mineraller için en yüksek tenör ve verim -38 μ m tane boyutunda olduğu tespit edilmiştir. Bu tane boyutunda galen %62,03 Pb tenörü ve %91,27 verimine, sfalerit %48,17 Zn tenörü ve %87,57 verime ve kalkopirit %30,07 Cu tenörü ve %90,13 Cu verimde konsantre olarak kazanılmıştır. Ultrasonik enerjinin uygulandığı 106 μ m tane boyutunda minerallerin serbestleşmeye başladığı ve daha ince boyutlarda ultrasonik enerjinin tane yüzeylerindeki ince şlam ve oksit tabakalarını temizlemesi nedeniyle tenör ve verim değerinin arttığı düşünülmektedir. Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevheri (konvensiyonel yöntemle ve ultrasonik enerji uygulanmalı) tane boyutuna bağlı (galen, sfalerit ve kalkopirit) mineralinin tenör- verim değişimi Şekil 3.61-3.63’de verilmiştir.



Şekil 3.59 Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevheri (ultrasonik enerji uygulanmasız ve ultrasonik enerji uygulanmalı) tane boyutuna bağlı galen mineralinin tenör-verim değişimi



Şekil 3.60 Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevheri (ultrasonik enerji uygulanmasız ve ultrasonik enerji uygulanmalı) tane boyutuna bağlı sfalerit mineralinin tenör- verim değişimi



Şekil 3.61 Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevheri (ultrasonik enerji uygulanmasız ve ultrasonik enerji uygulanmalı) tane boyutuna bağlı kalkopirit mineralinin tenör - verim değişimi

Şekil 3.61-3.63'de verilmiş olan Giresun-Şebinkarahisar kurşun çinko cevheri tane boyutuna bağlı galenin konvensiyonel yöntem ve ultrasonik enerji uygulanan flotasyon test sonuçları değerlendirildiğinde, konvensiyonel yöntem uygulandığında 106 µm tane boyutuna kadar tenör-verim tüm mineraller için artarken, ince boyutlara

doğru tenör-verim değerinin azaldığı görülmektedir. Minerallere ultrasonik enerji uygulandığında ise ince boyutlara doğru tenör ve verim değerinin artışı görülmektedir. Galen mineraline ultrasonik enerji uygulandığında, -38 µm tane boyutunda tenör değerinde % 12'lik ve verim değerinde %21'lik bir artış görülmektedir. Sfaleritin test sonuçları değerlendirildiğinde, sfaleritin özellikle -38 µm tane boyutunda ultrasonik enerji uygulanmasıyla konvensiyonel yöntemle göre, tenör değerinde yaklaşık % 20'lik ve verim değerinde yaklaşık %27'lik bir artış görülmektedir. Kalkopirit mineralinin test sonuçları değerlendirildiğinde, ultrasonik enerji uygulanmasıyla özellikle -38 µm tane boyutunda konvensiyonel yöntemle göre, tenör değerinde yaklaşık %19'luk ve verim değerinde yaklaşık %39'lük bir artış görülmektedir. Konvensiyonel yöntem uygulandığında ince boyutlarda (-75 ve 38 µm) tenör ve verimin azalmasının nedeni, bu boyutlarda mineral tane yüzeylerinde şlamın artması ve tane yüzeyi toplayıcı reaktifle yeterince bağ kuramamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.10.2 Balıkesir-Balya Kurşun-Çinko Tesisi Flotasyon Testleri

Balıkesir-Balya kurşun-çinko cevherinin Şekil 3.12'deki XRD grafiği incelendiğinde değerli mineral olarak galen ve sfalerit, gang minerali olarak kaolen, kuvars ve dolomit minerallerinden oluştuğu görülmektedir. Cevher hem ultrasonik flotasyon test düzeneğinde hem de konvensiyonel flotasyon test düzeneğinde testlere tabi tutulmuştur. Balıkesir-Balya kurşun-çinko cevherinin ultrasonlu ve konvensiyonel flotasyon testleri iş akım şeması Şekil 3.64'de verilmiştir. Tüm flotasyon testlerinde toplayıcı olarak Potasyum Amil Xsantat (KAX), pH ayarlayıcı olarak H₂SO₄ ve NaOH kullanılmıştır. Silikatları bastırmak için 1000 g/t Na₂SiO₃ ve köpürtücü olarak 20 g/t MIBC kullanılmıştır. (Boulton, 2005; Çilek, 2006; Kurşun ve Ulusoy, 2015; Atak, 2017)

Konvensiyonel flotasyon yönteminde;

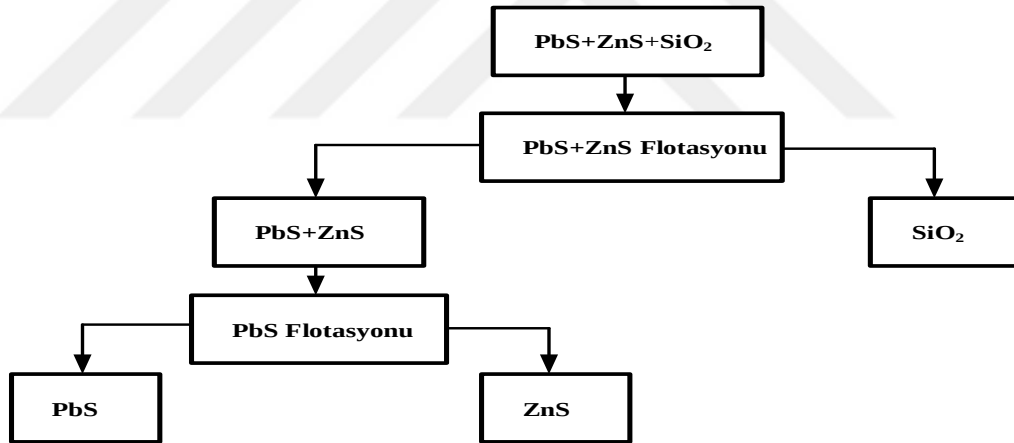
Kollektif flotasyonu için 1 L selül içine 250 g malzeme ilave edilerek %30 katı oranında pülp oluşturulmuştur. Ardından, pülp içine belirli oranda reaktifler ilave edilmiş ve her reaktif için 2 dk kondisyonlama işlemi yapılmıştır. Daha sonra, pülp flotasyon selülünde 5 dk boyunca flote edilmiştir.

Ultrasonikenerjinin kullanıldığı flotasyon test düzeneğinde ise;

PbS+ZnS flotasyonu için 1 L selül içine 250 g malzeme ilave edilerek %30 katı oranında pülp oluşturulmuştur. Ardından pülp'e minerallerin yüzeyinin temizlenmesi için kondisyonlama öncesi 60 sn ultrasonik enerjisi verilmiştir . Daha sonra ultrasonik enerji uygulanan pülp içine reaktifler ilave edildikten sonra 2 dk kondisyonlanmış, sonrasında pülp flotasyon selülünde 5 dk. boyunca flote edilmiştir .

PbS flotasyon için 1 L selül içine 250 g malzeme ilave edilerek %30 katı oranında pülp oluşturulmuştur. Ardından pülp'e minerallerin yüzeyi temizlenmesi için koşullandırma 60 sn ultrasonik enerjisi verilmiştir. Daha sonra ultrasonik enerji uygulanan pülp içine reaktifler ilave edildikten sonra 2 dk kondisyonlanmış, sonrasında pülp flotasyon selülünde 5 dk. boyunca flote edilmiştir.

Hem ultrasonlu hem de konvensiyonel yöntemle yapılan flotasyon testlerinde önce galen ve sfalerit birlikte konsantre olarak alınmıştır. Daha sonra ise galen konsantre olarak alınmıştır. Tüm flotasyon testlerinde bir temizleme ve bir süpürme flotasyonu yapılmıştır.



Şekil 3.64 Balıkesir-Balya kurşun çinko tesisi flotasyon testleri iş akım şeması

3.10.2.1 Balıkesir-Balya Kurşun-Çinko Cevherinin konvensiyonel flotasyon testleri

Konvensiyonel yöntemin uygulandığı flotasyon testlerinde, önce PbS+ZnS birlikte yüzdürülmüş daha sonra ise galen konsantre olarak alınmıştır. Testlerde uygulanan koşulları Tablo 3.38'de ve sonuçları Tablo 3.39'da verilmiştir. Balıkesir-Balya kurşun-

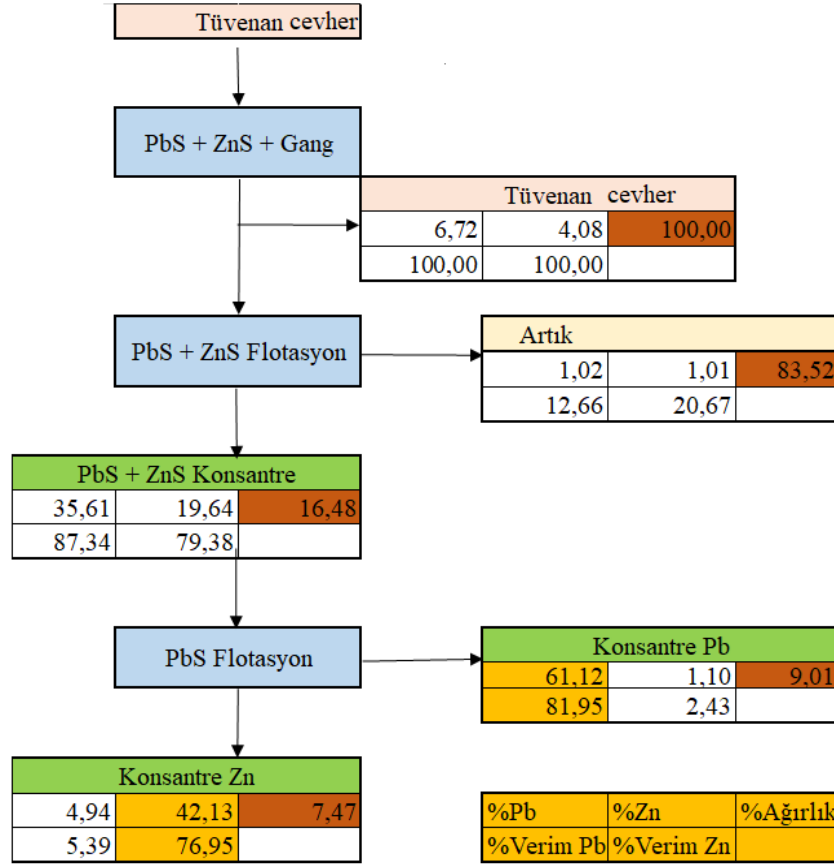
Çinko cevherinin en uygun boyut olarak belirlenen 75 µm kütle-metal balansı Şekil 3.65’de verilmiştir.

Tablo 3.27 Balıkesir-Balya kuşun çinko cevheri konvensiyonel flotasyon test koşulları

	PbS+ZnS	PbS
Kondisyonlama süresi	2 dk	2 dk
Flotasyon süresi	5 dk	5 dk
Katı oranı	%30	%30
Canlandırıcı	800 g/t CuSO ₄	-
Bastırıcı	1000 g/t Na ₂ SiO ₃	300 g/t ZnSO ₄
Köpürtücü	20 g/t MIBIC	20 g/t MIBIC
pH	(8,5)	(8,5)
Koşullandırma süresi	2 dk	2 dk
Devir	1200 dev/dk	1200 dev/dk
Toplayıcı	500 g/t KAX	500 g/t KAX

Tablo 3.39 Balıkesir-Balya kuşun çinko cevheri konvensiyonel flotasyon test sonuçları

Tane Boyutu (µm)	rnler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Verim (%)	
			Pb	Zn	Pb	Zn
-150	Konsantre (Pb)	22,18	16,88	1,01	55,68	5,49
	Konsantre (Zn)	12,87	1,40	15,08	2,68	47,56
	Artık	64,95	4,31	2,95	41,64	46,95
	Besleme malı	100,00	6,72	4,08	100,00	100,00
-106	Konsantre (Pb)	8,79	45,94	0,32	60,02	0,69
	Konsantre (Zn)	10,18	1,99	23,56	3,01	58,67
	Artık	81,03	3,07	2,05	36,97	40,64
	Besleme malı	100,00	6,72	4,08	100,00	100,00
-75	Konsantre (Pb)	9,01	61,12	1,10	81,85	2,42
	Konsantre (Zn)	7,47	4,94	42,13	5,48	76,95
	Artık	83,52	1,02	1,01	12,66	20,63
	Besleme malı	100,00	6,72	4,08	100,00	100,00
-38	Konsantre (Pb)	10,19	46,55	1,21	70,54	3,02
	Konsantre (Zn)	6,86	2,03	40,23	2,07	67,54
	Artık	82,95	2,22	1,45	27,39	29,44
	Besleme malı	100,00	6,72	4,08	100,00	100,00



Şekil 3.62 Balıkesir-Balya Kurşun-Çinko Cevherinin konvensiyonel 75 µm tane boyu kütle-metal balansı

Tablo 3.39’da ve Şekil 3.65’deki konvensiyonel yöntem flotasyon test sonuçları incelendiğinde mineraller için en uygun tenör ve verim -75 µm tane boyutunda olduğu tespit edilmiştir. Bu tane boyutunda galen %61,12 Pb tenörü ve %81,85 Pb verimin de, sfalerit %42,13 Zn tenörü ve %76,95 Zn verimde konsantreler kazanılmıştır.

Galen ve sfalerit 75 µm tane boyutuna kadar minerallerin tenör ve verimlerinin artmasına rağmen, 75 µm tane boyutundan sonra minerallerin tenör ve verimlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

Tane boyutu azaldıkça minerallerin serbestleşme dercesi artmasına rağmen tenör ve verimlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Bu tenör ve verimdeki düşüşün nedeni ise tane yüzeylerini kaplayan şlam tabakalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.10.2.2 Balıkesir-Balya Kurşun-Çinko Cevheri Ultrasonik enerji uygulanan Flotasyon Testleri

Ultrasonik enerji uygulanan flotasyon testlerinde sülfürlü cevhere kollektif ve selektif flotasyon testleri yapılarak ultrasonik enerjinin verim üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Tüm flotasyon testlerinde toplayıcı olarak Potasyum Amil Xsantat (KAX) ve pH ayarlayıcı olarak H_2SO_4 ve NaOH kullanılmıştır. Sfaleritin canlandırmak için 800 g/t $CuSO_4$ kullanılmıştır. Sfaleriti bastırmak için 500 g/t $ZnSO_4$, silikatları bastırmak için 1000 g/t Na_2SiO_3 (Çilek, 2006; Kurşun ve Ulusoy, 2015; Atak, 2017).

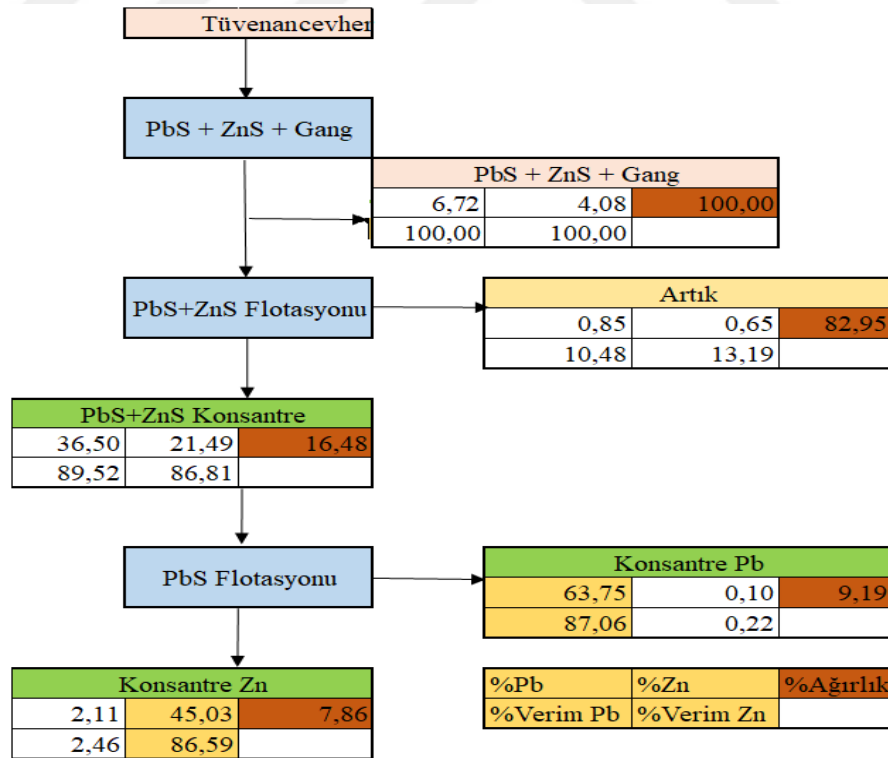
Ultrasonik enerji kullanılarak yapılan flotasyon test koşulları Tablo 3.40'da ve test sonuçları Tablo 3.41'de verilmiştir. Balıkesir-Balya kurşun-çinko cevherinin ultrasonik enerji uygulanarak en uygun boyut olarak belirlenen 75 μm kütle-metal balansı Şekil 3.66'da verilmiştir.

Tablo 3.40 Balıkesir-Balya kurşun çinko cevheri ultrasonik enerji kullanılarak yapılan flotasyon test koşulları

	PbS+ZnS	PbS
Kondüsyonlama süresi	2 dk	2 dk
Flotasyon süresi	5 dk	5 dk
Katı oranı	%30	%30
Canlandırıcı	800 g/t $CuSO_4$	
Bastırıcı	1000 g/t Na_2SiO_3	Ultrasonik enerji
Köpürtücü	20 g/t MIBIC	20 g/t MIBIC
pH	8,5	8,5
Koşullandırma süresi	2 dk	2 dk
Devir	1200 dev/dk	1200 dev/dk
Toplayıcı:	500 g/t KAX	500 g/t KAX

Tablo 3.28 Balıkesir-Balya kurşun çinko cevheri ultrasonik enerji uygulanarak yapılan test sonuçları

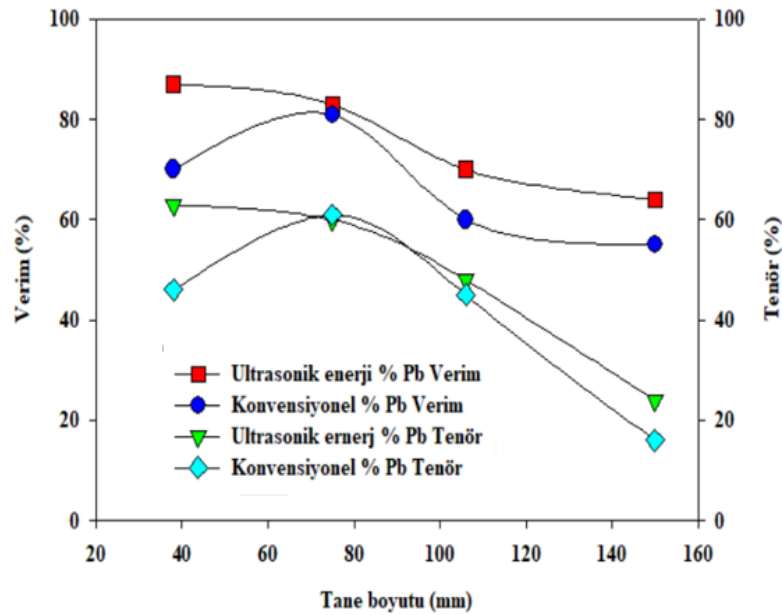
Tane Boyutu (µm)	Ürünler	Ağırlık (%)	% Tenör		% Verim	
			Pb	Zn	Pb	Zn
-150	Konsantre (Pb)	18,10	24,05	4,08	64,71	18,06
	Konsantre (Zn)	10,86	1,97	20,14	3,18	53,48
	Artık	71,04	3,04	1,64	32,11	28,46
	Besleme malı	100,00	6,72	4,08	100,00	100,00
-106	Konsantre (Pb)	9,79	48,34	2,22	70,34	5,31
	Konsantre (Zn)	7,08	1,18	38,84	1,24	67,24
	Artık	83,13	2,30	1,35	28,42	27,44
	Besleme malı	100,00	6,72	4,08	100,00	100,00
-75	Konsantre (Pb)	9,35	60,18	1,45	83,69	3,32
	Konsantre (Zn)	7,52	2,20	44,27	2,46	81,43
	Artık	83,13	1,12	0,75	13,85	15,25
	Besleme malı	100,00	6,72	4,08	100,00	100,00
-38	Konsantre (Pb)	9,19	63,75	0,10	87,06	0,22
	Konsantre (Zn)	7,86	2,11	45,03	2,46	86,59
	Artık	82,95	0,85	0,65	10,48	13,19
	Besleme malı	100,00	6,72	4,08	100,00	100,00



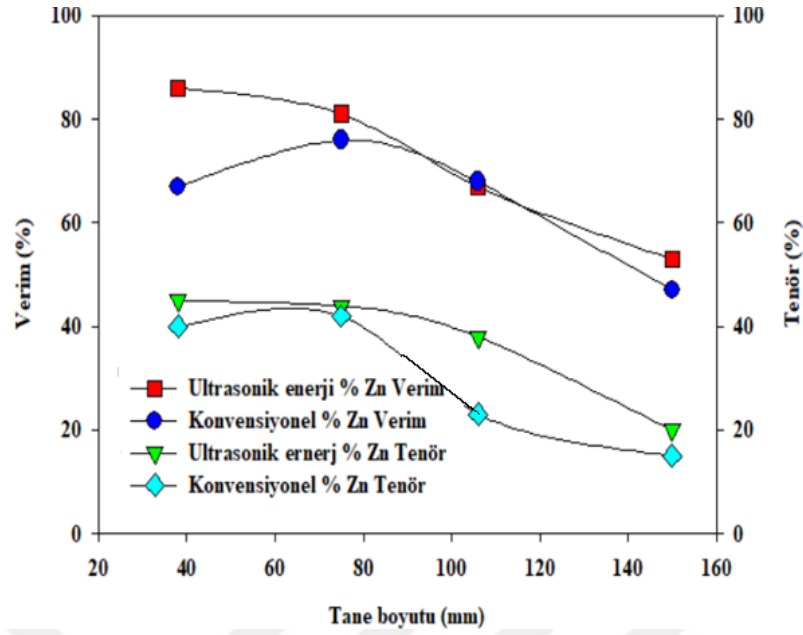
Şekil 3.63 Balıkesir-Balya kurşun-çinko cevherinin ultrasonik enerji 38 µm tane boyu kütle-metal balansı

Ultrasonik enerjinin uygulandığı Tablo 3.41’de ve Şekil 3.66’daki flotasyon test sonuçları incelendiğinde mineraller için en uygun tenör ve verim -38 μm tane boyutunda olduğu tespit edilmiştir. Bu tane boyutunda galen %63,75 Pb tenörü ve %87,06 Pb veriminde, sfalerit %45,03 Zn tenörü ve %66,59 Zn verimde konsantreler kazanılmıştır.

Galen ve sfalerit ultrasonik enerji uygulandığında ince tane boyutlarına doğru gidildikçe tenör ve verim değerinin arttığı görülmektedir. Minerallerin serbestleşme dercesine paralel olarak ultrasonik enerjinin etkisiyle tenör ve verim değerinin konvensiyonel yöntemle göre arttığı tespit edilmiştir. Balıkesir-Balya kurşun çinko cevheri tane boyutuna bağlı (konvensiyonel yöntemle ve ultrasonik enerji uygulanmalı) galen ve sfalerit’in tenör- verim değişimi Şekil 3.67-3.68’de verilmiştir.



Şekil 3.67 Balıkesir-Balya kurşun çinko cevheri (ultrasonik enerji uygulanmasız ve ultrasonik enerji uygulanmalı) tane boyutuna bağlı galen mineralinin tenör- verim değişimi



Şekil 3.64 Balıkesir-Balya kurşun çinko cevheri (ultrasonik enerji uygulanmasız ve ultrasonik enerji uygulanmalı) tane boyutuna bağlı sfalerit mineralinin tenör- verim değişimi

Şekil 3.67-3.68'de incelendiğinde, galen konvansiyonel yöntem uygulandığında 75 μ m tane boyutuna kadar tenör-verim artarken, ince boyutlarda tenör-verim değerinin azaldığı görülmektedir. Galen'e ultrasonik enerji uygulandığında 75 μ m tane boyut fraksiyonundan sonraki ince boyutlarda tenör-verim değerlerinin arttığı görülmektedir.

Sfalerite ultrasonik enerji uygulandığında tenör ve verim değerlerinin arttığı görülmektedir. Sfaleritin de galen gibi özellikle 75 μ m tane boyutundan sonra konvansiyel yöntem uygulandığında tenör ve verim değerinin azaldığı görülmektedir. Ancak, ultrasonik enerji uygulandığında ise ince boyutlarda tenör ve verimin arttığı görülmektedir.

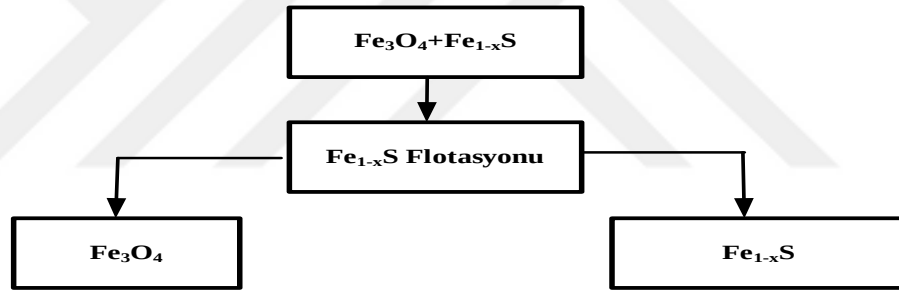
Bu iki mineral için konvansiyonel flotasyon uygulandığında 75 μ m den sonraki boyutlarda tenör ve verim değerinin düştüğü görülmektedir. Ancak ultrasonik enerji uygulamasıyla 38 μ m tenör ve verim değerinin arttığı görülmektedir.

Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde, ince boyutlara doğru iki mineralde daha iyi serbestleşmekte ve aynı zamanda ultrasonik enerjinin sağladığı kavitasyon etkisiyle ince toz tabakaları temizlenmektedir. Ultrasonik enerji şlam ve oksit tabakalarını serbestleşen mineraller üzerinden temizlediği için mineral reaktiflerle daha iyi bağlanmakta dolayısıyla ince boyutlarda tenör ve verimin artışı tespit edilmiştir.

3.10.3 Kütahya-Çatak Demir Tesisi Flotasyon Testleri

Kütahya-Çatak cevheri önemli oranda manyetit ve bunun yanında kükürt açısından sorun yaratan pirotin mineralini içermektedir. Bu cevherden kükürt oranını azaltmak için hem konvansiyonel flotasyon hem de ultrasonik enerji uygulanarak iki aşamada flotasyon testleri yapılmıştır.

Bu bölümde özellikle kükürt içeriği açısından sorunlu olan pirotinli cevherden elde edilen manyetit konsantrelerinin kükürt içeriğinin düşürülmesi hedeflenmiştir. İlk flotasyon testleri -106 μm tane boyutlarında manyetik zenginleştirme testlerinde elde edilen konsantreler kullanılarak yapılmıştır. Flotasyon testlerinde manyetit bastırılıp pirotin yüzdürülerek ters flotasyon yapılmıştır. Kütahya-Çatak cevheri ultrasonlu ve konvansiyonel yöntem ile yapılan flotasyon testleri için iş akım şeması Şekil 3.69'da verilmiştir.



Şekil 3.65 Kütahya-Çatak demir cevheri flotasyon testleri iş akış şeması

3.10.3.1 Kütahya-Çatak Demir Cevheri Ultrasonik Enerji Uygulanmayan Flotasyon Testleri

Ultrasonik enerji uygulanmayan flotasyon testlerinde, selektif flotasyon testleri yapılarak zenginleştirilmiştir. Flotasyon test koşulları daha önceki yapılan literatür çalışmaları dikkate alınarak belirlenmiştir. Flotasyon testleri 1 L hacme sahip flotasyon selülü kullanılmıştır. Tüm flotasyon testlerinde toplayıcı olarak Potasyum Amil Xsantat (KAX), pH ayarlayıcı olarak H_2SO_4 ve NaOH kullanılmıştır. Pirotinli manyetit konsantresinin flotasyon test koşulları Tablo 3.42'de verilmiştir.

Tablo 3.42 Kütahya-Çatak demir cevheri konvensiyonel yöntem test koşulları

Kondüsyonlama süresi	5 dk
Flotasyon süresi	5 dk
Katı oranı	% 30
Köpürtücü	20 g/t MIBIC
pH	5
Devir	1200 dev/dk
Toplayıcı	400 g/t KAX

Kütahya-Çatak demir cevherine konvensiyonel yöntemin uygulandığı flotasyon test sonuçları Tablo 3.43’de verilmiştir. Tablo 3.43’de test sonuçları incelendiğinde, 106 µm tane boyutunda galen %66,51 Fe - %94,30 verim elde edilmiştir. Pirotinli cevherden elde edilen manyetit konsantresi konvensiyonel flotasyona yapıldığında %3,36 S olan kükürt içeriğinin %2 S ye düştüğü tespit edilmiştir.

Tablo 3.29 Kütahya-Çatak demir cevheri konvensiyonel yöntem test sonuçları

Tane Boyutu (µm)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Verim (%)
			Fe	S	Fe
	Konsantre	88,46	66,51	2,00	94,30
	Artık	11,54	30,80	13,80	5,70
	Besleme malı	100,00	62,34	3,36	100,00

Kütahya-Çatak demir cevherine konvensiyonel yöntemle yapılan flotasyon testinde tenör ve verim az miktarda artmış olduğu belirlenmiştir. Fakat bunun yanında kükürt içeriği istenilen oranda düşürülemediği. Konvensiyonel flotasyon yöntemiyle kükürt içeriğinin düşmemesinin nedeni, özellikle pirotin yüzeyinin çok çabuk oksit tabakasıyla kaplanmasından dolayı yeterince hidrofob olmadığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.10.3.2 Kütahya-Çatak Demir Cevheri Ultrasonik Enerji Uygulanan Flotasyon Testleri

Ultrasonik enerji uygulanan flotasyon testlerinde ultrasonik enerjinin verim-tenör üzerindeki etkisini net bir şekilde ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Test koşulları daha

önceki yapılan literatür çalışmaları dikkate alınarak belirlenmiştir. Flotasyon testleri 1 L hacime sahip flotasyon selülü kullanılmıştır..

Ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneği yardımcı bir ekipman olarak kullanılarak Kütahya-Çatak demir cevherine flotasyon testleri yapılmıştır. Tüm flotasyon testlerinde toplayıcı olarak Potasyum Amil Xsantat (KAX) ve pH ayarlayıcı olarak H₂SO₄ ve NaOH kullanılmıştır. Pirotini canlandırmak için ultrasonik enerji kullanılmıştır. Pirotinli manyetit konsantresinin flotasyon test koşulları Tablo 3.44’de verilmiştir.

Tablo 3.30 Kütahya-Çatak demir cevheri ultrasonik enerji uygulanarak yapılan flotasyon test koşulları

Katı oranı	% 30
Canlandırıcı	Ultrasonik enerji
Köpürtücü	20 g/t MIBIC
pH	5
Devir	1200 dev/dk
Toplayıcı:	400 g/t KAX
Kondüsyonlama süresi	5 dk
Flotasyon süresi	5 dk

Kütahya-Çatak demir cevherine ait numuneye ultrasonik enerji kullanılarak yapılan flotasyon test sonuçları Tablo 3.45 da verilmiştir. Tablo 3.45’deki sonuçlar değerlendirildiğinde, 106 µm tane boyutunda %68 Fe - %96,66 verim elde edilmiştir. Pirotinli cevherden elde edilen manyetit konsantresinin flotasyona tabi tutulması sonucunda %3,36 S olan kükürt içeriğinin % 0,45 S’e düştüğü tespit edilmiştir.

Tablo 3.31 Kütahya-Çatak demir cevheri ultrasonik enerji uygulanarak yapılan flotasyon test sonuçları

Tane Boyutu (µm)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Verim (%)
			Fe	S	Fe
	Konsantre	92,46	68,00	0,45	96,66
	Artık	7,54	28,82	38,99	3,34
	Besleme malı	100,00	65,05	3,36	100,00

Kütahya-Çatak demir cevherine yapılan ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneği yardımcı bir ekipman olarak kullanıldığı flotasyon testinde tenör ve verim az miktarda artış olduğu belirlenmiştir. Ancak konvensiyonel uygulamanın aksine, ultrasonik uygulamayla kükürt içeri istenilen oranda düşürülmüştür. Ultrasonik enerji

destekli flotasyon test düzeneği özellikle pirotin yüzeyinin oksit tabakasını temizlemiş ve bu sayede pirotin yüzeyi yeterince hidrofob olması sağlanmıştır. Böylece pirotin yüzdürülerek manyetit içersindeki kükürt oranı düşmesi sağlanmıştır. Ultrasonik enerji uygulanan flotasyon testlerinde konvensiyonel yöntemle göre tenör-verim değerinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca kükürt oranı ultrasonik enerji yardımıyla istenilen seviyeye düşürülmüştür.

Ultrasonik enerji destekli flotasyon test düzeneği mevcut bir tesiste kullanılmak istendiğinde amaç selektivite ve verimi artırmak ise temizleme ve süpürme selülleri öcesinde kondisyonlama tankı önüne kurulmalıdır. Eğer amaç galeni diğer pirit, kalkopirit ve sfalerit gibi minerallerden ayırmak ise temizleme ve süpürme selülleri öcesinde kondisyonlama tankından sonra kurulmalıdır.

Maliyet hesabı; 600 Watt gücünde bir ultrasonik jenaretör 1 saate 0,6 kWh enerji harcamaktadır. Testlerde 250 g malzeme kullanılmış ve uygun ultrasonik enerji süresi 60 sn olarak belirlenmiştir. Ultrasonik enerji uygulayarak tesise 1 ton tüvenan beslendiğinde %50,09 ağırlıklı %60,09 Pb içerikli bir konsantre, konvensiyonel flotasyon uygulandığında %51,09 ağırlıklı %49,57 Pb içerikli bir konsantre elde edilmiştir. Buna göre tesisin galen için kar-zarar durumunu hesaplayacak olursak. (Veri: Enerji maliyeti 0,73 TL/kwh 1ton %60,07 Pb içerikli konsantre 2175 \$. 1 ton %49,57 Pb içerikli konsantre 1775 \$)

1 saate 0,6 kW enerji harcanırsa

$$\frac{60 \text{ sn}}{x}$$

$$x = 0,01 \text{ kW}$$

250 g cevher için harcanan ultrasonik enerji = 0,01 kW x 0,73 TL = 0,0073 TL

1 ton cevher için harcanan enerji = (0,0073 TLx1000000 g)/250g =29,2 TL = 3 \$

Konvensiyonel flotasyon yapılan 1 ton tüvenan cevherden elde edilen konsanre fiyatı:

$$(1775 \times 51,09) / 100 = 906 \$$$

Ultrasonik enerji destekli flotasyon yapılan 1 ton tüvenan cevherden elde edilen konsanre fiyatı:

$$(2175 \times 50,09) / 100 = 1089 \$$$

Ultrasonik enerji kullanılması ile kullanılmaması durumunda 1089 \$ - 906 \$ = 183 \$'lık fark oluşmaktadır.

Ultrasonik enerji maliyeti düşüldüğünde : $183 \$ - 3 \$ = 180 \$$ daha karlı görölmektedir.

Galen için yapılan maliyet hesabında göröldüğü gibi ultrasonik enerji uygulaması işletme için karlı bir zenginleştirme parametresi olduğı görölmektedir. Bu durum diğeri sülfür mineralleri için ultrasonik enerji uygulamasıyla hem tenör hem verim değeri artığı için hesaplandığında elde edilen kar oranını atmaktadır.



BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında ultrasonik enerji, sülfürlü cevherlerin flotasyonunda yardımcı bir ekipman olarak kullanılarak flotasyon teknolojisinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında bulunan sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Flotasyon koşullarını belirlemek için yapılan konvensiyonel mikro-flotasyon testlerinde; galende %84, piritte %81, kalkopiritte %77 ve sfaleritte %76 verime ulaşılmıştır.

Ultrasonik enerji süresinin tespiti için yapılan mikro-flotasyon sonuçlarına göre ağırlıkça verimler sırasıyla şu şekildedir; uygun toplayıcı miktarını bulmak için yapılan ultrasonik enerji uygulandığı mikro-flotasyon test sonuçlarına göre en uygun ağırlıkça verimler sırasıyla şu şekildedir; Galen 500 g/t toplayıcıyla kullanılarak ultrasonik enerji uygulandığında %97 Pb verimi elde edilmiştir. Pirit 500 g/t toplayıcıyla kullanılarak ultrasonik enerji uygulandığında %88 Fe verimi elde edilmiştir. Kalkopirit 500 g/t toplayıcıyla kullanılarak ultrasonik enerji uygulandığında %90 Cu verimi elde edilmiştir. Safalerit 500 g/t toplayıcıyla kullanılarak ultrasonik enerji uygulandığında %93 Zn verimi elde edilmiştir. Uygun toplayıcı miktarını bulmak için yapılan ultrasonik enerji uygulandığı mikro-flotasyon test sonuçlarına göre; minerallere ultrasonik enerji uygulandığında daha yüksek verimde ürünler elde edilebilir.

Ultrasonik enerji süresinin tespiti için yapılan mikro-flotasyon sonuçlarına göre en uygun ağırlıkça verimler sırasıyla şu şekildedir; galene kondüsyonlama boyunca 60 sn ultrasonik enerji uygulandığında %91 verim elde edilmiştir. Pirite kondüsyonlama boyunca 60 sn ultrasonik enerji uygulandığında %88 verim elde edilmiştir. Kalkopirite kondüsyonlama boyunca 60 sn ultrasonik enerji uygulandığında %90 verim elde edilmiştir. Sfalerite kondüsyonlama boyunca 60 sn ultrasonik enerji uygulandığında %93 verim elde edilmiştir.

Mikro-flotasyon testlerinde ultrasonik enerji süresinin tespiti için yapılan mikro-flotasyon sonuçlarına göre ağırlıkça verimler genel olarak değerlendirildiğinde;

kondisyonlama öncesi ve kondisyonlama boyunca uygulandığında verim değerlerinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Konvansiyonel flotasyon testlerine göre verim değerleri incelendiğinde, galende %9'luk, piritte %10'luk, kalkopiritte %13'lük ve sfaleritte %17'lik artış olduğu tespit edilmiştir. Önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada kondisyonlama sonrası ultrasonik enerji uygulanarak verim değerleri karşılaştırılmıştır. Minerallere kondisyonlama sonrası ultrasonik enerji uygulandığında ise verim değerleri incelendiğinde galende %12'lik, piritte %66'luk, kalkopiritte %56'luk ve sfaleritte %58'lik azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu minerallere kondisyonlama sonrası ultasonik enerji uygulandığında ise galen hariç tüm minerallerin verimlerinin ciddi şekilde düştüğü tespit edilmiştir.

Saf minerallerin (galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit) yüzeylerinde meydana gelen fiziksel değişimleri incelemek için Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) görüntüleri çekilmiştir. Galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit minerallerine çekilen SEM görüntülerine göre, ultrasonik işlem görmemiş tane yüzeylerinde ince toz tabakalarının varlığı tesbit edilmiştir. Fakat minerallere koşullandırma öncesi ultrasonik enerji uygulandığında yüzeydeki toz tabakalarının neredeyse tamamen temizlendiği izlenmiştir. Ultrasonik enerji, mineral yüzeylerindeki ince toz tabakalarını ve oksit tabakalarını temizleyerek toplayıcının mineral yüzeyine daha iyi bağlanmasını sağlamakta ve böylece verimde artış meydana getirmektedir.

Mineral yüzeylerinde toplayıcı bulunup bulunmadığını kanıtlamak için FTIR analizleri yapılmıştır. FTIR analizlerine göre, kondisyonlama öncesi ve boyunca galen, pirit, kalkopirit ve sfalerit minerallerinin yüzeylerinde dixsantojen varlığından dolayı mineraller yüzmektedir. Fakat kondisyonlama sonrası minerallere ultrasonik enerji uygulandığında, galen yüzeyinde dixsantojen bulunurken, diğer minerallerin yüzeylerinde dixsantojen bağı olmadığı tespit edilmiştir. Kalkopirit, pirit ve sfalerit minerallerinin yüzeyine kondisyonlama sonrası ultrasonik enerji uygulandığında, yüzeydeki toplayıcı ile bağının kaybolduğu ve bundan dolayı yüzemez hale geldiği düşünülmektedir. Ultrasonik enerji uygulaması (kondisyonlama öncesi-boyunca-sonrası), galen yüzeyindeki dixsantojen varlığını etkilemediği için galen minerali yüzmeye devam etmektedir.

Sentetik mineral karışımlarıyla (galen/sfalerit, galen/pirit ve galen/kalkopirit) yapılan mikro-flotasyon test sonuçları sırasıyla şöyledir; Galen/sfalerit karışımlarına kondisyonlama öncesi 60 sn ultrasonik enerji uygulandığında galen verimi %83'ten %95'e artmıştır. Ultrasonik enerji kondisyonlama sonrası 60 sn uygulandığında ise galen verimi %74 ve sfalerit verimi % 16 olduğu tespit edilmiştir.

Galen/pirit karışımlarına kondisyonlama öncesi 60 sn ultrasonik enerji uygulandığında galen veriminin %83'ten %95'e yükseldiği görülmektedir. Ultrasonik enerji kondisyonlamadan sonra 60 sn uygulandığında galen verimi % 74'e, pirit verimi ise %16'ya kadar azaldığı görülmektedir.

Galen/kalkopirit karışımlarına kondisyonlama öncesi 60 sn ultrasonik enerji uygulandığında galenin verimi %83'ten %96'e, kalkopirit veriminin ise %84'ten %90'a yükseldiği görülmektedir. Ultrasonik enerji kondisyonlama sonrası 60 sn uygulandığında galen verimi % 74'e, kalkopirit verimi ise %35'e kadar azaldığı görülmektedir. Yapılmış olan testler sonucunda minerallerin birbirinden etkilenmediği ve selektif şekilde ayrılabilirdiği tespit edilmiştir.

Tüvenan cevherlere yapılan konvensiyonel flotasyon ve ultrasonik enerji destekli yapılan flotasyon test sonuçları değerlendirildiğinde şu şekildedir; Giresun-Şebinkarahisar kurşun-çinko cevherine konvensiyonel flotasyon uygulandığı test sonuçlarına göre en yüksek tenör ve verim -106 μ m tane boyutunda elde edilmiştir. Bu tane boyutunda galen %55,61 Pb tenörü ve %80,55 verim, sfalerit %38,37 Zn tenörü ve %78,46 verim ve kalkopirit %24,91 Cu tenörü ve %82,31 verim değerinde ürünler elde edilmiştir. Ultrasonik enerji destekli test düzeneğinde yapılan deney sonuçlarında ise en yüksek tenör ve verim -38 μ m tane boyutunda elde edilmiştir. Bu tane boyutunda galen %62,03 Pb tenörü ve %91,27 verimine, sfalerit %48,17 Zn tenörü ve %87,57 verime ve kalkopirit %30,07 Cu tenörü ve %90,13 Cu verimde konsantre olarak kazanılmıştır.

Balıkesir-Balya kurşun-çinko cevherine konvensiyonel flotasyon uygulandığında test sonuçlarına göre en yüksek tenör ve verim -75 μ m tane boyutunda alınmıştır. Bu tane boyutunda galen %61,12 Pb tenör ve %81,85 Pb verimin de, sfalerit %42,13 Zn tenörü ve %76,95 Zn verim de konsantreler kazanılmıştır. Ultrasonik enerji destekli flotasyon uygulandığında yine en yüksek tenör ve verime -38 μ m tane boyutunda

ulaşılmıştır. Bu tane boyutunda galen %63,75 Pb tenörü ve %87,06 Pb veriminde, sfalerit %45,03 Zn tenörü ve %66,59 Zn verimde konsantreler kazanılmıştır. Ultrasonik enerji uygulanan Balıkesir-balya kurşun-çinko cevheriyle yapılan flotasyon testlerinde konvensiyonel yöntemle göre tüm sülfürlü minerallerin tenör-verim değerinde yükselme meydana geldiği tespit edilmiştir.

Kütahya-Çatak yöresine ait iki ay bekleyen manyetit konsantresine, 106 µm tane boyutunda pirotinli cevherden elde edilen manyetit konsantresi konvensiyonel flotasyona yapıldığında %66,51 Fe - %94,30 verim elde edilmiştir. Bu konsantrenin %3,36 S olan kükürt içeriği konvensiyonel flotasyon uygulandığında %2 S ye düştüğü tespit edilmiştir. Aynı cevhere ultrasonik destekli flotasyon yapıldığında %68 Fe - %96,66 verim elde edilmiştir. Pirotinli cevherden elde edilen manyetit konsantresinin flotasyona tabi tutulması sonucunda %3,36 S olan kükürt içeriğinin % 0,45 S'e düştüğü tespit edilmiştir.

Flotasyon işlemlerinde ultrasonik enerji, daha az reaktif kullanımı, daha az enerji tüketimi, daha kaliteli ürün eldesi, daha yüksek verim, modellemeye uygunluğu ve çevre dostu olması nedeniyle cazip hale gelmektedir. Ultrasonik enerji kullanımı ile sülfürlü cevherlerin flotasyonunda verim ve selektiviteyi artırıcı bu yöntem laboratuvar ölçekli geliştirilmiştir ve yöntemin endüstriyel boyutta uygulanabilirliği teknik açıdan değerlendirilmiştir. Araştırmanın çıktıları teknik ve ekonomik açıdan olumlu olduğu takdirde, ülkemizde son yıllarda hızla gelişen metal madenciliğine önemli bir katkı sağlanabilecektir. Ayrıca, ileride bu alanda yapılacak bilimsel ve teknolojik çalışmalara da ışık tutacaktır.

Ultrasonik destekli flotasyon tesis bazında özellikle temizleme-süpürme aşamasında kurularak sülfürlü cevherlerden daha yüksek selektivite ve verimde ürünler elde edilebilir. Tüm bu çalışmalar 20 kHz'lik ultrasonik probalar kullanılarak yapılmıştır. Farklı frekanslarda ultrasonik probalar kullanılarak selektivite ve verim değerleri daha da yükseltilebilir. Ultrasonik destekli flotasyon sadece sülfürlü cevherler için değil diğer cevherler içinde kullanılarak araştırmalar ekonomik açıdan değerlendirilebilir. Ultrasonik destekli flotasyon sadece flotasyon için değil gravite ve liç gibi zenginleştirme yöntemleri öncesinde kullanılarak araştırmalar yapılabilir. Ultrasonik destekli flotasyon şlam uzaklaştırmada kullanılabilirliği araştırılmalıdır.

Pilot çapta ultrason destekli çalışmalar yapılarak endüstriyel uygulamaların önu açılacaktır.Test düzeneği daha da geliştirilerek tesis bazında araştırmalar ekonomik yöndende incelenmelidir.



KAYNAKLAR

- Aldrich, C. ve Feng, D. (1999). Effect of Ultrasonic preconditioning of pulp on the flotation of sulphide ores, technical note. *Minerals Engineering*, 12(6), 701-707
- Abramov, A. A., VE Avdohin, V. M. (1997). Oxidation of sulfide minerals in beneficiation processes. *Gordon and Breach Science Publishers*, 35(645), 507-517
- Alp, İ., Deveci, H. ve Özdağ, H. (2004). Processing tincal ores using ultrasonic waves. *II.Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir, Türkiye, 59-64
- Altun N. E., Hwang J.Y. ve Hıcıymaz C. (2006) Enhancement of flotation performance of oil shale cleaning by ultrasonic treatment. *Mineral Processing*, 91(2009), 1-13
- Ambedkar, B. (2012) *Ultrasonic coal-wash for de-ashing and de-sulfurization, experimental investigation and mechanistic modeling*, (Two printing), New york, Springer thesis
- Ambedkar, B., Nagarajan, R. ve Jayanti, S., 2011, Investigation of high-frequency, high-intensity ultrasonics for size reduction and washing of coal in aqueous medium. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 50(23), 13210-13219
- Atak S, (1990). *Flotasyon ilkeleri ve uygulaması (Birinci baskı)*, İstanbul: İTÜ Vakfı
- Atak, S. (2017). *Flotasyon İlkeleri ve Uygulaması (İkinci baskı)*, İstanbul: İTÜ Vakfı
- Avvaru, B., Roy, S. B., Ladola, Y., Chowdhury, S., Hareendran, K. N. ve Pandit, A. B. (2008). Sono-chemical leaching of uranium. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(12), 2107-2113

- Baig, R. B. ve Varma, R. S., (2012). Alternative energy input: Mechanochemical, microwave and ultrasound-assisted organic synthesis. *Chemical Society Reviews*, 41(4), 1559-1584
- Bayraktar İ., ve Altun, Y. (1996). Kompleks Bakır-Çinko-Kurun Cevherlerinin Özellikleri, Ekonomik Değeri ve Zenginleştirilmesi. *Madencilik Dergisi*, 35(1), 11-21
- Bentley, J.P . (1983). *Principles of Measurement Systems*, (Two printing), New york. Longman Group Limited
- Bese, A. V. (2007). Effect of ultrasound on the dissolution of copper from copper converter slag by acid leaching. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(6), 790-796
- Boulton B., Fornasiero D.ve Ralsto J. (2005). Effect of iron content in sphalerite on flotation. *Minerals Engineering*, (18), 1120–1122
- Breitbach, M., Bathen, D. ve Henner, S. (2003). Effect of ultrasound on adsorption and desorption processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42, 5635-5646
- Büyüksırt T. ve Kuleasan H., (2014) Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi ve gıda analizlerinde kullanımı. *Gıda*, 39(4), 235-241
- Cao Q., Cheng j., Feng Q., Wen S. ve Luo B. (2017). Surface cleaning and oxidative effects of ultrasonication on the flotation of oxidized pyrite. *Powder Thecnology*, 311, 390-397
- Carlin, B., (1960). *Ultrasonics*, (Two printing). New York, McGraw-Hill Book Company Inc.
- Cases, J.M. (1980) *Finely Disseminated Kompleks Sulphide Ores, Complex Sulphide Ores*, (one printing), London, M.J. Jones (ed.)

- Chen Y., Truong, V.N.T., Bua X., ve Xiea, G., (2020). A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60, 104739
- Chena Y., Truong V.N.T., Bu X.ve Xie G. (2020). A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. *Ultrasonics - Sonochemistry*, (60) 104739. *China University of Mining and Technology*, 18(1), 98-102
- Çilek, E. C. (2006). *Mineral flotasyonu* (Birinci baskı). Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
- Çelik, M. S. (1988). Effect of ultrasonic treatment on the floatability of coal and galena. *Sep. Sci. Technology*, (24), 1159-1166
- Çelik, M. S., Hancer, M. ve Miller, J. D. (2002) Flotation chemistry of boron minerals. *Journal of Colloid and Interface Science*, 256 (1), 121-131
- Çilek, E. C. ve Özgen, S. (2009). Effect of ultrasound on separation selectivity and efficiency of flotation. *Minerals Engineering*, 22(14), 1209-1217
- Çilingir, Y. (1996). *Metalik cevherler ve zenginleştirme yöntemleri* (Cilt- 1). İzmir: D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Baskı Ünitesi
- Donskoi, E., Collings, A. F., Poliakov, A. ve Bruckard, W. J. (2012). Utilisation of ultrasonic application for upgrading of hematitic/goethitic iron ore fine. *International Journal of Mineral Processing*, (114-117), 80-92
- Dundar, Y., ve Aslan, R. (2005). Effects of lead as a life surrounding heavy metal. *The Journal of Medical Kocatepe*, 6(2), 1-5
- Devlet PlanlamaTeşkilatı (DPT), (2001). 8. *Beş Yıllık Kalkınma Planı. madencilik özel ihtisas komisyonu raporu*, Ankara: Devlet PlanlamaTeşkilatı

- Drzymala J. (1999). Charakterization of materials by Hallimond tube flotation. part 1; Maximum Size of entrained particles. *International journal of Mineral processing*, (42), 139-152
- Du, F., Li, J., Li, X. ve Zhang, Z. (2011). Improvement of iron removal from silica sand using ultrasound-assisted oxalic acid. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18 (1), 389-393
- Ensminger, D. ve Bond, L. J., (2012). *Ultrasonics fundamentals technologies and applications*. (Tree printing). London: CRC Press
- Fang S., Xua L. , Wub H., Xua Y., Wanga Z., ShuaK., Huc Y. (2020). Influence of surface dissolution on sodiumoleate adsorption on ilmenite and its gangue minerals by Ultrasonic treatment. *Applied Surface Science*, 500, 144038
- Farmer A. D., Colling A. F., Jameson, G. J., (2000). Effect of ultrasound on surface cleaning of silica particles. *International journal Mineral Processing*, (60), 101-113
- Feng D. ve Aldrich C. (2004). Effect of ultrasonication on the flotation of talc. *American Chemical Society*, (43), 4422-4427
- Fuchs, F. J. (2002). *Ultrasonic cleaning: fundamental theory and application. Fundamentals*. (one printing) London, CRC Press
- Fuerstenau, M. C., ve Miller, J. D. (1967). *The role of the hydrocarbon chain in anionic flotation of calcite*. .(one printing) New york, Trans. AIME
- Fuerstenau, M.C., Miller, J.D., Kuhn, M.C., (1985). *Chemistry of Flotation*, (one printing), Newyork, AIME/SME
- Gaudin, A. M. (1957). *Flotation* (five printing), New York, Mc Grow Hill Book Co. Inc.

- Ghadyani, A., Noaparast, M. ve Tonkabon, S. Z. S., (2017). A Study on the effects of ultrasonic irradiation as preapplication method on high-ash coal flotation and kinetics. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 8 (7), 374-391
- Gnanasambandam R. ve Proctor A. (2000). Determination of pectin degree of esterification by diffuse reflectance. Fourier transform infrared spectroscopy, *Food chemistry*, 68, 327-332
- Gong J., Peng Y., Bouajila A., Ourriban M., Yeung A. ve Liu Q. (2010). Reducing quartz gangue entrainment in sulphide ore flotation by high molecular weight polyethylene oxide. *International Journal of Mineral Processing*, (97), 44-51
- Güngören C. (2016). *Mineral flotasyonunda ultrasonik enerjinin tane-kabarcık etkileşimine etksi*, Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul
- Güngören C., Baktarhan Y., Demir İ., Özkan S. G., (2020). Enhancement of galena–potassium ethyl xanthate flotation system by low power ultrasound. *Trans. Nonferrous Met. Soc.*,(301), 102-111
- Güngören, C., Özdemir, O., Özkan, S.G., (2017). Effects of temperature during ultrasonic conditioning in quartz amine flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 53(2), 687-698
- Güngören, C., Özdemir, O., Wang, X., Özkan, S. G. ve Miller, J. D. (2019). Effect of ultrasound on bubble-particle interaction in quartz-amine flotation system. *Ultrasonics Sonochemistry*, (52), 44-454
- Gürpınar, G. (2007). *Ses ötesi dalgaların cevher zenginleştirmede kullanılabilirliğinin araştırılması*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir
- Guy, P. J. ve Trahar, W. J. (1985). The effects of oxidation and mineral interaction on sulphide flotation. *Sep. Sci. Technology*, (29), 159-166

- Healy, T. W., ve Moignard, M. S. (1976). *Review of Electrokinetic Studies of Metal Sulphides. Flotation (five printing), New York, A. M. Gaudin Memorial*
- Horasan Ü., Tanrıverdi M., Çiçek T. ve Polat M. (2020). Investigating the effects of ultrasonic energy on the flotation behavior of pyrite and galena minerals. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 56(3), 538-547
- Hosseini S. H.ve Forssberg E. 2007. Physicochemical studies of smithsonite flotation using mixed anionic/cationic collector. *Minerals Engineering*, 20, 621-624
- İpekoğlu Ü., (1997). *Susuzlandırma (katı-sıvı ayrımı) ve yöntemleri* (Birinci baskı). İzmir: DEÜ Basım Ünitesi
- Jia Y., Huang X., Huang K., Wang S., Cao Z. ve Zhong H., (2019), Flotation performance and adsorption mechanism of 3-(ethylamino)-N-phenyl thioxopropanamide onto galena/sphalerite surfaces. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, (77), 416-42
- Jiang F.,. Chena Y, Jua S., Zhub Q., Zhanga L, Penga J., Wangb X. ve Millerb J. D. (2018) Ultrasound-assisted leaching of cobalt and lithium from spent lithium-ion batteries. *Ultrasonics-Sonochemistry*, (48), 88-95
- Kang, W., Xun, H. ve Hu, J. (2008). Study of the effect of ultrasonic treatment on the surface composition and the flotation performance of high-sulfur coal. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1337-1344
- Kursun H. ve Ulusoy U. (2015). Zinc recovery from a Lead–Zinc–Copper ore by ultrasonically assisted column flotation. *Particulate Science and Technology*, (33) 349-356

- Kyllonen, H., Pirkonen, P., Hintikka, V., Parvinen, P., Gronroos, A. ve Sekki, H. (2004). Ultrasonically aided mineral processing technique for remediation of soil contaminated by heavy metals. *Ultrasonics Sonochemistry*, 11(3-4), 211-216
- Laskowski, J. S., Subramanian, S., ve Nyamekya, G. A. (1993). Polysaccharides emerging non-toxic modifiers for differential flotation of sulphides. *XVIII Int. Mineral Processing Congress*, 593-600
- Laskowski, J. S., Subramanian, S., & Nyamekye, G. A. (1993). Polysaccharides—emerging non-toxic modifiers for differential flotation of sulphides. In. *XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney, Australia* (pp. 593-600)
- Leja, J. (1982). *Surface Chemistry of Froth Flotation*. (one printing), Newyork, Plenum
- Levine I. (2003). *Physical chemistry* (Two printing) London, Nonferrous Met. Soc.
- Li Y., Chen J., Kang D. ve Guo J. (2012). Depression of pyrite in alkaline medium and its subsequent activation by copper. *Minerals Engineering*, (26) 64-69
- Lia H., Lia S., Penga J., Srinivasakannan C., Zhanga L. ve Yina S. (2018) Ultrasound augmented leaching of nickel sulfate in sulfuric acid and hydrogen peroxide media. *Ultrasonics-Sonochemistry*, (40), 1021-1030
- Liu, Q., & Laskowski, J. S. (1989). The role of metal hydroxides at mineral surfaces in dextrin adsorption, II. Chalcopyrite-galena separations in the presence of dextrin. *International Journal of Mineral Processing*, 27(1-2), 147-155
- Luque-García, J. L. ve Luque de Castro, M. D. (2003). Ultrasound: A powerful tool for leaching. *Trends in Analytical Chemistry*, 22 (1), 41-47

- Lv W., Che J., Min F., Hou B. and Liu C., (2020). Effect of ultrasonic pre-treatment on coal slime flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 56(1), 173-183
- Mao Y., Bu X., Peng Y., Tian F. ve Xie G. (2020). Effects of simultaneous ultrasonic treatment on the separation selectivity and flotation kinetics of high-ash lignite. *Fuel*, (259), 116270
- Mason, T. J. (2000). Large scale sonochemical processing aspiration and actuality, ultrasonics sonochemistry. *Ultrasonics Sonochemistry*, (7), 145-149.
- Mason, T. J. (2002). Uses of power ultrasound in chemistry and processing. *Applied Sonochemistry*
- Mason, T. J. (2003). Sonochemistry and sonoprocessing: The link, the trends and (probably) the future, *Ultrasonics Sonochemistry*.10(4-5), 175-179
- Mason, T. J., Collings, A. ve Sumel, A. (2004). Sonic and ultrasonic removal of chemical contaminants from soil in the laboratory and on a large scale. *Ultrasonics Sonochemistry*, 11(3-4), 205-210
- Moslemia H. ve Gharabagh M. (2017). A review on electrochemical behavior of pyrite in the froth flotation process. *Journal of Industrial and Engineering*, (47), 1-18
- Maden Teknik Arama Müdürlüğü (MTA), (2016). Türkiye ve dünyada bakır, Ankara: Maden Teknik Arama Müdürlüğü
- Maden Teknik Arama Müdürlüğü (MTA), (2017). Dünyada ve Türkiyede demir, Ankara: Maden Teknik Arama Müdürlüğü
- Maden Teknik Arama Müdürlüğü (MTA), (2018). Dünyada ve Türkiye’de Titanyum, Ankara: Maden Teknik Arama Müdürlüğü

- Mu Y., Peng Y. ve Lauten R.A. (2016). The depression of pyrite in selective flotation by different reagent systems A Literature review. *Minerals Engineering*, 96-97, 143-145
- Natarajan R. ve Nirdosh I. (2006). New collectors for sphalerite flotation. *International Journal of Mineral Processing*, (79) 141-148
- Onur A. (2004). *Bazı cevher ve atıkların cevher hazırlama ve flotasyonunda Ultrasonik dalgaların kullanılabilirliğinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul
- Osasere, 2000; Osasere, O. F., (2000). Relation of contact angle data to Hallimond tube flotation of coal with coagulants and flocculants. *Fuel*, 79(2), 193-199
- Önal G. ve Ateşok G. (1994). *Cevher hazırlama el kitabı*, İstanbul: Yurt Madenciğini Geliştirme Vakfı
- Önal, G., Özer, M. ve Arslan, F. (2003). Sedimentation of clay in ultrasonic medium. *Minerals Engineering*, 16(2), 129-134
- Öncel, M. S., İnce, M. ve Bayramoglu, M. (2005). Leaching of silver from solid waste using ultrasound assisted thiourea method. *Ultrasonics Sonochemistry*, 12(3), 237-242
- Özkan S. G. (2012). Effects Of Simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes. *Fuel*, 93, 576- 580
- Özkan S. G. ve Kuyumcu H. Z. (2006). Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation. *International journal of Mineral processing*. (81), 201-203
- Özkan Ş. G. (2018). A review of simultaneous ultrasound-assisted coal flotation. *Journal of Mining Environment*, (9) 679-689

- Özkan, S. G. (1998). Ultrasonik İşlemlerin flotasyon üzerindeki etkileri, İstanbul Univ. Müh. Fak. *Yerbilimleri Dergisi*, 11(1), 131-135
- Özkan, S. G. ve Kuyumcu, H.Z. (2006). Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 81(3), 201-203
- Özkan, Ş. G. (2002). Beneficiation of magnesite slimes with ultrasonic treatment. *Minerals Engineering*, (15), 99-101
- Özün, S., Hassasa B.V., Miller J. D. (2019). Collectorless flotation of oxidized pyrite, *Colloids and Surfaces*, (561), 349–356.
- Perinçek S.D. (2006). *Ozon Ultrason teknolojileri ve kombinasyonlarının ön terbiye işlemlerinde uygulanabilirliğinin araştırılması*, Yüksek Lisans tezi, Ege Üniversitesi, İzmir
- Persson, I., Persson, P., Valli, M., Fözö, S., and Malmensten, B. (1991). Reactions on sulfide mineral surfaces in connection with xanthate flotation studied by diffuse reflectance FTIR spectroscopy, atomic absorption spectrophotometry and calorimetry. *International journal of mineral processing*, 33(1-4), 67-81
- Polat, M., Polat, H. ve Chander, S., 2003, Physical and chemical interactions in coal flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 72(1-4), 199-213
- Qi, B. C. ve Aldrich, C. (2002). Effect of ultrasonic treatment on zinc removal from hydroxide precipitates by dissolved air flotation. *Minerals Engineering*, (15), 1105-1111.
- Raman, V. ve Abbas, A. (2008). Experimental investigations on ultrasound mediated particle breakage. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(1), 55-64.

- Riera-Franco de Sarabia, E., Gallego-Juarez, J. A., Rodriguez-Corral, G., Elvira-Segura, L. ve Gonzalez-Gomez, I., (2000). Application of high-power ultrasound to enhance fluid solid particle separation processes. *Ultrasonics* 38(38), 642-646.
- Sahinoğlu E. ve Uslu E. (2013). Increasing coal quality by oil agglomeration after ultrasonic treatment. *Fuel Processing Technology*, (116), 332-338
- Saterlay, A. J., Hong, Q., Compton, R. G. ve Clarkson, J., 2000, Ultrasonically enhanced leaching removal and destruction of cyanide and other ions from used carbon cathodes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 7, 1-6.
- Sayan, E. ve Bayramoğlu, M., (2004). Statistical modeling and optimization of ultrasound-assisted sulfuric acid leaching of TiO_2 from red mud. *Hydrometallurgy*, 71(34), 397-401.
- Shua K., Xu L., Wua H., Fang S., Wang Z., Xu Y. ve Zhang Z. (2019). Effects of ultrasonic pre-treatment on the flotation of ilmenite and collector adsorption. *Minerals Engineering*, (137), 124-132
- Smart, S. St. C., 1991, Surface layers in base metal sulfide flotation. *Mineral Engineering*, 4(7-11), 891-909
- Singh, B. P. (1999). Ultrasonically assisted rapid solid-liquid separation of fine clean coal particles. *Minerals Engineering*, 12(4), 437-443.
- Sönmez, E., Koca, S., Özdağ, H. ve İpek, H. (2004). Beneficiation of colemanite concentrates from fine wastes by using ultrasound waves. *Minerals Engineering*, 17(2), 359-361
- Suslick, K. S. (1989). The chemical effects of ultrasound. *Scientific American*, (260) 80-86

- Swamy, K. M., Narayana, K. L. ve Misra, V. N. (2005). Bioleaching with ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 12(4), 301-306.
- Vasanthakumar A., Ravishankar H. ve Subramanian S., (2017). Selective bio-flotation of sphalerite from galena using mineral - adapted strains of *Bacillus subtilis*. *Minerals Engineering*, (110), 179-184
- Videla A.R., Morales R., Saint-Jean T., Gaete L., Vargas Y.ve Miller J.D. (2016). Ultrasound treatment on tailings to enhance copper flotation recovery. *Minerals Engineering*, (99), 89–95.
- Wang, X., Srinivasakannan, C., Xin-hui, D., Jin-hui, P., Da-jin, Y. ve shao-hua, J. (2013). Leaching kinetics of zinc residues augmented with ultrasound. *Separation and Purification Technology*, 115, 66-72.
- Wanga G., Joshib J.B., Sathec M., Jamesonc G. J., Zhou S. ve Evans G.M. (2015). Bubble detachment from a steel ball in turbulent field: Application to mineral flotation systems. *Procedia Engineering* (102) 1046-1055.
- Warren, L. J. (1984). *Ultrafine particles in flotation (one printing)*, Colorado, society for mining
- Wen-ze K., Hai-xin X., Xiao-hong K. ve Ming-ming L. (2009). Effects from changes in pulp nature after ultrasonic conditioning on high-sulfur coal flotation. *Mining Science And Technology*, (19), 498-502
- Wills, B.A. (1989). *Mineral Processing Technology* (press five)., Oxford: Pergamon Pres.
- Wood, J. T. and Jones, M. H. (1984). Principles of mineral flotation.
- Wu H., Frang S., S hu K. XU Y. W rang Z. Yang J. ve Xu L. (2020) Selective flotation and adsorption of ilmenite from titanaugite by a novelmetod : Ultrasonic treatment. *Powder Thecnology*, (363), 378-47

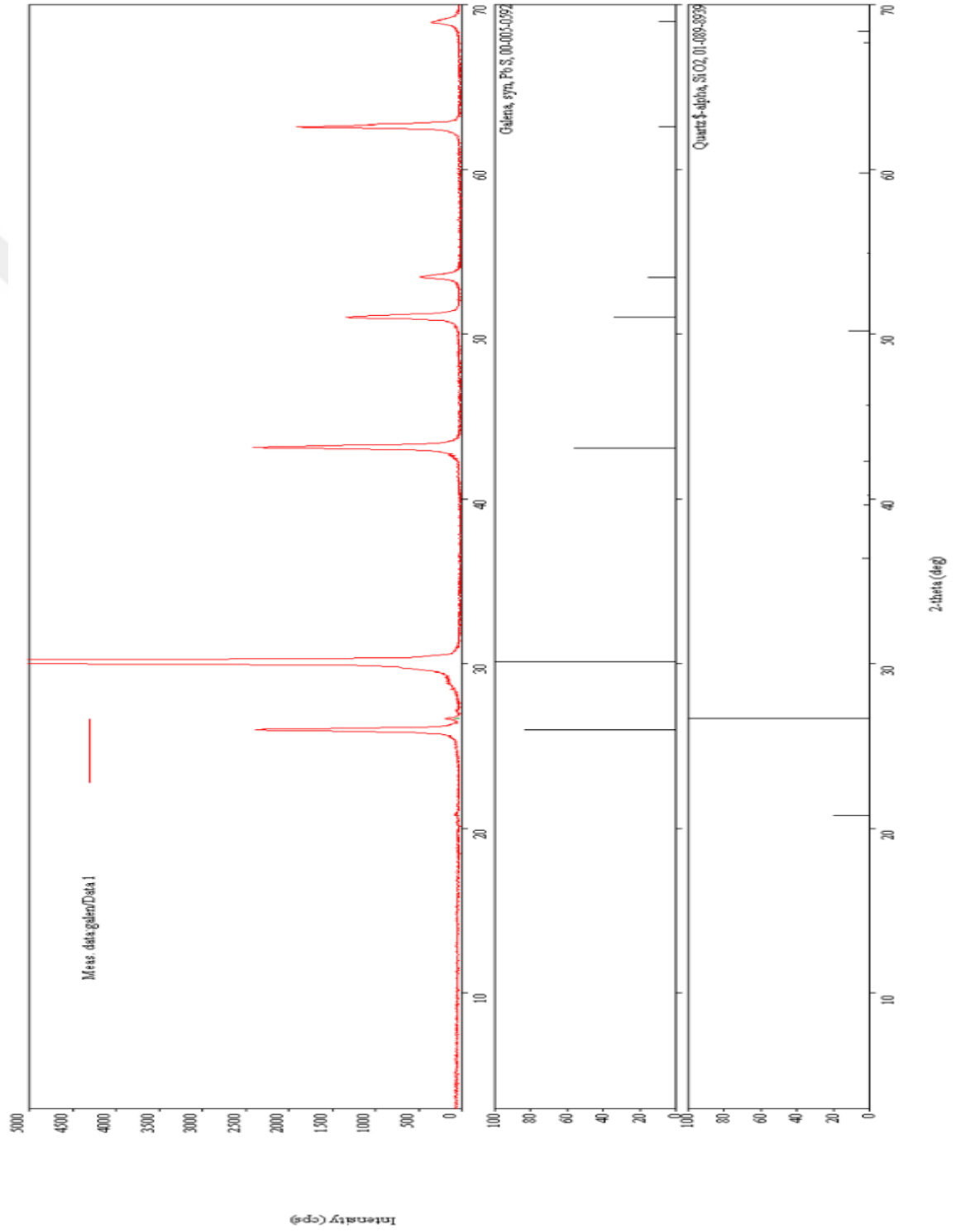
- Xia W., Ma G., Bu X. ve Peng Y. (2018). Effect of particle shape on bubble-particle attachment angle and flotation behavior of glass beads and fragments. *Powder Technology*, (338) 168-172.
- Xie, F., Li, H., Ma, Y., Li, C., Cai, T., Huang, Z. ve Yuan, G. (2009). The ultrasonically assisted metals recovery treatment of printed circuit board waste sludge by leaching separation. *Journal of Hazardous Materials*, 170(1), 430-435.
- Xue, J., Lu, X., Du, Y., Mao, W., Wang, Y. ve Li, J. (2010). Ultrasonic-assisted oxidation leaching of nickel sulfide concentrate, *Chinese Journal of Chemical Engineering*,. 18(6), 948-953.
- Yıldız, N. (2007). *Cevher hazırlama* (Birinci baskı). Ankara: Ertem basım yayın dağıtım sanayi ve Ld.Şti.
- Yıldız, N. (2014). *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme* (İkinci baskı). Ankara: Ertem basım yayın dağıtım sanayi ve Ld.Şti.
- Zhang, H.-X., Bai, H.-J., Dong, X.-S. ve Wang, Z.-Z. (2012). Enhanced desulfurizing flotation of different size fractions of high sulfur coal using sonoelectrochemical method. *Fuel Processing Technology*, 97, 9-14.
- Zhang, J., Wu, A.-x., Wang, Y.-m. ve Chen, X.-s., 2008, Experimental research in leaching of copper-bearing tailings enhanced by Ultrasonic treatment. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(1) 98-102
- Zhao H.L., Wang D.X., Y.X. Cai ve. Zhang F.C. (2015). Removal of iron from silica sand by surface cleaning using power ultrasound. *Minerals Engineering*, 20(2007) 816–818

- Zhao, H. L., Wang, D.X., Cai, Y.X. ve Zhang, F.C., (2007). Removal of iron from silica sand by surface cleaning using power ultrasound. *Minerals Engineering*, 20(8), 816-818.
- Zhou Z.A., Xu Z., Finch J.A., Masliyah J.H.ve Chow R.S. (2009). On the role of cavitation in particle collection in flotation – A critical review. *Minerals Engineering*, (22), 419-433

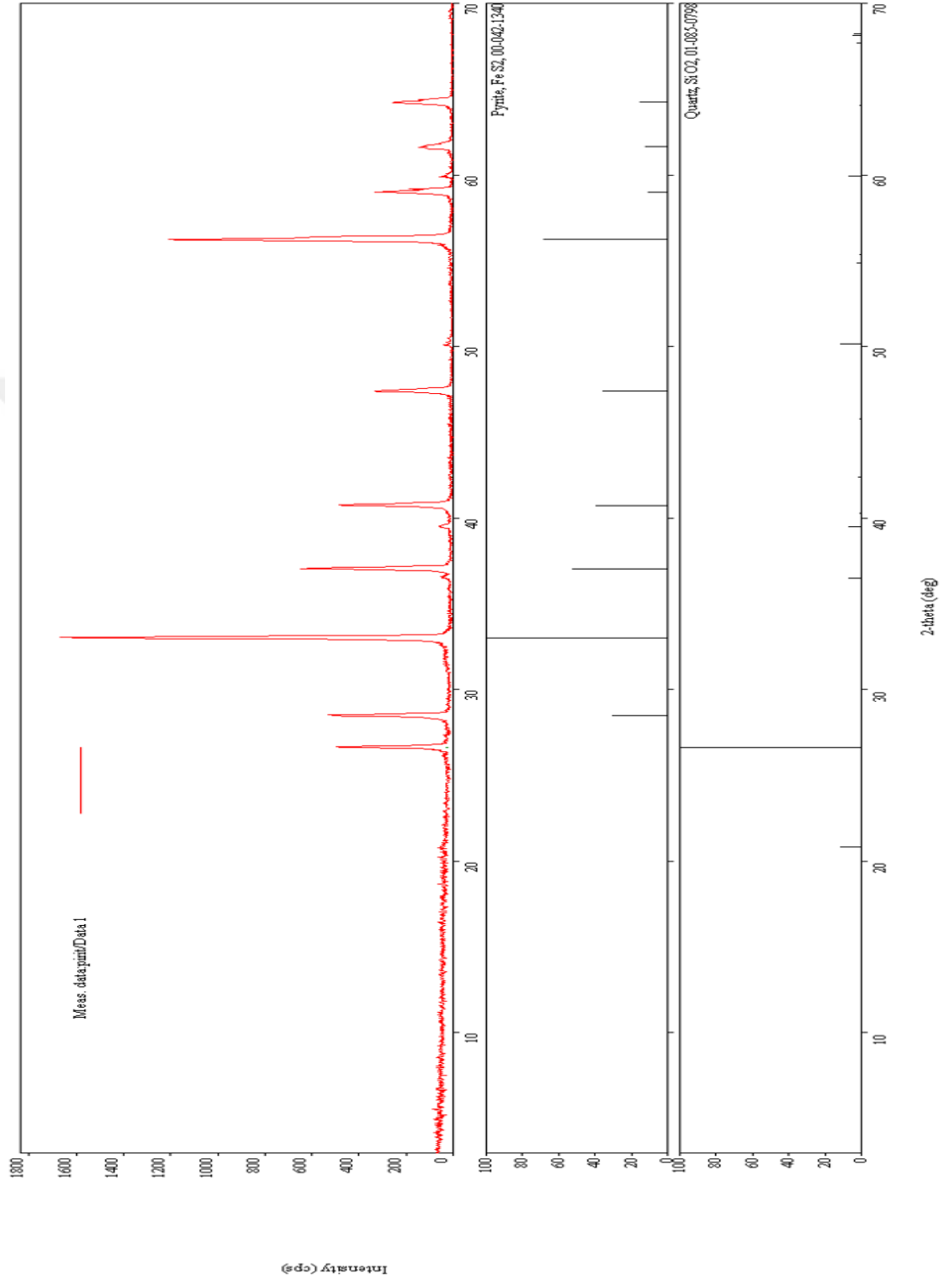


EKLER

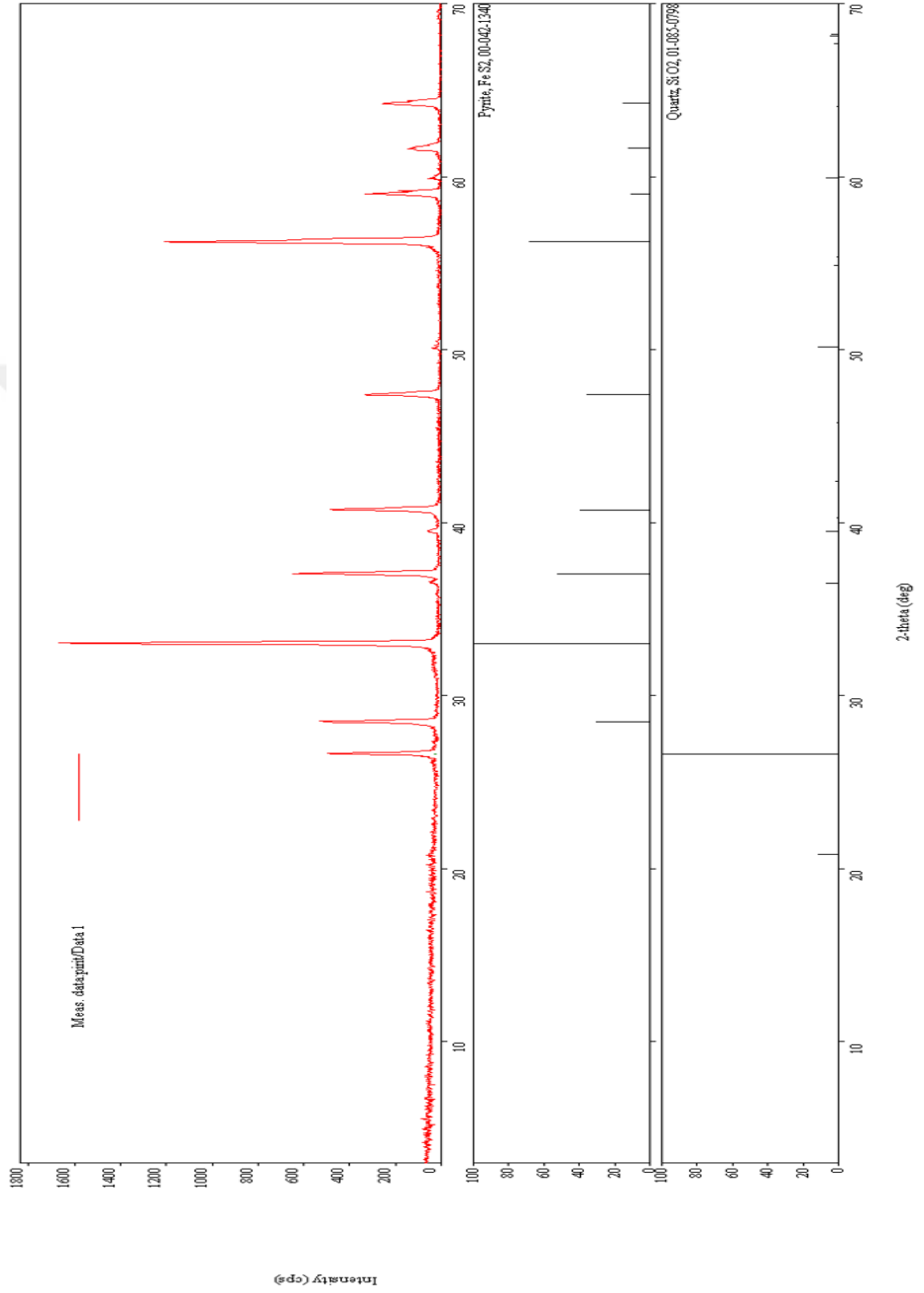
Ek-1 Saf galen XRD analiz sonucu



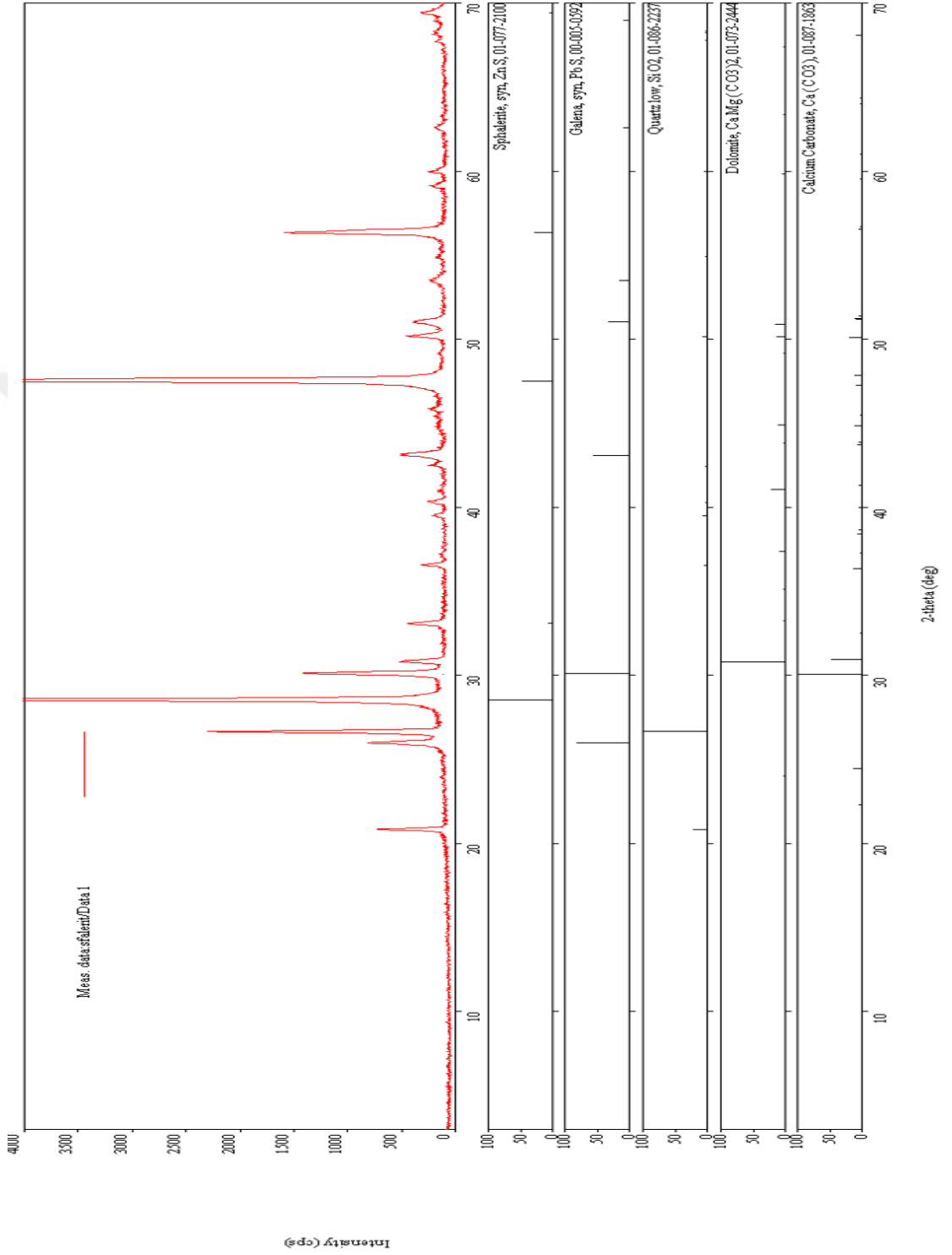
EK-2 Saf pirit XRD analiz sonucu



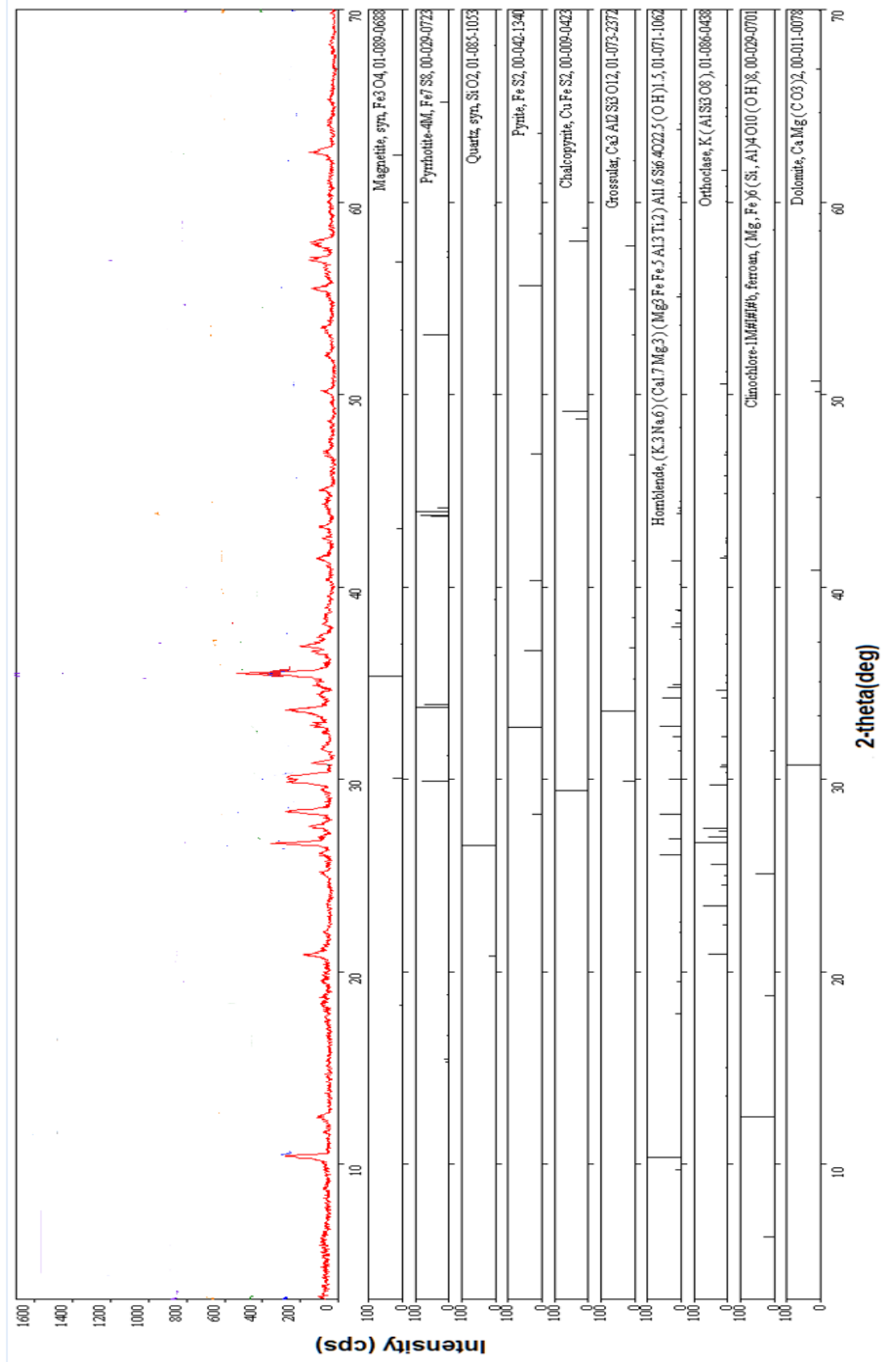
EK-3 Saf kalkopirit XRD analiz sonucu



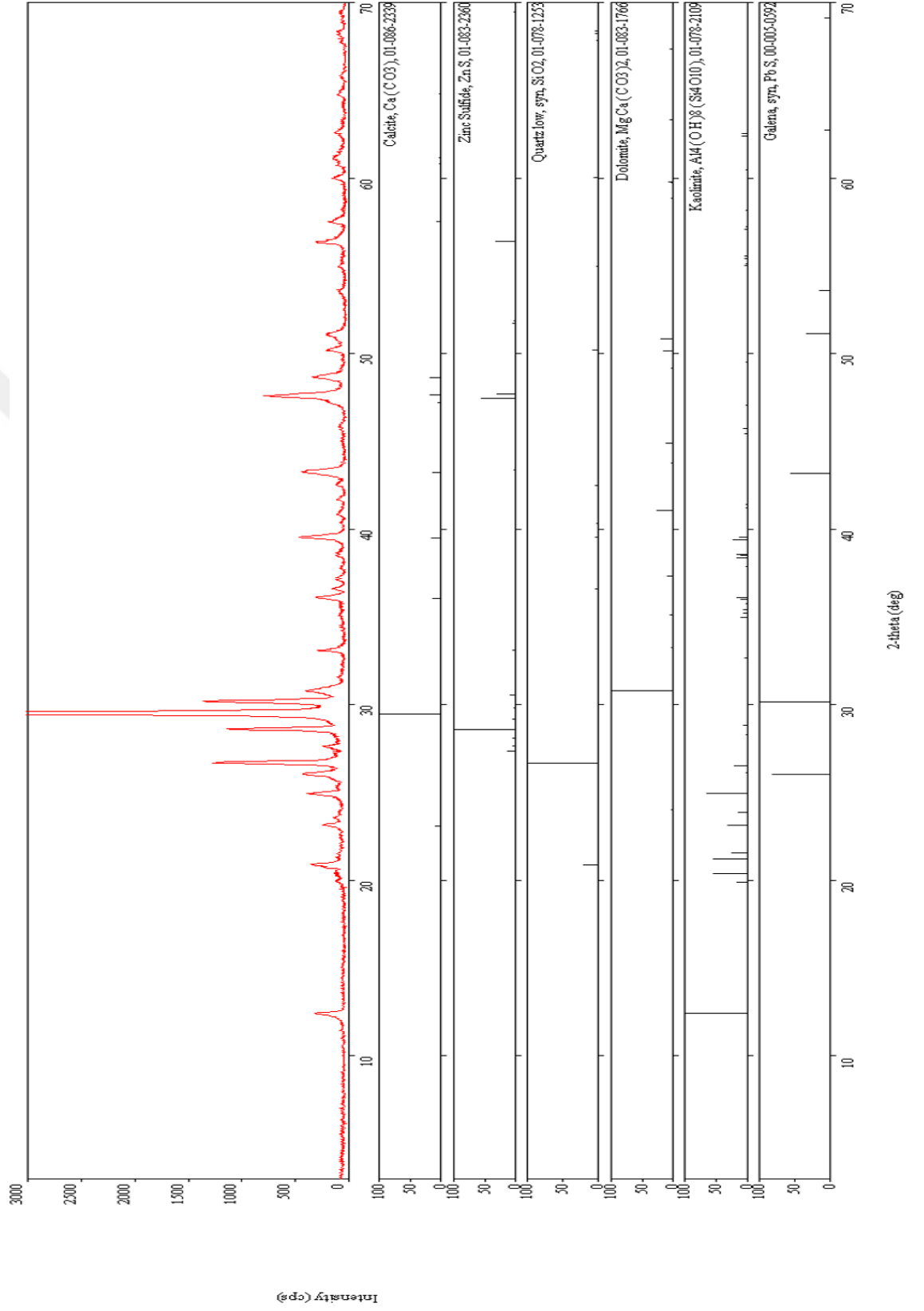
Ek-4 Saf sfalerit XRD sonuçları



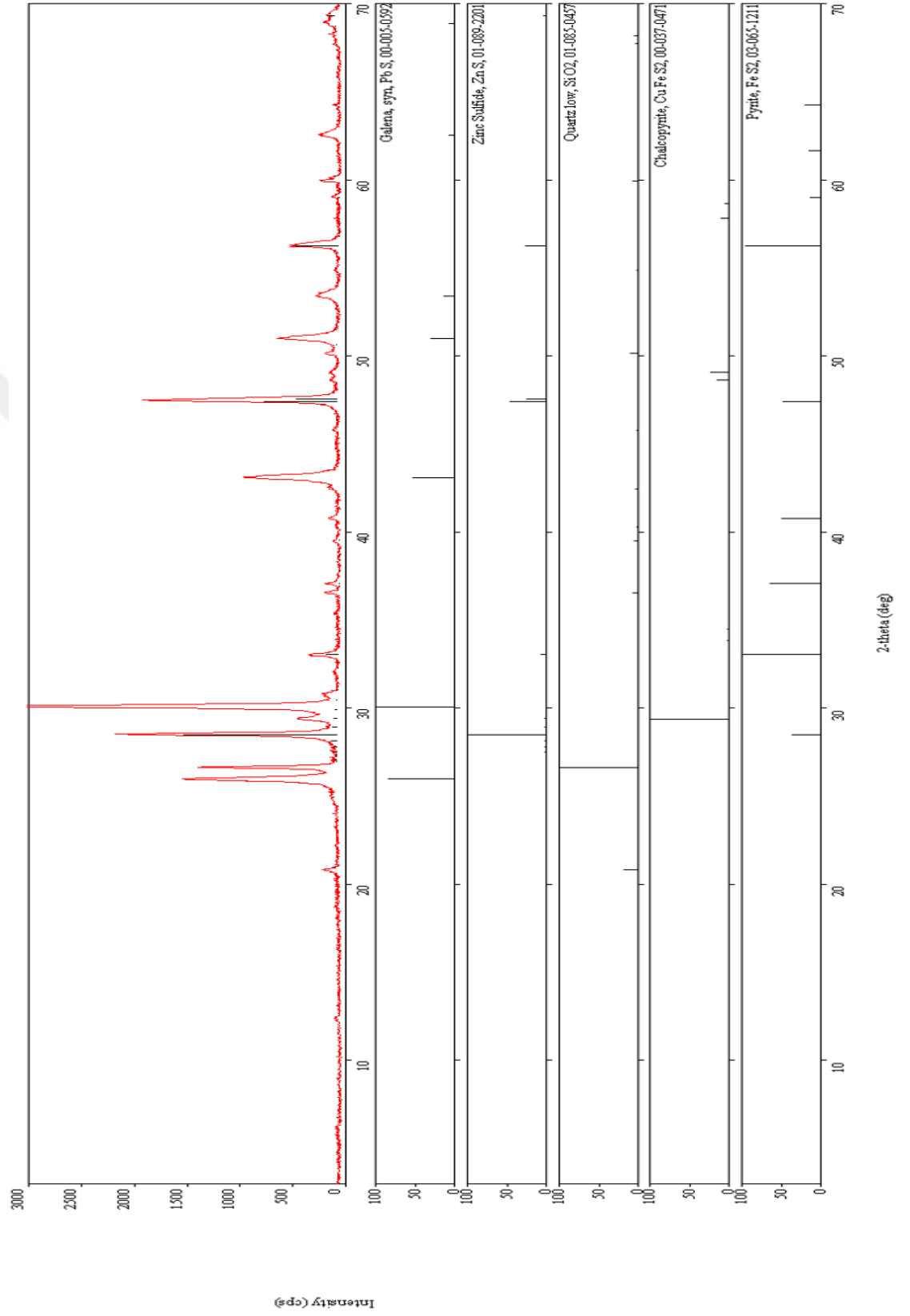
EK-5 Kütahya-Çatak XRD sonuçları



EK-6 Balıkesir-Balya XRD sonuçları



Ek-7 Giresun-Şebinkarahisar XRD sonuçları



Ek-8 Simgeler listesi

Simgeler	Açıklama
%	: Yüzde
°C	: Santigrad derece
µm	: Mikrometre (Mikron)
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
atm	: Atmosfer
dev/dk	: Devir/dakika
dk	: Dakika
g	: Gram
Hz	: Hertz
kHz	: Kilohertz
MHz	: Megahertz
W	: Watt
A	: Kesit alanı
Q	: Debi
d _s	: Sıvının yoğunluğu
d _k	: Katının yoğunluğu
L	: Litre
ml	: Mililitre
sa	: Saat
sn	: Sn
t	: Ton
q	: Yoğunluk
η	: Sıvının vizkositesi
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
L/dk	: L/dk
kW	: Kilowatt
kWh	: Kilowatt saat
\$	: Dolar
Vt	: Tane hızı

Ek-9 Kısaltmalar listesi

Kısaltmalar	Açıklama
KAX	: Potasyum Amil Kxsantat
KEX	: Potasyum etil ksantat
d₁₀₀	: Malzemenin %100' ünün altında olduğu tane boyutu
NDT	: Tahribatsız muayene
XRD	: X ışını kırınımı
FTIR	: Fourier Transform Infrared spektroskopisi
US	: Ultrasonik enerji
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
DPT	: Devlet planlama teşkilatı
MTA	: Maden teknik arama

Ek-10 Öz geçmiş

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Ümit HORASAN
------------	--------------

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Doktora	Dokuz Eylül Üniversitesi	2021

Makaleler / Bildiriler

Çiçek T., Horasan U., Şen S., Boztaş E. (2015). *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 53(1), 2017, 569–577

Horasan Ü., Tanrıverdi M., Çiçek T. ve Polat M. (2020). Investigating the effects of Ultrasonic energy on the flotation behavior of pyrite and galena minerals. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 56(3), 538-547

Horasan Ü., Tanrıverdi M., Çiçek T. (2019). 4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences, Samsun, Turkey, Nov 22,

Horasan Ü., Çınar M. (2018) Removing Sulphur From Seyitomer Coal With Low Temperature Coking And Magnetic Separation, 16th Internatioanly mineral processing symposium, Antalya, Türkiye, Ekim 20-23

Tanrıverdi M., Çiçek T. Horasan Ü., Bursa C. Beneficiation of a low grade chrome ore. 16th Internatioanly mineral processing symposium, Antalya, Türkiye, Ekim 20-23

Horasan Ü., Çınar M. (2018). Removing Sulphur From Soma Coal With Low Temperature Coking And Magnetic Separation, 4th International Conference on Engineering and Natural Science, Kiev, Ukrayna, Mayıs 5-8

Horasan Ü., Çınar M. (2018). Düşük Sıcaklık Koklaştırması ve manyetik Ayırma ile Tekirdağ Kömüründen Kükürdün Uzaklaştırılması, Zonguldak, Türkiye, Nisan 11-13

