



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**METALİK CEVHERLERİN ÇÖZÜNME KİNETİĞİ MODELLERİ ÜZERİNE
TANE MORFOLOJİSİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Tuğba Deniz TOMBAL

**DANIŞMAN
Prof. Dr. İlgin KURŞUN ÜNVER**

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

Kasım, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Tuğba Deniz TOMBAL tarafından, **Prof. Dr. İlgin KURŞUN ÜNVER** danışmanlığında hazırlanan "**Metalik Cevherlerin Çözünme Kinetiği Modelleri Üzerine Tane Morfolojisinin Etkisinin Araştırılması**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **11/11/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. İlgin KURŞUN ÜNVER	☒
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa	Kabul
	Maden Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Orhan ÖZDEMİR	☒
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa	Kabul
	Maden Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Birgül BENLİ	☒
	İstanbul Teknik Üniversitesi	Kabul
	Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Can GÜNGÖREN	☒
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa	Kabul
	Maden Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Onur GÜVEN	☒
	Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi	Kabul
	Maden Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Tuğba Deniz TOMBAL

(İmza)



Efe ve Atlas Umut’a ithaf ediyorum.

BÜTÇE DESTEKLERİ

METALİK CEVHERLERİN ÇÖZÜNME KİNETİĞİ MODELLERİ ÜZERİNE TANE MORFOLOJİSİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.



TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim boyunca her türlü yardımı ve desteği benden esirgemeyen, bu güzide kurumda lisansüstü eğitim almama fırsat veren çok değerli danışman hocam, İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölüm Başkanı, Cevher Hazırlama Anabilim Dalı Başkanı sayın Prof. Dr. İlgin KURŞUN ÜNVER'e en içten dileklerimle teşekkür ederim. Çalışmalarım esnasında göstermiş oldukları özveri ve yardımlarından dolayı sayın Prof. Dr. Orhan ÖZDEMİR'e ve İstanbul Teknik Üniversitesi Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi sayın Doç. Dr. Birgül BENLİ'ye teşekkürü borç bilirim. Manevi desteklerinden ötürü Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Maden İşletme Anabilim Dalı Başkanı sayın Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER'e teşekkür ederim.

Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Maden Mühendisliği Öğretim Üyesi sayın Prof. Dr. Adem ERSOY'a, Bölüm Başkanı sayın Prof. Dr. Tayfun Yusuf YÜNSEL'e ve Bölüm Başkan Yardımcısı sayın Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA'ya doktora çalışmalarım boyunca yapmış oldukları katkılardan ötürü teşekkürü borç bilim. Sayın Doktor Öğretim Üyesi Onur GÜVEN'e, bilgisini, emeğini ve zamanını esirgemediği göstermiş olduğu yardım ve desteklerden ötürü çok teşekkür ederim. Arş. Gör. Dr. Arman EHSANİ'ye bilgi birikimini benimle sınırsız bir şekilde paylaştığı için çok teşekkür ederim. Arş. Gör. Burçin KAYMAKOĞLU'na tez çalışmam boyunca göstermiş olduğu dostluk, mesleki paylaşım ve yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim. Yüksek Kimyager Esin ATEŞÇİ'ye deneysel çalışmalarım esnasında yol göstericiliği ve yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyeleri sayın Doç. Dr. Mahmut ALTINER'e deneysel çalışmalarımın analizlerinde göstermiş olduğu yardımlarından dolayı, sayın Doktor Öğretim Üyesi Nil YAPICI'ya mineralojik analizlerde göstermiş olduğu yardım ve desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Babam Mehmet Yıldırım TOMBAL'a, annem Fikriye TOMBAL'a, kardeşlerim Nazan ÇİFTÇİ TOMBAL ve Yağız TOMBAL'a, yol arkadaşım Mustafa KARA'ya, yeğenim Efe TOMBAL'a ve oğlum Atlas Umut KARA'ya çok teşekkür ederim.

Kasım 2022

Tuğba Deniz TOMBAL

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI.....	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ.....	xv
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xviii
ABSTRACT	xxiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	4
2.1. TANE MORFOLOJİSİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER	4
2.1.1. Form	5
2.1.1.1. Form faktörleri	10
2.1.1.2. Alternatif bir form sınıflandırma yöntemi	11
2.1.2. Yuvarlaklık ve Köşelilik	12
2.1.2.1. Kenar ve köşe yuvarlaklığı	12
2.1.2.2. Açısallık (Köşelilik)	17
2.1.2.3. Yuvarlaklık için yeni bir parametre.....	17
2.1.3. Küresellik	19
2.1.4. Düzensizlik.....	21
2.1.5. Tane Morfolojisini Kontrol Eden Faktörler	23
2.2. GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ.....	24
2.2.1. ImageJ Görüntü Analiz Programı	25
2.3. LİÇ PROSESİ VE ÇÖZÜNME KİNETİĞİ	27
2.3.1. Liç Kinetik Modelleri.....	28
2.3.1.1. Küçülen Çekirdek Modeli	29

2.3.1.2. Küçülen Partikül Modeli	32
2.4. ÖNCEDEN YAPILMIŞ OLAN ÇALIŞMALAR	33
3. YÖNTEM	37
3.1. ÇALIŞMA SAHASI	38
3.2. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN CİHAZLAR VE YÖNTEMLER ..	42
3.2.1. Numune Hazırlamada Kullanılan Cihazlar	42
3.2.2. Fiziksel Analizler	42
3.2.3. Kimyasal Analizler	42
3.2.4. Mineralojik Analizler	43
3.2.5. pH profili	43
3.2.6. Tane Şekil Faktörü Çalışmaları	43
3.2.7. Kimyasal Çözündürme (Liç) Deneyleri	44
3.2.8. Çözünme Kinetiği Analizleri	44
4. BULGULAR	46
4.1. NUMUNELERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	46
4.1.1. Nem Analizleri	46
4.1.2. Tane Boyut Analizleri	46
4.1.3. Yoğunluk Tayini	48
4.2. NUMUNELERİN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	49
4.3. NUMUNELERİN MİNERALojİK ÖZELLİKLERİ	49
4.3.1. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizleri	49
4.3.2. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) Analizi	50
4.3.3. Parlak Kesit Çalışmaları	54
4.4. pH PROFİLİ	56
4.5. LİÇ DENEYLERİ	59
4.5.1. Tane Boyutunun Etkisi	59
4.5.2. Katı Oranının Etkisi	60
4.5.3. Liç Süresinin Etkisi	61
4.5.4. Asit Dozajının Etkisi	62
4.5.5. Pülp sıcaklığının etkisi	63
5. TARTIŞMA	65
5.1. KİNETİK ANALİZ	65
5.1.1. Pb liç deneylerinin kinetik analizi	66
5.1.1.1. H_2SO_4 deneyleri için liç kinetiği	66

5.1.1.2. HCl deneyleri için liç kinetiği.....	68
5.1.1.3. HNO ₃ deneyleri için liç kinetiği.....	71
5.1.2. Zn liç deneylerinin kinetik analizi.....	75
5.1.2.1. H ₂ SO ₄ deneyleri için liç kinetiği.....	75
5.1.2.2. HCl deneyleri için liç kinetiği.....	78
5.1.2.3. HNO ₃ deneyleri için liç kinetiği.....	81
5.1.3. Cu liç deneylerinin kinetik analizi	83
5.1.3.1. H ₂ SO ₄ deneyleri için liç kinetiği	83
5.1.3.2. HCl deneyleri için liç kinetiği	86
5.1.3.3. HNO ₃ deneyleri için liç kinetiği.....	89
5.2. TANE MORFOLOJİSİNİN ÇÖZÜNME KİNETİĞİNE ETKİSİ	92
5.2.1. Pb liç numuneleri tane morfolojisi çalışmaları	94
5.2.1.1. H ₂ SO ₄ liçi deney numunelerinin incelenmesi	94
5.2.1.2. HCl liçi deney numunelerinin incelenmesi.....	96
5.2.1.3. HNO ₃ liçi deney numunelerinin incelenmesi.....	98
5.2.2. Zn liç numuneleri tane morfolojisi çalışmaları	99
5.2.2.1. H ₂ SO ₄ liçi deney numunelerinin incelenmesi	99
5.2.2.2. HCl liçi deney numunelerinin incelenmesi.....	101
5.2.2.3. HNO ₃ liçi deney numunelerinin incelenmesi.....	103
5.2.3. Cu liç numuneleri tane morfolojisi çalışmaları	104
5.2.3.1. H ₂ SO ₄ liçi deney numunelerinin incelenmesi	104
5.2.3.2. HCl liçi deney numunelerinin incelenmesi.....	106
5.2.3.3. HNO ₃ liçi deney numunelerinin incelenmesi.....	108
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	110
KAYNAKLAR.....	117
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	127
ETİK KURUL İZİN YAZISI	129
KURUM İZNİ YAZILARI.....	130
ÖZGEÇMİŞ	131

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2. 1: L, I ve S ölçümü için alternatif protokoller (A) Yan uzunluklara L, I ve S atanan bir küp	8
Şekil 2. 2: Tablo 2.2’de önerilen sınıflandırma şemasına dayanan, tane uzanım ve/veya düzlüğünün tahmini için (A) dikdörtgen ve (B) elips örneklerini kullanarak bilgisayar tarafından üretilen görsel karşılaştırmacı (Blott ve Pye, 2008).....	12
Şekil 2. 3: (A) Tane yuvarlaklığı (Wadell, 1932); (B) açısallık (Lees, 1964-a); (C) dairesellik (Riley, 1941); ve (D) düzensizlik (Blott ve Pye, 2008) tespiti için yapılan ölçümleri gösteren diyagramlar	15
Şekil 2. 4: Tablo 2.5’de önerilen sınıflandırma şemasına dayalı olarak, (A) Sekiz uçlu bir yıldız ve (B) bir kare örnekleri kullanılarak tane yuvarlaklığının kestirimi için bilgisayar tarafından üretilen görsel karşılaştırmacı (Blott ve Pye, 2008).....	16
Şekil 2. 5: Çevre uzunluğundaki artış (Takashimizu ve Iiyoshi, 2016)	18
Şekil 2. 6: Dairesellikteki azalma (Takashimizu ve Iiyoshi, 2016).....	18
Şekil 2. 7: Tablo 2.7’de önerilen sınıflandırma şemasına dayanılarak tane daireselliğine (iki boyutta) ve küreselliğine (üç boyutlu) ilişkin tahmin için bilgisayar tarafından üretilen görsel karşılaştırmacı (Blott ve Pye, 2008).	23
Şekil 2. 8: Görüntü işleme genel akım şeması (Çomak vd., 2011).	25
Şekil 2. 9: Görüntü işleme teknikleri (Çomak vd., 2011).	25
Şekil 2. 10: Windows işletim sisteminde ImageJ ana penceresi (Burger ve Burge, 2016).	27
Şekil 2. 11: Liç işlemini etkileyen fiziksel ve kimyasal faktörler (VU, 2018).....	28
Şekil 2. 12: Küçülen çekirdek modeli (Carrillo-Pedroza vd., 2012)	30
Şekil 2. 13: Küçülen çekirdek modelinde etkin çekirdek çapının reaksiyon süresine bağlı olarak değişimi	31
Şekil 2. 14: Küçülen çekirdek modelinde tane çapının reaktan konsantrasyonlarına göre değişimi	32
Şekil 2. 15: Küçülen partikül modeli.....	33

Şekil 3. 1: Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait akım şeması	38
Şekil 3. 2: Balıkesir Balya kurşun-çinko cevheri çalışma sahası	39
Şekil 3. 3: Kastamonu Küre bakır cevheri çalışma sahası.....	41
Şekil 4. 1: Tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerinin nem analizi grafiği	46
Şekil 4. 2: Tüvenan Pb-Zn numunesinin kırıcı çıkışı elek altı ve elek üstü eğrileri.....	48
Şekil 4. 3: Tüvenan Cu numunesinin kırıcı çıkışı elek altı ve elek üstü eğrileri	48
Şekil 4. 4: Pb-Zn numunesinin XRD kırınım deseni.....	50
Şekil 4. 5: Cu numunesinin XRD kırınım deseni	50
Şekil 4. 6: Pb-Zn numunesinin EDS analizine tabi tutulan SEM fotoğrafları.....	51
Şekil 4. 7: Cu numunesinin EDS analizine tabi tutulan SEM fotoğrafları	54
Şekil 4. 8: Pb-Zn numunesine ait parlak kesit fotoğrafları.....	55
Şekil 4. 9: Cu numunesine ait parlak kesit fotoğrafları	56
Şekil 4. 10: Pb-Zn numunesinin pH profili	57
Şekil 4. 11: Cu numunesinin pH profili.....	58
Şekil 4. 12: Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin tane boyutuna göre değişim grafiği.....	60
Şekil 4. 13: Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin katı oranına göre değişim grafiği	61
Şekil 4. 14: Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin liç süresine göre değişim grafiği	62
Şekil 4. 15: Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin asit dozajına göre değişim grafiği	63
Şekil 4. 16: Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin pülp sıcaklığına göre değişim grafiği.....	64
Şekil 5. 1: H ₂ SO ₄ ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği.....	66
Şekil 5. 2: H ₂ SO ₄ ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği.....	66
Şekil 5. 3: H ₂ SO ₄ ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği	67
Şekil 5. 4: H ₂ SO ₄ ile gerçekleştirilen Pb liçi için Arrhenius grafiği.....	68

Şekil 5. 5: HCl ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği	69
Şekil 5. 6: HCl ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği	69
Şekil 5. 7: HCl ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği	70
Şekil 5. 8: HCl ile gerçekleştirilen Pb liçi için Arrhenius grafiği	71
Şekil 5. 9: HNO ₃ ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği	72
Şekil 5. 10: HNO ₃ ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği	72
Şekil 5. 11: HNO ₃ ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği	73
Şekil 5. 12: HNO ₃ ile gerçekleştirilen Pb liçi için Arrhenius grafiği	74
Şekil 5. 13: H ₂ SO ₄ ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği	75
Şekil 5. 14: H ₂ SO ₄ ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği	76
Şekil 5. 15: H ₂ SO ₄ ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği	76
Şekil 5. 16: H ₂ SO ₄ ile gerçekleştirilen Zn liçi için Arrhenius grafiği	77
Şekil 5. 17: HCl ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği	78
Şekil 5. 18: HCl ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği	79
Şekil 5. 19: HCl ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği	79
Şekil 5. 20: HCl ile gerçekleştirilen Zn liçi için Arrhenius grafiği	80
Şekil 5. 21: HNO ₃ ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği	81
Şekil 5. 22: HNO ₃ ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği	81
Şekil 5. 23: HNO ₃ ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği	82

Şekil 5. 24: HNO_3 ile gerçekleştirilen Zn liçi için Arrhenius grafiği	83
Şekil 5. 25: H_2SO_4 ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği	84
Şekil 5. 26: H_2SO_4 ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği	84
Şekil 5. 27: H_2SO_4 ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği	85
Şekil 5. 28: H_2SO_4 ile gerçekleştirilen Cu liçi için Arrhenius grafiği	86
Şekil 5. 29: HCl ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği	87
Şekil 5. 30: HCl ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği	87
Şekil 5. 31: HCl ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği	88
Şekil 5. 32: HCl ile gerçekleştirilen Cu liçi için Arrhenius grafiği	89
Şekil 5. 33: HNO_3 ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği	90
Şekil 5. 34: HNO_3 ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği	90
Şekil 5. 35: HNO_3 ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği	91
Şekil 5. 36: HNO_3 ile gerçekleştirilen Cu liçi için Arrhenius grafiği	92
Şekil 5. 37: Tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerine ait örnek mikroskop fotoğrafları	93
Şekil 5. 38: H_2SO_4 liçi Pb optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları	95
Şekil 5. 39: HCl liçi Pb optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları	97
Şekil 5. 40: HNO_3 liçi Pb optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları	98
Şekil 5. 41: H_2SO_4 liçi Zn optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları	100
Şekil 5. 42: HCl liçi Zn optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları	102

Şekil 5. 43: HNO ₃ liçi Zn optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları	103
Şekil 5. 44: H ₂ SO ₄ liçi Cu optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları	105
Şekil 5. 45: HCl liçi Cu optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları	107
Şekil 5. 46: HNO ₃ liçi Cu optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları	108



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2. 1: Üç farklı uygulayıcı tarafından üç kez yapılan 23 doğal çakıl boyutlu tanelerin L, I ve S ölçümlerinin kesinliği (değişimin yüzde katsayısı) ve hesaplanan form oranlarının toplam kesinliği (Blott ve Pye, 2008).....	7
Tablo 2. 2: Sık kullanılan şekil faktörleri (Blott ve Pye, 2008).....	10
Tablo 2. 3: Uzama derecesine (I/L) ve düzgünlüğüne (S/I) dayalı tane biçimi için önerilen sınıflandırma terminolojisi (Blott ve Pye, 2008).	11
Tablo 2. 4: Sık kullanılan yuvarlaklık indeksleri	13
Tablo 2. 5: Wadell'in (1932) ölçüm yöntemine dayalı alternatif yuvarlaklık sınıflandırma şemaları (Blott ve Pye, 2008).	16
Tablo 2. 6: Sıklıkla kullanılan dairesellik faktörleri (Blott ve Pye, 2008).	19
Tablo 2. 7: Tane daireselliğinde (iki boyutta kullanıldığında) veya tane küresellesitesinde (üç boyutlu uygulandıklarında), Riley (1941) metodu kullanılarak ölçülen, önerilen sınıflandırma şeması	21
Tablo 4. 1: Tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerinin kırıcı çıkışı tane boyut dağılım sonuçları ..	47
Tablo 4. 2: Tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerine ait ICP-OES analizi sonuçları	49
Tablo 4. 3: Pb-Zn numunesinin EDS analiz sonuçları (%W: ağırlık, %A: atomik ağırlık)	51
Tablo 4. 4: Cu numunesinin EDS analiz sonuçları (%W: ağırlık, %A: atomik ağırlık)	53
Tablo 4. 5: Pb-Zn numunesinin saf su içerisinde süreye bağlı pH profili	57
Tablo 4. 6: Cu numunesinin saf su içerisinde süreye bağlı pH profili	58
Tablo 5. 1: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (H ₂ SO ₄ liçi-Pb)	67
Tablo 5. 2: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (HCl liçi-Pb).....	70

Tablo 5. 3: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (HNO_3 liçi-Pb)	73
Tablo 5. 4: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (H_2SO_4 liçi-Zn)	77
Tablo 5. 5: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (HCl liçi-Zn)	80
Tablo 5. 6: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (HNO_3 liçi-Zn)	82
Tablo 5. 7: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (H_2SO_4 liçi-Cu)	85
Tablo 5. 8: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (HCl liçi-Cu)	88
Tablo 5. 9: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (HNO_3 liçi-Cu)	91
Tablo 5. 10: Tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerine ait ImageJ analizi sonuçları	94
Tablo 5. 11: Tane morfolojisi çalışmaları kapsamında her bir deney için numunelere atanan kodlar	94
Tablo 5. 12: H_2SO_4 liçi Pb optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları	95
Tablo 5. 13: HCl liçi Pb optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları	97
Tablo 5. 14: HNO_3 liçi Pb optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları	99
Tablo 5. 15: H_2SO_4 liçi Zn optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları	100
Tablo 5. 16: HCl liçi Zn optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları	102
Tablo 5. 17: HNO_3 liçi Zn optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları	104
Tablo 5. 18: H_2SO_4 liçi Cu optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları	106
Tablo 5. 19: HCl liçi Cu optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları	107
Tablo 5. 20: HNO_3 liçi Cu optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları	109

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
°C	: Santigrat
pH	: Hidrojen konsantrasyonunun kologaritması
µm	: Mikrometre
ppm	: Milyonda bir (parts per million)
A	: Açıcılık derecesi
I	: Düzensizlik indeksi
R ₀	: Çözeltiye girmemiş tane yarıçapı
C _A	: Çözeltideki reaktif konsantrasyonu
D	: Difüzyon katsayısı
ρ	: Cevher yoğunluğu
ρ _B	: Katı yoğunluğu
r ₀	: Katı tanenin başlangıç yarıçapı
t	: Reaksiyon süresi

Kısaltmalar	Açıklama
MTA	: Maden Tetkik ve Arama
USGS	: ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
ASTM	: Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (American Society for Testing and Materials)
XRD	: X-Işını Kırınımı (X-Ray Diffraction)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
ICP-OES	: İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi
IPA	: Tek tane analizi
AAS	: Atomik Absorpsiyon Spektrometresi

ÖZET

[DOKTORA TEZİ]

[METALİK CEVHERLERİN ÇÖZÜNME KİNETİĞİ MODELLERİ ÜZERİNE TANE MORFOLOJİSİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI]

[Tuğba Deniz TOMBAL]

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

[Danışman: Prof. Dr. İlgin KURŞUN ÜNVER]

Bu çalışmanın temel amacı; tane morfolojisinin metalik cevherlerin (bakır, kurşun ve çinko gibi) çözünme kinetiği modelleri üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. Doktora tezinin özgünlüğünü; farklı metaller ve farklı çözünme kinetiği modelleriyle çalışılmış olmasının yanı sıra şekil faktörünün kimyasal zenginleştirme süreçlerine olan etkilerinin irdelenmesi de desteklemiştir. Bu tez çalışması kapsamında yapılmış olan literatür çalışması sonucu elde edilmiş olan veriler ışığında karakterizasyon çalışmaları, kimyasal zenginleştirme çalışmaları, kinetik analizler ve tane morfolojisi çalışmaları olarak dört ana başlık planlanmıştır.

İlk başlık olan karakterizasyon çalışmaları kapsamında hem Pb-Zn hem de Cu numunelerinin fiziksel, kimsayal, mineralojik ve elektrokinetik özellikleri ortaya konarak birbirleriyle olan ilişkileri irdelenmiştir. Balıkesir Balya bölgesi kurşun-çinko cevheriyle yapılan detaylı karakterizasyon çalışmaları sonucunda; numunenin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlara göre numunenin nem oranı %0,069, yoğunluğu 4,89 gr/cm³, d₅₀ ve d₈₀ boyutları da sırasıyla 1,4 mm ve 3,55 mm olarak bulunmuştur. Kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen ICP-OES analizi

sonucunda da %1,41 Pb ve %2,14 Zn içerdiği belirlenmiştir. Numunenin mineral kompozisyonunun belirlenmesi için gerçekleştirilen XRD analizi sonucunda Pb-Zn numunesinin kuvars, dolomit, sfalerit, karpit ve kalderit içerdiği belirlenmiştir. EDS analizleri sonuçları incelendiğinde, 1. fotoğraf için ortalama %9.95 Pb ve %9.55 Zn, 2. fotoğraf için %7.88 Pb ve %6.64 Zn, 3. fotoğraf için %12.71 Pb ve %13.58 Zn ve 4. fotoğraf için %11.31 Pb ve %8,04 Zn içeriği tespit edilmiştir. Parlak kesit çalışmaları sonucu Pb-Zn numunesinde galen, sfalerit ve çok az miktarda da pirit olduğu gözlenmiştir. Numunenin pH profili incelendiğinde pH 3, pH 5 ve pH 7 deneylerinde numunenin pH değerinin belirli bir süre sonra pH 8 civarında tampon bir pH değerine ulaşma eğilimi göstermeye başladığı görülmüştür. Kastamonu Küre bölgesi bakır cevheriyle yapılan detaylı karakterizasyon çalışmaları sonucunda; numunenin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlara göre numunenin nem oranı %0,0086, yoğunluğu 4,96 gr/cm³, d₅₀ ve d₈₀ boyutları da sırasıyla 2,32 mm ve 4,48 mm olarak bulunmuştur. Kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen ICP-OES analizi sonucunda da %4,24 Cu içerdiği belirlenmiştir. Numunenin mineral kompozisyonunun belirlenmesi için gerçekleştirilen XRD analizi sonucunda numunenin kuvars, amesit, pirit ve kalkopirit içerdiği görülmüştür. EDS analizleri sonuçları incelendiğinde, 1. fotoğraf için ortalama %6.95, 2. fotoğraf için %5.36, 3. fotoğraf için %7.35 ve 4. fotoğraf için %11.76 Cu içeriği tespit edilmiştir. Parlak kesit çalışmaları sonucu bakırın kalkopirit minerali formunda, psedömorf, rölyefli, çok yüksek, ince kristalen halinde ve küp sistemi kristalize olmuş şekilde olduğu görülmüştür. Numunenin pH profili incelendiğinde pH 4,5, pH 8,5, pH 9,5 ve pH 10,5 deneylerinde numunenin pH değerinin belirli bir süre sonra pH 8 civarında tampon bir pH değerine ulaşma eğilimi göstermeye başladığı görülmüştür.

İkinci ana başlık olan kimyasal zenginleştirme çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen kimyasal çözündürme deneylerinde numunelerin Pb, Zn ve Cu içeriklerinin yüksek verimle çözeltiye alınması hedeflenmiştir. Sülfürik asit (H₂SO₄), hidroklorik asit (HCl) ve nitrik asit (HNO₃) ile gerçekleştirilen kimyasal çözündürme deneylerinde; 75-106-150 µm tane boyutu, %5-10-15-20-25 katı oranı, 30-60-120-180-240 dak liç süresi, 0,25-0,5-1-2-5 M asit dozajı ve 30-40-50-60-70 °C pülp sıcaklığı parametreleri denenmiştir. H₂SO₄ deneylerinde Pb için optimum sonuçlar 106 µm tane boyutu, %20 katı oranı, 120 dak liç süresi, 0,5 M asit dozajı ve 50 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Zn için optimum sonuçlar 75 µm tane boyutu, %15 katı oranı, 120 dak liç süresi, 0,5 M asit dozajı ve 50 °C pülp sıcaklığı şartlarında

elde edilmiştir. Cu için optimum sonuçlar 75 µm tane boyutu, %25 katı oranı, 60 dak liç süresi, 1 M asit dozajı ve 70 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Belirtilmiş olan bu optimum koşullarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda %97,48 Pb, %97,32 Zn ve %95,04 Cu çözünme verimleri elde edilmiştir. HCl deneylerinde Pb için optimum sonuçlar 106 µm tane boyutu, %20 katı oranı, 120 dak liç süresi, 0,25 M asit dozajı ve 60 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Zn için optimum sonuçlar 106 µm tane boyutu, %25 katı oranı, 60 dak liç süresi, 0,5 M asit dozajı ve 70 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Cu için optimum sonuçlar 75 µm tane boyutu, %15 katı oranı, 120 dak liç süresi, 0,5 M asit dozajı ve 70 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Belirtilmiş olan bu optimum koşullarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda %95,44 Pb, %96,38 Zn ve %94,80 Cu çözünme verimleri elde edilmiştir. HNO₃ deneylerinde Pb için optimum sonuçlar 75 µm tane boyutu, %20 katı oranı, 30 dak liç süresi, 0,5 M asit dozajı ve 60 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Zn için optimum sonuçlar 75 µm tane boyutu, %20 katı oranı, 60 dak liç süresi, 1 M asit dozajı ve 50 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Cu için optimum sonuçlar 75 µm tane boyutu, %15 katı oranı, 120 dak liç süresi, 0,25 M asit dozajı ve 40 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Belirtilmiş olan bu optimum koşullarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda %94,87 Pb, %96,06 Zn ve %95,71 Cu çözünme verimleri elde edilmiştir.

Üçüncü ana başlık olan kinetik analiz çalışmaları kapsamında Pb, Zn ve Cu için H₂SO₄, HCl ve HNO₃ deneylerinden elde edilmiş olan sonuçlara kimyasal model, difüzyon modeli ve film difüzyonu modeli uygulanarak çözünme hızının sıcaklığa bağlı olarak değişimi ortaya konmaya çalışılmıştır. Her numune ve her asit için -106+75 µm tane boyutu, 1 M asit dozajı, %20 katı oranı, 0-30 dak liç süresi, 50-90 °C pülp sıcaklığı, 250 dev/dak karıştırma hızı koşullarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Pb liç deneylerinin kinetik analiz çalışmaları kapsamında H₂SO₄, HCl ve HNO₃ deneyleri için liç kinetiği incelendiğinde farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimleri grafiklendirilerek elde edilen doğruların eğiminden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanmış ve bu değerler incelendiği zaman Pb çözünmesinin her üç asit ortamında da Küçülen Çekirdek Modeli'nde difüzyon kontrollü modele uyduğu görülmüştür. Pb liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği doğrusunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi H₂SO₄ için 5,902 kJ/mol, HCl için 6,204 kJ/mol ve HNO₃ için de 3,151 kJ/mol'dür. Zn liç deneylerinin kinetik analiz çalışmaları kapsamında H₂SO₄, HCl ve HNO₃ deneyleri için liç kinetiği incelendiğinde farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimleri

grafiklendirilerek elde edilen doğruların eğiminden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanmış ve bu değerler incelendiği zaman Zn çözünmesinin her üç asit ortamında da Küçülen Çekirdek Modeli'nde difüzyon kontrollü modele uyduğu görülmüştür. Zn liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği doğrusunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi H_2SO_4 için 3,615 kJ/mol, HCl için 4,811 kJ/mol ve HNO_3 için de 4,736 kJ/mol'dür. Cu liç deneylerinin kinetik analiz çalışmaları kapsamında H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 deneyleri için liç kinetiği incelendiğinde farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimleri grafiklendirilerek elde edilen doğruların eğiminden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanmış ve bu değerler incelendiği zaman Cu çözünmesinin her üç asit ortamında da Küçülen Çekirdek Modeli'nde difüzyon kontrollü modele uyduğu tespit edilmiştir. Cu liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği doğrusunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi H_2SO_4 için 5,698 kJ/mol, HCl için 2,648 kJ/mol ve HNO_3 için de 4,561 kJ/mol'dür. H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 ile yapılan Pb, Zn ve Cu liç deneylerinin kinetik analizleri incelendiğinde, bütün kinetik analiz çalışmaları sonucu belirlenmiş olan kinetik modellerle, Arrhenius grafiklerinden elde edilmiş olan verilerle hesaplanan aktivasyon enerjilerinin değer aralıklarının birbirlerini doğruladığı gözlenmiştir. Difüzyon kontrollü model için tüm deneyler göz önünde bulundurulduğunda tüm sıcaklık değerlerinde nispeten iyi oranda değerlerin elde edildiği, tüm çizgilerin orijinden ya da orijine yakın bir yerden geçtiği gözlenmiştir. Bu da reaksiyonun incelenen tüm sıcaklık aralıklarında difüzyon kontrollü olduğunu göstermektedir. Arrhenius grafiğinde belirgin bir kırılmanın olmaması da incelenen tüm sıcaklık aralıkları boyunca tek bir kinetik kontrol sürecinin etkin olduğunu göstermektedir.

Dördüncü ana başlık olan tane morfolojisinin etkisinin irdelendiği kısımda öncelikli olarak -75+63 μm , -106+75 μm ve -150+106 μm tane boyutlarındaki tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerine ait mikroskop fotoğrafları çekilmiş ve ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılarak her bir numuneye ait dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerlerine ait ortalama tane şekil faktörü değeri, standart sapma, minimum ve maksimum değerler hesaplanmıştır. Daha sonra Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin irdelendiği liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı deneylerine ait optimum değerlerin elde edildiği liç numuneleri fotoğraflanarak ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılmış, her bir numunenin dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerlerine ait ortalama tane şekil faktörü

değeri, standart sapma, minimum ve maksimum değerler hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular tüvenan numunelere ait verilerle karşılaştırılarak tane morfolojisinin çözünme kinetiğine olan etkileri ortaya konmaya çalışılmıştır. Pb liç numuneleri tane morfolojisi çalışmaları kapsamında H_2SO_4 liçi deney numuneleri incelendiğinde, $Pb_{lsH_2SO_4}$, $Pb_{adH_2SO_4}$ ve $Pb_{psH_2SO_4}$ numunelerinin tümünün dairesellik ve yuvarlaklık değerlerinin arttığı görülmüştür. $Pb_{lsH_2SO_4}$ 'ün sertlik değerleri azalırken, $Pb_{adH_2SO_4}$ ve $Pb_{psH_2SO_4}$ 'ün sertlik değerinde artış görülmüştür. HCl liçi deney numuneleri incelendiğinde, yuvarlaklık değeri Pb_{lsHCl} için sabit kalırken, Pb_{adHCl} ve Pb_{psHCl} için arttığı görülmüştür. Sertlik değerinin ise her üç numune için arttığı görülmüştür. HNO_3 liçi deney numuneleri incelendiğinde, Pb_{lsHNO_3} ve Pb_{adHNO_3} numunelerinin dairesellik değerleri azalırken Pb_{psHNO_3} numunesinin dairesellik değerinin arttığı; Pb_{lsHNO_3} numunesinin yuvarlaklık değeri azalırken, Pb_{adHNO_3} ve Pb_{psHNO_3} numunelerinin yuvarlaklık değerlerinin arttığı görülmüştür. Sertlik değerleri incelendiğinde, Pb_{lsHNO_3} 'ün sertlik değerinin arttığı, Pb_{adHNO_3} ve Pb_{psHNO_3} 'ün sertlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. Zn liç numuneleri tane morfolojisi çalışmaları kapsamında H_2SO_4 liçi deney numuneleri incelendiğinde, her üç numunenin de dairesellik değerleri azalırken, yuvarlaklık ve sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. HCl liçi deney numuneleri incelendiğinde, üç numunenin de dairesellik değerlerinin arttığı görülmüştür. Zn_{lsHCl} 'in yuvarlaklık değeri artarken, Zn_{adHCl} ve Zn_{psHCl} 'in yuvarlaklık değerlerinin azaldığı görülmüştür. Sertlik değerleri incelendiği zaman, her üç numunenin sertlik değerinde artış olduğu görülmüştür. HNO_3 liçi deney numuneleri incelendiğinde, Zn_{lsHNO_3} ve Zn_{psHNO_3} numunelerinin dairesellik değerleri azalırken, Zn_{adHNO_3} numunesinin dairesellik değerinin arttığı görülmüştür. Zn_{lsHNO_3} ve Zn_{adHNO_3} numunelerinin yuvarlaklık değerleri artmış, Zn_{psHNO_3} numunesinin yuvarlaklık değeri azalmıştır. Zn_{lsHNO_3} numunesinin sertlik değeri sabit kalırken, Zn_{adHNO_3} numunesinin sertlik değeri artmış, Zn_{psHNO_3} 'ünki azalmıştır. Cu liç numuneleri tane morfolojisi çalışmaları kapsamında H_2SO_4 liçi deney numuneleri incelendiğinde, her üç numunenin de dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. HCl liçi deney numuneleri incelendiğinde, her üç numunenin de dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. HNO_3 liçi deney numuneleri incelendiğinde, her üç numunenin de dairesellik değerlerinin arttığı görülmüştür. Cu_{lsHNO_3} ve Cu_{adHNO_3} 'ün yuvarlaklık ve sertlik değerleri artarken, Cu_{psHNO_3} 'ün yuvarlaklık ve sertlik değeri azalmıştır.

Tez kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalar sonucunda tane morfolojisindeki değişimlerin Pb, Zn ve Cu liç deneylerinde bir kontrol faktörü olabileceği görülmüştür.

Ancak, tane morfolojisi halen daha tesis uygulamaları için araştırılması ve geliştirilmesi gereken bir prosestir. |

Kasım 2022 , |157| sayfa.

Anahtar kelimeler: |Tane Morfolojisi, Liç Kinetiği, Metalik Cevherler|



ABSTRACT

[Ph.D. THESIS]

[INVESTIGATION OF EFFECT OF PARTICLE MORPHOLOGY ON DISSOLUTION KINETICS MODELS OF METALLIC ORES]

[Tuğba Deniz TOMBAL]

Istanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Mining Engineering

Mining Engineering Programme

[Supervisor: Prof. Dr. İlgin KURŞUN ÜNVER]

[The main purpose of this study is to investigate the effect of particle morphology on the dissolution kinetic models of metallic ores (such as copper, lead and zinc). The originality of the doctoral thesis was supported by the study of different metals and different dissolution kinetic models, as well as examining the effects of the shape factor on the chemical beneficiation processes. In the light of the data obtained as a result of the literature study conducted within the scope of this thesis, four main headings were planned as characterization studies, chemical beneficiation studies, kinetic analyzes and particle morphology studies.

Within the scope of characterization studies, which is the first title, the physical, chemical, mineralogical and electrokinetic properties of both Pb-Zn and Cu samples were revealed and their relationships with each other were examined. As a result of detailed characterization studies carried out with lead-zinc ore in Balıkesir Balya region; according to the results obtained from the experiments carried out to determine the physical properties of the sample, the moisture content of the sample was found to be 0.069%, the density was found to be 4.89

gr/cm³, and the d₅₀ and d₈₀ dimensions were found to be 1.4 mm and 3.55 mm, respectively. As a result of the ICP-OES analysis performed to define its chemical properties, it was determined that the sample contained 1.41% Pb and 2.14% Zn. As a result of the XRD analysis performed to define the mineral composition of the sample, it was determined that the Pb-Zn sample contained quartz, dolomite, sphalerite, carbide and calderite. When the results of EDS analyzes were examined, the average content of 9.95% Pb and 9.55% Zn for the 1st photo, the average content of 7.88% Pb and 6.64% Zn for the 2nd photo, the average content of 12.71% Pb and 13.58% Zn for the 3rd photo, and the average content of 11.31% Pb and 11.31% for the 4th photo, were determined. As a result of polish section studies, it was observed that galena, sphalerite and a very small amount of pyrite were found in the Pb-Zn sample. When the pH profile of the sample was examined, it was observed that the pH value of the sample started to show a tendency to reach a buffer pH value around pH 8 after a certain period of time in pH 3, pH 5 and pH 7 experiments. As a result of detailed characterization studies carried out with copper ore in Kastamonu Küre region; according to the results obtained from the experiments carried out to determine the physical properties of the sample, the moisture content of the sample was found to be 0.0086%, the density was found to be 4.96 gr/cm³, and the d₅₀ and d₈₀ dimensions were found to be 2.32 mm and 4.48 mm, respectively. As a result of the ICP-OES analysis performed to define its chemical properties, it was determined that the sample contained 4.24% Cu. As a result of the XRD analysis performed to define the mineral composition of the sample, it was determined that the Cu sample contained quartz, amesite, pyrite and chalcopyrite. When the results of EDS analyzes were examined, the average content of 6.95% Cu for the 1st photo, the average content of 5.36% Cu for the 2nd photo, the average content of 7.35% Cu for the 3rd photo, and the average content of 11.76% Cu, were determined. As a result of the polish section studies, it had been seen that copper was in the form of chalcopyrite mineral, pseudomorph, relief, very high, fine crystalline and the cube system was crystallized. When the pH profile of the sample was examined, it was observed that the pH value of the sample started to show a tendency to reach a buffer pH value around pH 8 after a certain period of time in pH 4.5, pH 8.5, pH 9.5 and pH 10.5 experiments.

In the chemical dissolution experiments carried out within the scope of chemical beneficiation studies, which was the second title, it was aimed to extract the Pb, Zn and Cu contents of the samples with high efficiency. In chemical dissolution experiments carried out with sulfuric acid (H₂SO₄), hydrochloric acid (HCl) and nitric acid (HNO₃); 75-106-150 µm particle size,

5-10-15-20-25% solids ratio, 30-60-120-180-240 min. leaching time, 0.25-0.5-1-2-5 M acid dosage and 30-40-50-60-70 °C pulp temperature parameters were tested. Optimum results for Pb in H₂SO₄ experiments were obtained under 106 µm particle size, 20% solids ratio, 120 min leaching time, 0.5 M acid dosage and 50 °C pulp temperature conditions. Optimum results for Zn were obtained under the conditions of 75 µm particle size, 15% solids ratio, 120 min leaching time, 0.5 M acid dosage and 50 °C pulp temperature. Optimum results for Cu were obtained under the conditions of 75 µm particle size, 25% solids ratio, 60 min leaching time, 1 M acid dosage and 70 °C pulp temperature. As a result of the experiments carried out under these optimum conditions, dissolution efficiencies of 97.48% Pb, 97.32% Zn and 95.04% Cu were obtained. Optimum results for Pb in HCl experiments were obtained under 106 µm particle size, 20% solids ratio, 120 min leaching time, 0.25 M acid dosage and 60 °C pulp temperature conditions. Optimum results for Zn were obtained under the conditions of 106 µm particle size, 25% solids ratio, 60 min leaching time, 0.5 M acid dosage and 70 °C pulp temperature. Optimum results for Cu were obtained under the conditions of 75 µm particle size, 15% solids content, 120 min leaching time, 0.5 M acid dosage and 70 °C pulp temperature. As a result of the experiments carried out under these optimum conditions, dissolution efficiencies of 95.44% Pb, 96.38% Zn and 94.80% Cu were obtained. Optimum results for Pb in HNO₃ experiments were obtained under the conditions of 75 µm particle size, 20% solids ratio, 30 min leaching time, 0.5 M acid dosage and 60 °C pulp temperature. Optimum results for Zn were obtained under the conditions of 75 µm particle size, 20% solids ratio, 60 min leaching time, 1 M acid dosage and 50 °C pulp temperature. Optimum results for Cu were obtained under 75 µm particle size, 15% solids ratio, 120 min leaching time, 0.25 M acid dosage and 40 °C pulp temperature. As a result of the experiments carried out under these optimum conditions, dissolution efficiencies of 94.87% Pb, 96.06% Zn and 95.71% Cu were obtained.

Within the scope of the kinetic analysis studies, which is the third title, chemical model, diffusion model and film diffusion model were applied to the results obtained from H₂SO₄, HCl and HNO₃ experiments for Pb, Zn and Cu, and the variation of dissolution rate depending on temperature was tried to be revealed. For each sample and each acid, experiments were carried out under the conditions of -106+75 µm particle size, 1 M acid dosage, 20% solids ratio, 0-30 min leaching time, 50-90 °C pulp temperature, 250 rpm mixing speed. When the leaching kinetics for the H₂SO₄, HCl and HNO₃ experiments were examined within the scope of the kinetic analysis studies of the Pb leaching experiments, the dissolution

efficiencies obtained at different temperatures were graphed and the apparent rate constants and correlation coefficients were calculated from the slope of the lines obtained; when these values were examined, it was observed that Pb dissolution complied with the diffusion-controlled model in the Shrinking Core Model in all three acid environments. The activation energies calculated from the slope of the Arrhenius plot line obtained for different temperatures in Pb leaching dissolution efficiencies were 5.902 kJ/mol for H_2SO_4 , 6.204 kJ/mol for HCl and 3.151 kJ/mol for HNO_3 . When the leaching kinetics for the H_2SO_4 , HCl and HNO_3 experiments were examined within the scope of the kinetic analysis studies of the Zn leaching experiments, the dissolution efficiencies obtained at different temperatures were graphed and the apparent rate constants and correlation coefficients were calculated from the slope of the lines obtained; when these values were examined, it was observed that Pb dissolution complied with the diffusion-controlled model in the Shrinking Core Model in all three acid environments. The activation energies calculated from the slope of the Arrhenius plot line obtained for different temperatures in the dissolution efficiencies of Zn leaching were 3.615 kJ/mol for H_2SO_4 , 4.811 kJ/mol for HCl and 4.736 kJ/mol for HNO_3 . When the leaching kinetics for the H_2SO_4 , HCl and HNO_3 experiments were examined within the scope of the kinetic analysis studies of the Cu leaching experiments, the dissolution efficiencies obtained at different temperatures were graphed and the apparent rate constants and correlation coefficients were calculated from the slope of the lines obtained; when these values were examined, it was observed that Pb dissolution complied with the diffusion-controlled model in the Shrinking Core Model in all three acid environments. The activation energies calculated from the slope of the Arrhenius plot line obtained for different temperatures in Cu leaching dissolution efficiencies were 5.698 kJ/mol for H_2SO_4 , 2.648 kJ/mol for HCl and 4.561 kJ/mol for HNO_3 . When the kinetic analyzes of Pb, Zn and Cu leaching experiments with H_2SO_4 , HCl and HNO_3 were examined, it was seen that the value ranges of the activation energies calculated with the data obtained from the Arrhenius plots with the kinetic models determined as a result of all kinetic analysis studies confirmed each other. Considering all the experiments for the diffusion-controlled model, it was seen that relatively good values were obtained at all temperature values, and all lines passed from or near the origin. This shows that the reaction was diffusion controlled in all temperature ranges studied. The absence of a significant break in the Arrhenius plot also indicated that a single kinetic control process was effective over all the temperature ranges studied.

In the section where the effect of particle morphology, which is the fourth title, was examined, first of all, microscope photographs of run-of-mine Pb-Zn and Cu samples with particle sizes of $-75+63\ \mu\text{m}$, $-106+75\ \mu\text{m}$ and $-150+106\ \mu\text{m}$ were taken. By counting the particles in ImageJ analysis program, average particle shape factor value, standard deviation, minimum and maximum values of circularity, roundness and hardness values of each sample were calculated. Leaching samples in which optimum values of leaching time, acid dosage and pulp temperature experiments were obtained, were photographed and particle counted in the ImageJ analysis program. Average particle shape factor value, standard deviation, minimum and maximum values of circularity, roundness and hardness values of each sample were calculated. The effects of particle morphology on dissolution kinetics were tried to be revealed by comparing the obtained findings with the data of the run-of-mine samples. When the H_2SO_4 leaching test samples were examined within the scope of particle morphology studies of Pb leaching samples, it was observed that the circularity and roundness values of all of the $\text{Pb}_{\text{lsH}_2\text{SO}_4}$, $\text{Pb}_{\text{adH}_2\text{SO}_4}$ and $\text{Pb}_{\text{psH}_2\text{SO}_4}$ samples increased. While the solidity values of $\text{Pb}_{\text{lsH}_2\text{SO}_4}$ decreased, the solidity values of $\text{Pb}_{\text{adH}_2\text{SO}_4}$ and $\text{Pb}_{\text{psH}_2\text{SO}_4}$ increased. When the HCl leaching test samples were examined, it was observed that the roundness value remained constant for Pb_{lsHCl} , but increased for Pb_{adHCl} and Pb_{psHCl} . It was observed that the solidity values increased for all three samples. When the HNO_3 leach test samples were examined, it was found that while the circularity values of the $\text{Pb}_{\text{lsHNO}_3}$ and $\text{Pb}_{\text{adHNO}_3}$ samples decreased, the circularity value of the $\text{Pb}_{\text{psHNO}_3}$ sample increased; while the roundness value of the $\text{Pb}_{\text{lsHNO}_3}$ sample decreased, the roundness value of the $\text{Pb}_{\text{adHNO}_3}$ and $\text{Pb}_{\text{psHNO}_3}$ samples increased. When the solidity values were examined, it was seen that the solidity value of $\text{Pb}_{\text{lsHNO}_3}$ increased and the solidity values of $\text{Pb}_{\text{adHNO}_3}$ and $\text{Pb}_{\text{psHNO}_3}$ decreased. When the H_2SO_4 leaching test samples were examined within the scope of particle morphology studies of Zn leaching samples, it was observed that while the circularity values of all three samples decreased, the roundness and solidity values increased. When the HCl leaching test samples were examined, it was observed that the circularity values of all three samples increased. While the roundness value of Zn_{lsHCl} increased, the roundness value of Zn_{adHCl} and Zn_{psHCl} decreased. When the solidity values were examined, it was observed that the solidity values of all three samples increased. When the HNO_3 leach test samples were examined, the circularity values of the $\text{Zn}_{\text{lsHNO}_3}$ and $\text{Zn}_{\text{psHNO}_3}$ samples decreased, while the circularity value of the $\text{Zn}_{\text{adHNO}_3}$ sample increased. The roundness values of the $\text{Zn}_{\text{lsHNO}_3}$ and $\text{Zn}_{\text{adHNO}_3}$ samples increased, the roundness value of the $\text{Zn}_{\text{psHNO}_3}$ sample decreased. While the solidity value of

Zn_{IsHNO_3} sample remained constant, the solidity value of Zn_{adHNO_3} sample increased and that of Zn_{psHNO_3} decreased. When the H_2SO_4 leaching test samples were examined within the scope of particle morphology studies of Cu leaching samples, it was observed that the circularity, roundness and solidity values of all three samples increased. When the HCl leaching test samples were examined, it was observed that the circularity, roundness and solidity values of all three samples increased. When the HNO_3 leach test samples were examined, it was observed that the circularity values of all three samples increased. While the roundness and solidity values of Cu_{IsHNO_3} and Cu_{adHNO_3} increased, the roundness and solidity values of Cu_{psHNO_3} decreased.

As a result of the experimental studies carried out within the scope of the thesis, it was seen that the changes in the particle morphology could be a control factor in the Pb, Zn and Cu leaching experiments. However, particle morphology is still a process that needs to be investigated and developed for plant applications. |

November 2022, [157] pages.

Keywords: [Particle Morphology, Leaching Kinetics, Metallic Ores]

1. GİRİŞ

Kurşun, en az 5.000 yıldır kullanılan, eski uygulamalarının (Eski Mısır ve Romalılar zamanında su boruları yapımında) birçoğu günümüze kadar bozulmadan kalabilmiş, korozyona oldukça dayanıklı, yoğun, sünek ve dövülebilir mavi-gri bir metaldir. Kurşun (Pb), kütle numarası 207,19 g/mol, atom numarası 82, yoğunluğu $11,34 \text{ g/cm}^3$, ergime noktası 327°C , kaynama noktası 1749°C ve sertliği 1,5 olan bir metaldir. Doğada 130'dan fazla bulunan kurşun minerallerinin başlıcaları galen, seruzit, anglezit, jamesonit, jordanit, bulanjerit, piromorfit, mimetit ve vulfenittir. Ekonomik olarak işletilmekte olan yataklarda en çok bulunan kurşun minerali galen olup, genellikle çinko, bakır, gümüş, altın ve demir mineralleriyle birlikte bulunmaktadır. Kurşunun en önemli tüketim alanları akü imalatı ve yeraltı haberleşme kablolarının kurşunla izolasyonudur. Kurşun ayrıca oksit boyalar, kabloların kaplanması, kurşun tetraetil ve tetrametil formlarında benzin içinde oktan ayarlayıcı bileşikler olarak, radyasyonu en az geçiren metal olması nedeniyle x-ışınlarından korunma, renkli televizyon tüplerinin yapımında da kullanılmaktadır (Bulut, 1991; Engin, 2002; Fidan, 2016; MTA-3, 2021; USGS-1, 2021).

Çinko ilk olarak M.Ö. 2000 yıllarında Çinliler ve Romalılar tarafından alaşım materyali olarak, prinç yapımında kullanılmıştır. Hindistan'da ise M.S. 1000-1300 yıllarında çinkonun metal olarak kullanıldığı ve 14. yüzyılda ticari amaçla izabesinin yapıldığı bilinmektedir. 20. yüzyılın başlarında flotasyon yönteminin bulunması çinko endüstrisinde önemli bir teknolojik gelişme sağlamıştır. Çinko (Zn), kütle numarası 65,409 g/mol, atom numarası 30, yoğunluğu $7,14 \text{ g/cm}^3$, ergime noktası $419,53^\circ\text{C}$, kaynama noktası 907°C ve sertliği 2,5 olan mavimsi-açık gri bir metaldir. Çinkonun 50'den fazla minerali bilinmektedir. Çinko üretimine en büyük katkıyı sağlayan en önemli minerali sfalerittir. Bunun dışında ticari değer taşıyan çinko mineralleri smitsonit, zinkit, villemite, franklinite ve hemimorfittir. Çinko kullanım açısından demir dışı metaller içerisinde alüminyum ve bakırdan sonra gelen en önemli üç metalden birisidir. Kimyasal yönden aktif olması ve diğer metallerle kolayca alaşım yapabilmesi nedeniyle çinko, endüstride birçok alaşımın ve bileşiğin üretiminde kullanılmaktadır. Kuvvetli elektropozitif özelliğinden dolayı diğer metallerin özellikle demir-çelik ürünlerinin aşınmaya karşı korunmasında kullanılmaktadır. Üretilen çinko metalinin ana ürün olarak

tüketildiği belli başlı beş alan bulunmaktadır. Bunlar; galvanizleme, pres döküm alaşımları, pirinç ve bronz alaşımları, çinko oksit ve haddelenmiş çinko alaşımlarıdır (DPT, 2001; Aykaç, 2006; MTA-4, 2021; USGS-2, 2021).

M.Ö. 9000'lerin sonlarına doğru insanoğlunun tanıştığı ilk metallere olan bakır, uygarlığın gelişmesinde oldukça önemli bir role sahip olmuş ve insanlığın Taş Devri'nden Tunç Devri'ne geçişi için zemin hazırlamıştır. Geçmişten günümüze kadar insanlığın en yaygın olarak kullandığı metallere biri olan bakır, medeniyetin başlangıcından itibaren toplumun sürdürülebilirliği ve gelişimine oldukça önemli katkılar sağlamış; teknolojinin de ilerlemesiyle birlikte günümüzde bakıra olan ihtiyaç artmış ve en çok kullanılan ikinci metal durumuna gelmiştir. Anadolu'da M.Ö. 9000-8000 yıllarına tarihlenen Çayönü/Diyarbakır, Hallan Çemi/Batman ve Aşıklı Höyük/Aksaray gibi bölgelerde rastlanan bakır buluntuları dünyanın en eski bakır buluntularıdır. Bakırın insanlık tarihinde kullanılması çok eski çağlarda başlamıştır. M.Ö. 8000'lerden başlayarak bakırın ilk kullanım alanları süs eşyası, silah ve el sanatları yapımıdır. Yaklaşık olarak M.Ö. 5500'de yapılmaya başlanan bakır aletler ve M.Ö. 3000 civarında kalay-bakır alaşımından tunç üretilebilirliğinin keşfi ile Taş Devri'nin sonuna gelinmiş ve Tunç devri başlamıştır (Yalçın, 2016; Ehsani ve Yazıcı, 2016; USGS-3, 2021; USGS-4, 2021; MTA-2, 2021; Bardakçı ve Bardakçı, 2021). Bakır (Cu); kütle numarası 63,546 g/mol, atom numarası 29, yoğunluğu 8,93 gr/cm³, ergime noktası 1083°C, kaynama noktası 2300°C, sertliği 2,5-3 ve elektrik iletme özelliği %99,95 olan metalik bir elementtir. Bakır yer kabuğunda, yüzeyde ve derin sularda farklı konsantrasyonlarda, farklı kimyasal formlarda -ve hatta atmosferin kendisinde eser miktarlarda- bulunmaktadır. Bakırın doğada nabit halde bulunabiliyor oluşunun yanı sıra oksitli, sülfütlü, karbonatlı ya da arsenikli filizler halinde de bulunduğu görülmektedir. Bakır kalkopirit, kalkasit gibi bakır sülfatlar; azurit ve malakit gibi bakır karbonatlar veya kuprit gibi bakır oksitler olarak da oluşum göstermektedir. 170'den fazla bakır içeren mineral biliniyor olsa da bunların ancak 10-15'i ekonomik olarak işletilebilir özelliklere sahiptir. Yeryüzünde en bol bulunan ve ekonomik açıdan en önemli olan bakır minerali kalkopirittir. Kalkopirit %34,6, kalkazin %79,9, kovelit %.66,4, bornit %63,3, malakit %57,5, azurit %55,3 ve kuprit %88,8 bakır oranıyla doğada bulunmaktadır (Tegoni vd., 2014; Helvacıoğlu, 2016; MTA-5, 2021; USGS-3, 2021; Bardakçı ve Bardakçı, 2021). Kolay biçimlenebilirlik, dövülebilirlik, korozyona karşı direnç, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik nedeniyle bakır, tüketilen miktarlar açısından demir ve alüminyumdan sonra üçüncü sırada yer alan önemli bir endüstriyel metal haline gelmiştir. Günümüzde bakır, inşaat sektöründe ve mimaride, enerji üretimi ve iletiminde, elektrik malzemeleri ve

elektronik ürün imalatında, askeri endüstrilerde, endüstriyel makine ve ulaşım araçlarının imalatında kullanılmaktadır. İnşaat sektörü ve bakırın elektriksel kullanımları, toplam bakır kullanımının çoğunluğunu oluşturmaktadır. Eskimiş bakır ürünleri ve imalattan kaynaklı bakır yan ürünleri kolay bir şekilde geri dönüştürülerek bakır arzına önemli oranda katkıda bulunmaktadır. Bakır alaşımları çok çeşitli olup endüstride çeşitli amaçlarda kullanılmaktadır. Hem ekonominin gelişmesi hem de bilim ve teknolojiadaki ilerlemeler nedeniyle dünyada bakır ürünlerine olan talep artmış, gün geçtikçe de artmaya devam edeceği öngörülmektedir (Helvacioğlu, 2016; USGS-3, 2021; USGS-4, 2021; Apua ve Madiba, 2021).

Bu çalışma kapsamında Balıkesir ili Balya ilçesinden alınan tüvenan kurşun-çinko cevherleri ve Kastamonu ili Küre ilçesinden alınan tüvenan bakır cevherleri üzerinde fiziksel özelliklerin saptanması amacıyla nem, yoğunluk ve tane boyut dağılımı analizleri; kimyasal özelliklerinin saptanması amacıyla ICP-OES analizleri; mineralojik özelliklerinin saptanması amacıyla XRD, SEM-EDS, parlak kesit çalışmaları; elektrokinetik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla da pH ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon çalışmalarının ardından Pb-Zn ve Cu numuneleri üzerinde liç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda tane boyutu, katı oranı, liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametreleri denenerek optimum değerler elde edilmiştir. Çözünme kinetiği analizleri kapsamında Pb, Zn ve Cu için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olan deneylerde genel reaksiyon hızını kontrol eden kinetik modelin belirlenmesi amacıyla kimyasal kontrollü model, difüzyon kontrollü model ve film difüzyonu modeli altında olduğu durumlar ayrı ayrı irdelenerek, her bir numune ve her bir asit için uygun kinetik modeller belirlenmiştir. Pb, Zn ve Cu için H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 deneylerinden elde edilmiş olan sonuçlara ilgili kinetik modeller uygulanarak çözünme hızının sıcaklığa bağlı olarak değişimi ortaya konmaya çalışılmıştır. Tane şekil faktörü çalışmaları kapsamında öncelikli olarak tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerinin mikroskop fotoğrafları çekilmiş ve ImageJ programı aracılığıyla ortalama dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerleri belirlenmiştir. Ardından her bir asit ile liç işlemine tabi tutulmuş Pb-Zn ve Cu numunelerinden liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametrelerinin denendiği ve optimum değerlerin belirlendiği deneylere ait liç numunelerinin mikroskop fotoğrafları çekilerek ImageJ programı aracılığı ile ortalama dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerleri belirlenmiştir. Tüvenan numunelerden elde edilmiş olan değerler ile liç numunelerinden elde edilmiş olan değerler karşılaştırılmış ve tane şekillerindeki değişimlerin çözünme kinetiği modelleri üzerine olan etkileri ortaya konmaya çalışılmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. TANE MORFOLOJİSİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Morfoloji, bir nesnenin ayrıntılı ifadesi için genel bir terim olarak kullanılmakta ve şekil ve yüzey dokusu olmak üzere iki ana yönü olduğu düşünülmektedir. Şekil, bir cismin morfolojisinin geniş ve orta ölçekli yönleriyle ilişkili olarak görülürken, yüzey dokusu, cismin ebadına göre küçük ölçekli yüzey özelliklerine atıfta bulunmaktadır. Büyüklük ve şekil dahil olmak üzere tane morfolojisi, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkileyen önemli bir faktördür. Tane halindeki malzemenin doğası ve kaynağı hakkında temel bilgiler genellikle tanelerin biçimi, şekli ve/veya yüzey şeklinden elde edilebilmektedir. Bu tür bilgiler, taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile taneleri inceleyerek kolayca elde edilebilmektedir. Tane halindeki bir malzeme elektron mikroskopuna yerleştirildiğinde, elektronların odaklanmış bir ışını (probu) tarafından bombardıman edilmektedir. Numune birincil elektronların bu akımıyla ısıtıldığında numunedeki atomlar ile çeşitli etkileşimler oluşmaktadır. Sonuç olarak, numuneden çeşitli şekillerde radyasyon salınmakta ve bunlar, algılandığı ve işleme tabi tutulduğu zaman bileşenlerini belirlemek için kullanılmaktadır. Tek tane analizinde (IPA) üç tür en sık kullanılan sinyal şunlardır: ikincil elektronlar, geri saçılan elektronlar ve karakteristik X-ışınları. Numune tarafından üretilen ikincil elektronlar, tane morfolojisini karakterize etmek için rutin olarak kullanılmaktadır. Bu örnek elektronlar, tek, geniş alan derinliği, ikincil elektron görüntüleri (SEI) oluşturmak için kullanılmaktadır. İkincil elektron görüntüleri boyutu 1 mikron (μm) ile 1 milimetre arasında değişen boyutu, şekli ve yüzey topoğrafyası hakkında bilgi sağlamaktadır. Tane morfolojisi IPA’da önemli bir tanımlayıcıdır. Bunun nedeni tane şeklinin sıklıkla bileşimin ve/veya kökeninin bir göstergesi olmasıdır (Lu vd., 2017; CU, 2018; UMU, 2018).

Şekil, sedimanter taneler de dahil tüm nesnelerin temel özelliğidir; ancak ölçülmesi ve tanımlanması en zorlu proseslerden biri olmaya devam etmektedir. Konuyla ilgili geniş bir literatür olmasına rağmen, tane şeklindeki farklı ölçümlerin anlamı ve göreceli değeri ile ilgili yaygın karışıklık devam etmektedir. Farklı araştırmacılar tarafından tanelerin dış geometrik ifadesini tanımlamak için şekil, morfoloji ve form da dahil olmak üzere çeşitli terimler kullanılmıştır. Şekil, bir cismin morfolojisinin geniş ve orta ölçekli yönleriyle ilişkili olarak

kabul edilirken, yüzey dokusu, nesnenin boyutuna göre küçük ölçekli yüzey özelliklerini belirtmektedir. Şeklin birkaç farklı görünümü belirlenebilmesine rağmen; form, yuvarlaklık, düzensizlik ve küresellik olmak üzere dördü özel önem taşımaktadır (Yudhbir ve Abedinzadeh, 1991; Bowman vd., 2001; Uzuntaş, 2007; Blott ve Pye, 2008).

Sneed&Folk'u (1958) takiben, form terimi uzunluk, genişlik ve kalınlık olmak üzere oranlar bazında tanımlanan tane üç doğrusal boyutunun "üç boyutlu karakteristiği"ni tanımlamıştır. Kavramsal olarak, tane yuvarlaklığı formdan bağımsızdır, aynı zamanda köşelerin ve kenarların göreceli yuvarlama veya açısallığıyla (keskinlik) ilişkilidir. Düzensizlik, yine formdan bağımsızdır ve girinti ve çıkıntıların varlığına bağlı olarak, bir nesnenin üç boyutlu ifadesinin düzenli bir gövdeden (eğri veya düz çizgili) sapmasıyla ilgilidir. Küresellik, bir tane şeklinin gerçek bir küreye ne derece yaklaştığına, yani sabit bir eğrilik yarıçapına sahip üç boyutlu bir formun ölçüsüne denir. Küresellik form ve yuvarlaklığa bağlıdır, çünkü mükemmel bir küre eşit uzunluk, genişlik ve kalınlığa sahiptir ve mükemmel şekilde yuvarlatılmıştır (Blott ve Pye, 2008).

Üç boyutlu tane morfolojisinin komple karakterizasyonu, modern bilgisayar kontrollü görüntü işleme teknikleriyle bile karmaşık bir görevdir ve genellikle niceliksel, yarı niceliksel ve nitel tanımlayıcı yöntemlerin bir kombinasyonu gereklidir. Bununla birlikte, açıklaması ve karşılaştırması da dahil olmak üzere birçok pratik amaçla, tane düzleşmesinin derecesinin veya tane uzamasının (form oranlarının) miktarının belirlenmesini içeren, tane biçiminin nispeten basit bir şekilde karakterize edilmesi gereken tek şey olabilmektedir (Zingg, 1935; Krumbein, 1941). Farklı şekillerde tanelerin mühendislik davranışının değerlendirilmesi, nispeten basit biçim tanımlayıcıları, küresellik ve yuvarlaklık/açısallık kavramları kullanılarak da yapılabilmektedir (Lees, 1964-a, b; Janoo, 1998). Bununla birlikte, tanelerin muhtemel taşınma ve çökme davranışlarının tahmini daha karmaşık bir yaklaşım gerektirdiğinden bu amaçla birkaç form faktörü geliştirilmiştir (Wentworth, 1922-a; Krumbein, 1941; Corey, 1949; Folk, 1955; Aschenbrenner, 1956; Sneed ve Folk, 1958; Williams, 1965; Janke, 1966; Dobkins ve Folk, 1970).

2.1.1. Form

Formun tane boyutu miktarının belirlenmesi, bir tane uzunluğu, genişliği ve kalınlığının ölçülmesini gerektirmektedir. D' , D'' ve D''' (Wentworth, 1922-a, b), a, b ve c (Zingg, 1935; Krumbein ve Pettijohn, 1938) ve L, I ve S (Sneed ve Folk, 1958) dahil olmak üzere bu üç

ölçümden bahsedecek birtakım farklı gösterimler kullanılmıştır. Geçmişte her zaman açıkça tanımlanmamasına rağmen, çoğu yazar ortak bir noktada kesişmek zorunda olmamasına rağmen üç boyutun birbirine dik (ortogonal) olması üzerinde anlaşmışlardır (Krumbein, 1941; Flemming, 1965). L'yi en uzun boyuta atamak, I'nın L'ye dik ve en uzun boyutta olması ve S'nin hem L hem de I'ya dik olması standart bir uygulamadır (Krumbein, 1941). Bununla birlikte, bazen L (ve dolayısıyla I ve S)'nin nasıl tanımlanması gerektiği konusunda potansiyel bir belirsizlik vardır. Çoğu yazar öncelikle L boyutunu tespit etmiş ve maksimum "kaliper" boyutu olarak tanımlamış, daha sonra L'ye dikey olan I ve S boyutlarını ölçmüştür (Blott ve Pye, 2008).

Tane boyutuyla L, I ve S boyutlarının ölçülebildiği çeşitli yollar vardır. Çok büyük taneler (aşınmış veya yuvarlak kaya parçaları) söz konusu olduğunda en pratik yol gerilmiş bir bant veya fotoğraf karesi ölçümleridir. Çakıl boyutundaki taneler, kaliperler, cetvel veya fotoğraf karelerini kullanarak doğrudan ölçülebilmektedir. Boyut tahminleri, dijital bir kamera kullanılarak alınan görüntülerle de yapılabilmektedir. Kum ve silt boyutundaki tanelerin L, I ve S boyutları yalnızca pratik olarak bir mikroskop sistemi kullanılarak veya dijital görüntülerle gerçekleştirilen görüntü analizi ile ölçülebilmektedir. Tüm ölçüm yöntemleri bir hata derecesine sahiptir. Kaliperler ve bir cetvel kullanılarak yazarlar tarafından yapılan çakıl taneleri ölçümlerinde, tek bir uygulayıcı tarafından yapılan L, I ve S ölçümlerinin hassasiyetinin tipik olarak %0,5 ile %2,8 aralığında yer aldığı görülmüştür (Tablo 2.1).

S boyutunun ölçümündeki hataların L boyutu için olan hatalardan daha büyük olduğu, daha büyük hataların da daha küçük ve daha düzensiz şekilli tanelerle ilişkili olduğu bulunmuştur. Kesinlik, çoklu uygulayıcı durumlarında, özellikle L boyutunu tanımlama yöntemindeki farklılıklardan dolayı önemli ölçüde kötüleşmektedir (Blott ve Pye, 2008).

L, I ve S boyutları bir tane içerebilen en küçük sanal kutunun yan uzunluklarıyla eşdeğer olarak tanımlandıysa, ölçüm hatası tamamen ortadan kaldırılmasa da azaltılabilmektedir. Bu duruma taneyi göze en küçük yansıyan alanı gösterecek şekilde yönlendirerek, yani I ve S boyutlarının bir kombinasyonu olarak ulaşılmaktadır. L daha sonra I ve S'ye dik bir yönde ölçülmektedir. Bu yöntem aslında Krumbein (1941) tarafından önerilenin tersidir, ancak Şekil 2.1'de gösterilen komplikasyonları önlemekte ve herhangi bir şekle sahip tanelere uygulanabilmektedir (Blott ve Pye, 2008).

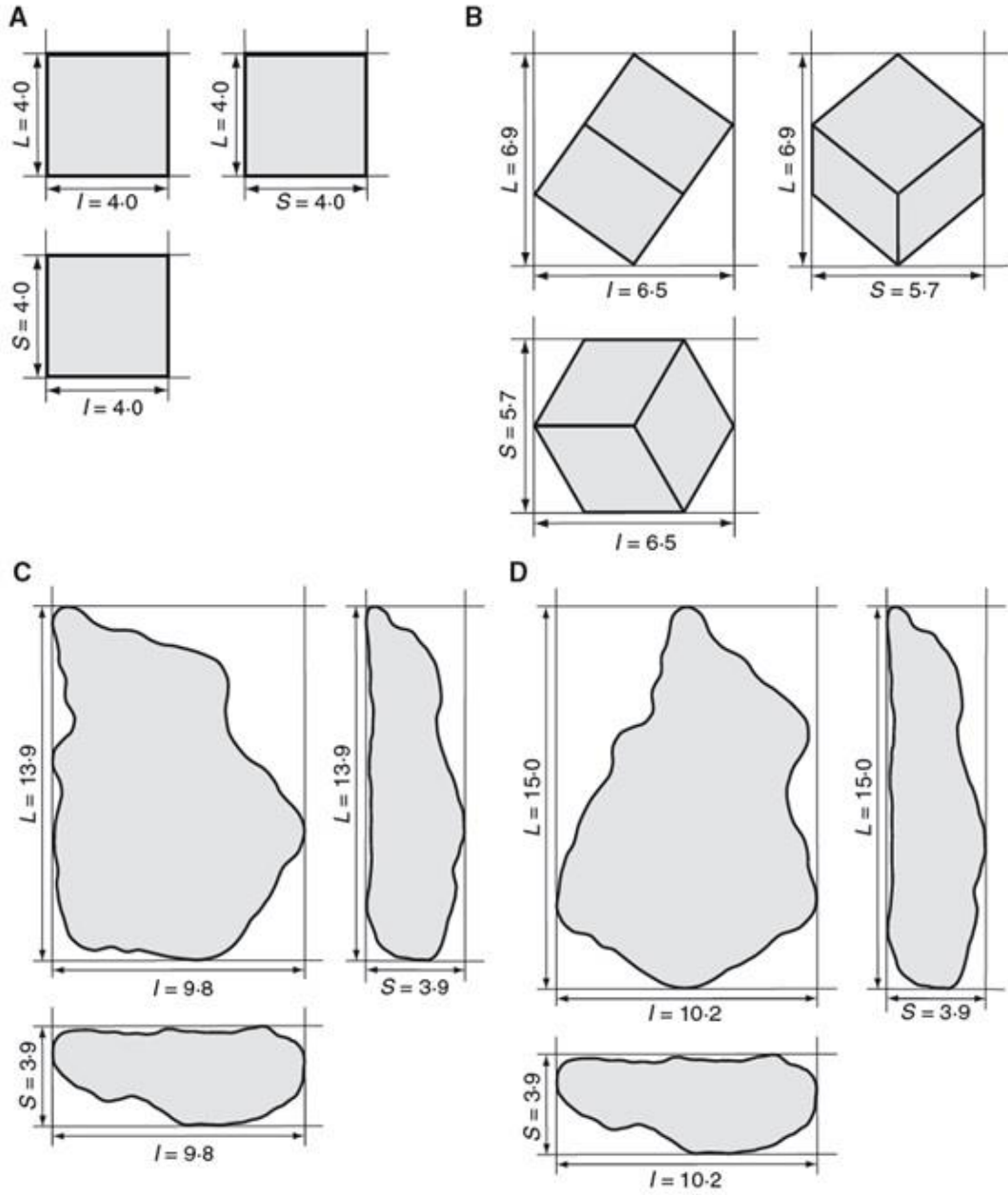
Tablo 2. 1: Üç farklı uygulayıcı tarafından üç kez yapılan 23 doğal çakıl boyutlu tanelerin L, I ve S ölçümlerinin kesinliği (değişimin yüzde katsayısı) ve hesaplanan form oranlarının toplam kesinliği (Blott ve Pye, 2008).

Tane	Uygulayıcı 1 (n=3)			Uygulayıcı 2 (n=3)			Uygulayıcı 3 (n=3)			Toplam Kesinlik (n=9)					
	L	I	S	L	I	S	L	I	S	L	I	S	I/L	S/I	S/L
A	0,0	0,0	2,1	0,6	0,0	0,0	1,3	2,0	2,4	1,3	1,8	2,2	0,7	2,7	2,5
B	2,7	2,3	0,0	0,8	2,1	2,2	1,5	2,2	0,0	2,1	5,4	4,9	4,5	2,6	4,0
C	1,4	3,2	5,1	0,0	3,0	2,4	0,0	0,0	0,0	2,0	3,5	4,2	2,3	2,3	2,6
D	0,0	1,5	2,0	2,2	0,0	0,0	2,3	0,0	2,0	2,0	1,1	3,2	1,9	3,1	2,5
E	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	2,8	2,9	0,0	1,7	2,7	4,1	2,6	4,1	4,7
F	0,6	2,2	4,5	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	2,9	0,9	2,2	3,8	2,5	4,4	3,3
G	3,8	2,0	1,7	0,0	2,0	2,9	0,0	0,0	1,7	2,0	1,9	2,5	2,9	3,0	3,2
H	1,7	0,0	9,1	0,0	0,0	6,9	0,0	3,7	15,7	2,5	3,4	15,2	2,2	13,9	13,6
I	2,2	0,7	0,7	0,6	2,6	1,4	1,3	1,3	3,6	2,0	2,0	2,8	2,3	2,7	3,2
J	0,9	9,3	0,9	0,0	0,6	1,5	0,0	0,0	0,0	1,1	5,2	1,8	6,2	5,2	1,4
K	0,9	0,6	0,0	0,5	0,6	0,0	0,0	1,3	1,9	0,7	1,0	3,2	0,8	2,8	2,8
L	0,3	1,0	4,9	0,6	0,5	2,0	0,0	0,8	5,6	0,6	0,9	15,4	0,8	15,1	15,2
M	6,8	4,0	7,1	0,5	3,3	8,9	2,2	9,8	0,0	4,1	7,8	20,1	6,9	15,0	19,8
N	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	1,5	0,0	0,6	1,3	4,7	0,8	4,2	4,2
O	0,0	1,1	3,1	1,9	1,7	1,0	2,9	5,0	4,8	4,7	5,7	13,2	1,6	9,2	9,4
P	0,5	0,0	3,0	0,3	1,9	1,4	0,6	0,9	4,6	0,8	3,3	4,8	2,6	6,4	5,1
Q	3,8	2,1	8,3	0,0	1,0	2,8	0,0	2,0	2,8	2,0	1,9	6,7	2,6	6,6	8,0
R	1,4	2,2	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	5,4	0,7	5,3	8,4	5,6	5,7	8,7
S	1,0	1,1	1,8	0,0	0,0	0,8	0,5	1,1	2,9	1,0	2,2	2,9	1,4	1,7	2,5
T	1,4	0,0	5,6	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7	7,7	1,0	7,5	7,6
U	2,1	0,0	1,4	0,6	1,3	0,0	0,0	1,3	1,3	2,4	2,5	3,1	1,6	1,6	2,0
V	1,9	0,0	6,2	0,6	0,9	3,7	0,0	6,4	2,4	1,2	5,5	5,9	5,7	9,2	5,5
W	0,8	6,6	2,4	1,3	2,0	3,2	0,8	2,9	4,9	1,5	5,1	4,9	4,6	5,4	4,4
Ortalama	1,5	1,8	3,3	0,5	1,2	1,9	0,7	2,2	2,8	1,7	3,2	6,3	2,8	5,9	5,9

Wentworth (1922-a), form oranları ve form diyagramlarının üç eksenel boyutun bir kombinasyonunu kullanarak tane formunu ölçmeye yönelik ilk girişimlerden birini yapmıştır. $(D' + D'') / 2D'''$ veya L, I ve S gösterimini $((L + I) / 2S)$ kullanarak tanımlanan bir düzlük endeksi geliştirmiştir. Formül Cailleux (1945) tarafından kabul edilmiş ve Cailleux Düzlük Endeksi olarak anılmıştır.

Zingg (1935), iki değişkenli bir diyagram üzerinde genişlik (b/a veya I/L) ve kalınlık (c/b veya S/I) oranlarını çizen ve dört şekil sınıfını tanımlamak için 2:3 oran değerlerini kullanan ilk araştırmacı olmuştur. İsviçre-Almancası terminolojisi başlangıçta bu sınıflamaları kaba bir şekilde “düz”, “küresel”, “düz ve dikey” ve “dikey” olarak isimlendirmiştir. Sınıflamalar Krumbein&Pettijohn (1938) ve Krumbein (1941) tarafından “disk şekilli”, “küresel”, “bıçaksı” ve “çubuksu” olarak yeniden adlandırılmıştır. Diğer form sınıfı terimleri sonradan

diğer yazarlar tarafından kullanılmıştır (Lees, 1964-a, b; Williams, 1965; Allen, 1985; Benn ve Ballantyne, 1993; Janoo, 1998; Oakey vd, 2005).



Şekil 2. 1: L, I ve S ölçümü için alternatif protokoller (A) Yan uzunluklara L, I ve S atanan bir küp¹

¹Böylece I ve S en küçük öngörülen alanı belirtmektedir; (B) Karşı köşelerden en uzun boyut olarak belirtilmiş L, I, L'ye dik en uzun boyut ve S hem I hem de L'ye dik olarak oluşturulmuş bir küp; (C) I ve S'nin en küçük yansıyan alanını belirtmeyi sağlayacak şekilde yönlendirilmiş düzensiz bir tane ve L her ikisine de dik; (D) aynı tanede en uzun boyut olarak belirlenmiş L. Bu durumda L, I ve S, tane içerebilecek en küçük kutuyla çakışmamaktadır.

Sneed&Folk (1958) Zingg şemasını, form varyasyon alanını çok eşit olmayan bölünmüş yalnızca dört form sınıfından dolayı yetersiz bulmuştur. Çubukların az temsil edildiğini ve bıçakları aşırı temsil ettiğini ileri sürmüşler ve boyutsal varyasyon sistemini üç son-üyenin sınırladığını öne sürmüşlerdir: bir uzun ve iki kısa eksenli ($L > I = S$) yayvan bir sferoid (küremsi cisim), iki uzun ve bir kısa eksenli ($L = I > S$) kutupları yassılaştırmış sferoid ve tüm eksenler eşit olan bir küre ($L = I = S$). Sneed&Folk, üç eksenin eşit olmadığı (yani $L > I > S$) dördüncü olası durumu dikkate almamıştır. Bu gibi formların I/L ve S/I değerleri düşüktür ve Zingg diyagramının keskin köşelerinde bulunmaktadır.

Sneed&Folk (1958), “Üçlü değişen sistemleri analiz etmek için en tatmin edici cihazın üçgen biçimi” olduğu sonucuna varmıştır. Bununla birlikte, I/L , S/I ve S/L toplamı 1,0 olmadığından oranlar, üçgen diyagramın kenarlarında geleneksel yolla çizilememektedir. Bunun yerine, üçgenin sol tarafına S/L ve üst köşeden radyal olarak da $(L-I)/(L-S)$ çizmeyi tercih etmişlerdir. Daha sonra üçgen, S/L oranının (0,3, 0,5 ve 0,7) üç bölümüyle ve $(L-I)/(L-S)$ parametresinin iki bölümüyle (0,33 ve 0,67) 10 alana bölünmüştür. Tanımlayıcı terimler sonradan tanımlanan 10 form sınıfının her birine atanmış; üçgen diyagramın üstünde eşit boyutlu formlar için kompakt terimi kullanılmıştır. Diğer yazarlar küresel (Illenberger, 1992; Benn ve Ballantyne, 1993) veya bloklu (Evans ve Benn, 2004) terimlerini kullanmışlardır; ancak bu terimler küresellik ve yuvarlaklık gibi şekillerin diğer yönleriyle karıştırılmamalıdır. Teller (1976)’ı takiben, eşitlik terimi burada küresellik veya yuvarlaklığın derecesine bakılmaksızın eşit boyutlu taneleri tanımlamak için tercih edilmektedir.

Üçgen diyagramın sol köşesine yakın biçimler Sneed&Folk (1958) tarafından yassı olarak adlandırılmıştır; ancak alternatif olarak diğer yazarlar tarafından levhamsı (Benn, 2004), disk şeklinde (Illenberger, 1992) veya basık (Benn ve Ballantyne, 1993) olarak atıfta bulunulmuştur. Yine dairesellik, küreselleşme veya yuvarlaklıktan kaçınmak için, burada non-spesifik bir terim olan levhamsı tercih edilmektedir. Diyagramın sağ köşesinde, tek boyutlu bir çizgiye yaklaşan formlar, Sneed&Folk (1958) tarafından uzatılmış olarak adlandırılmıştır; ancak aynı zamanda çubuksu (Krumbein, 1941) veya yayvan (Benn ve Ballantyne, 1993) olarak da adlandırılmıştır. Burada uzatılmış terimi tercih edilmektedir. Diyagramın ortasındaki ara formlar, Sneed&Folk (1958) tarafından yuvarlaklık veya küresellik anlamı taşımayan ve bu yönden tatmin edici bir terim olan bıçaksı olarak tanımlanmaktadır.

2.1.1.1. Form faktörleri

Sediment tanelerin hidrolik davranışını öngörmek için birtakım şekil faktörleri önerilmiştir (Tablo 2.2) (Wentworth, 1922-a; Krumbein, 1941; Corey, 1949; Aschenbrenner, 1956; Sneed ve Folk, 1958; Williams, 1965; Janke, 1966; Dobkins ve Folk, 1970). Bu parametrelerin bazıları sistematik olarak olmasa da daha önce grafiksel ve istatistiksel yöntemler kullanılarak karşılaştırılmıştır (Briggs vd., 1962; Barrett, 1980; Illenberger, 1991; Benn ve Ballantyne, 1993). Karşılıklı fonksiyonları göz ardı ederek, I/L, S/L ve S/I olmak üzere üç adet birinci mertebeden eksenel boyut oranlarından üç adet ikinci mertebe endeksi türetilabilmektedir:

$$\frac{S}{I} \times \frac{S}{L} = \frac{S^2}{IL}, \text{ düzlük ve eşitlik birleştirilmiş;} \quad (2.1)$$

$$\frac{I}{L} \times \frac{S}{L} = \frac{SI}{L^2}, \text{ uzanım ve eşitlik birleştirilmiş;} \quad (2.2)$$

$$\frac{I}{S} \times \frac{I}{L} = \frac{I^2}{SL}, \text{ düzlük ve uzanım birleştirilmiş.} \quad (2.3)$$

Bazı araştırmacılar tarafından diğer form şemaları önerilmiştir. Illenberger (1991), Corey şekil faktörü ve Disk-Çubuk İndeksi kullanılarak ölçeklendirilmiş bir üçgen diyagram kullanmayı önermiştir, ancak bu da şekil sürekliliğinde bozulmaya neden olmuştur. Hofmann (1994), üçgeni % L, % I ve % S kullanarak ölçeklendirmeyi önermiştir; ancak bu yöntemi kullanırken formlar yalnızca dağılımın düzensiz olarak yayılmış olduğu diyagramın altıda birinde oluşabilmiştir.

Tablo 2. 2: Sık kullanılan şekil faktörleri (Blott ve Pye, 2008).

İndeks	Formül	Aralık	Referans
Wentworth düzlük indeksi	$\frac{L + I}{2S}$	1'den ∞'a	Wentworth (1922-a)
Krumbein küresellik sınırı, Ψ	$\sqrt[3]{\frac{IS}{L^2}}$	0'dan 1'e	Krumbein (1941), Pye&Pye (1943)
Corey şekil faktörü	$\frac{S}{\sqrt{LI}}$	0'dan 1'e	Corey (1949)
Maksimum izdüşüm küresellik, Ψp	$\sqrt[3]{\frac{S^2}{LI}}$	0'dan 1'e	Folk (1955), Sneed&Folk (1958)
Aschenbrenner temel küresellik, Ψ'	$\frac{12.8\sqrt[3]{P^2Q}}{1 + P(1 + Q) + 6\sqrt{1 + P^2(1 + Q^2)}}$	0'dan 1'e	Aschenbrenner (1956)

	$(P = \frac{S}{I} \text{ ve } Q = \frac{I}{L})$		
Aschenbrenner şekil faktörü, F	$\frac{LS}{I^2}$	0'dan ∞ 'a	Aschenbrenner (1956)
Williams şekil faktörü, W	$1 - \frac{LS}{I^2}, I^2 > LS$ $\frac{I^2}{LS} - 1, I^2 < LS$	-1'den +1'e	Williams (1965)
Janke form faktörü, E	$\frac{S}{\sqrt{\frac{L^2 + I^2 + S^2}{3}}}$	0'dan 1'e	Janke (1966)
Yassı-yayvan indeksi	$\frac{10(\frac{L-I}{L-S} - 0.5)}{\frac{S}{L}}$	$-\infty$ 'dan $+\infty$ 'a	Dobkins&Folk (1970)

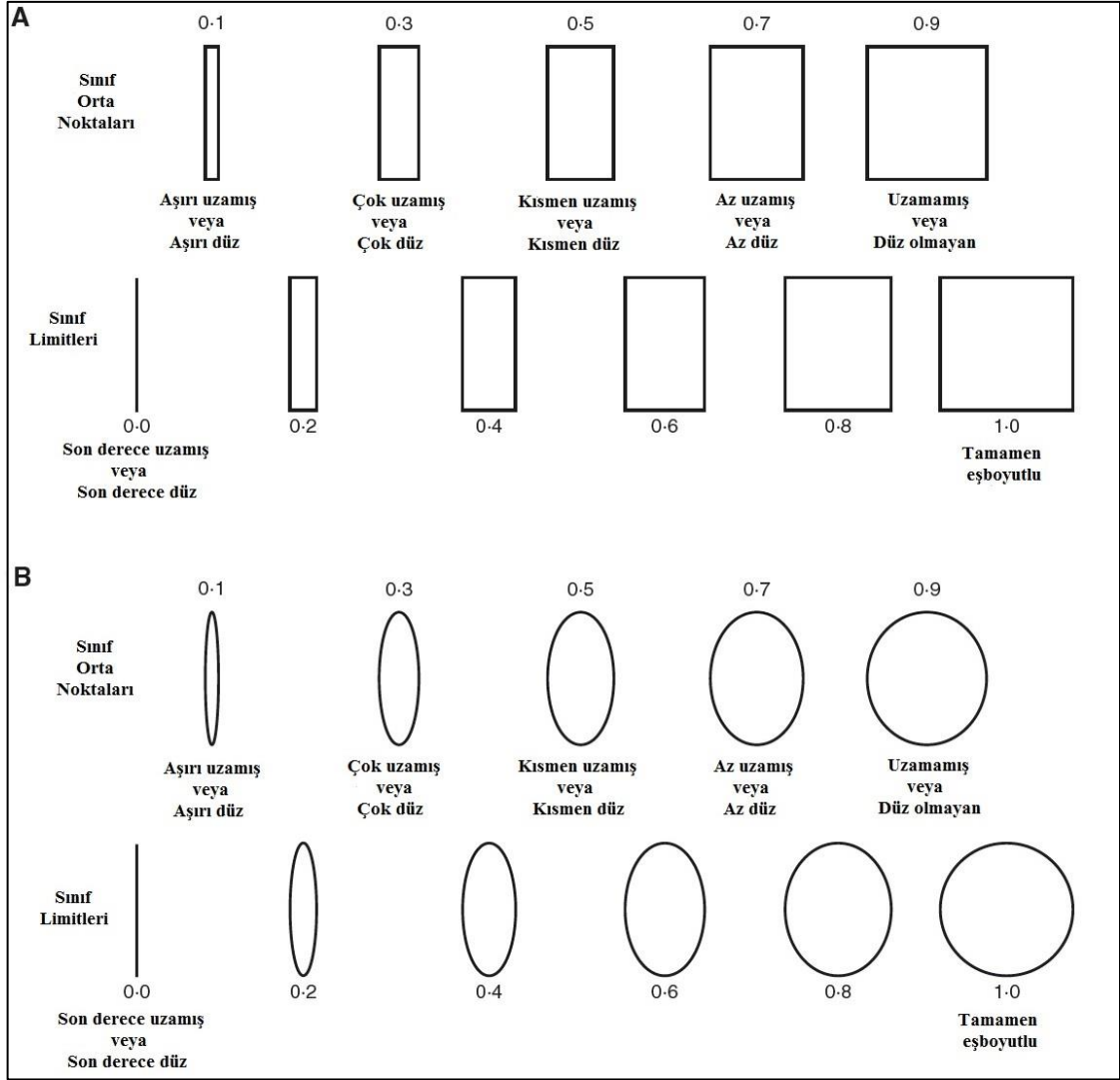
Tablo 2. 3: Uzama derecesine (I/L) ve düzgünlüğüne (S/I) dayalı tane biçimi için önerilen sınıflandırma terminolojisi (Blott ve Pye, 2008).

Uzanim			Düzlük		
I/L	Sınıflama	Terim	S/I	Sınıflama	Terim
0,0-0,2	5	Aşırı uzamış	0,2-0,0	5	Aşırı düz
0,2-0,4	4	Çok uzamış	0,4-0,2	4	Çok düz
0,4-0,6	3	Kısmen uzamış	0,6-0,4	3	Kısmen düz
0,6-0,8	2	Az uzamış	0,8-0,6	2	Az düz
0,8-1,0	1	Uzamamış	1,0-0,8	1	Düz olmayan

2.1.1.2. Alternatif bir form sınıflandırma yöntemi

Rutin tane formunun tanımı ve karşılaştırılması amacıyla, türetilmiş form faktörlerinin hesaplanmasında genel olarak çok fazla avantaj bulunmamaktadır. Tane formu eşitlikten sapma bakımından uzanım ve düzlük (sırasıyla, I/L oranı ve S/I oranı ile) olarak sadece iki açıdan tanımlanabilmektedir. Uzama ve düzlük derecesi, Tablo 2.2 ve Şekil 2.2'de gösterildiği gibi 0,2 aralıklarla beş eşit sınıfa ayrılabilen ve sözlü tanımlayıcı terimler uygulanmaktadır. Sneed&Folk (1958) ve Zingg (1935) diyagramları bu yeni sınıflandırmayı gösterecek şekilde değiştirilebilmektedir. Eşitlik derecesi, düzlük ve uzanım kombinasyonu ve S/L oranı ile tanımlanmaktadır:

$$\frac{S}{I} \times \frac{I}{L} = \frac{SI}{IL} = \frac{S}{L} \quad (2.4)$$



Şekil 2. 2: Tablo 2.2’de önerilen sınıflandırma şemasına dayanan, tane uzanım ve/veya düzlüğünün tahmini için (A) dikdörtgen ve (B) elips örneklerini kullanarak bilgisayar tarafından üretilen görsel karşılaştırıcı (Blott ve Pye, 2008).

2.1.2. Yuvarlaklık ve Köşelilik

Bazı araştırmacılar, köşeliliği yuvarlaklığın tersi olarak kabul etseler de diğer araştırmacılar bu terimleri şekil tanımının farklı kavramlarını tanımlamak için kullanmışlardır ve bu nedenle terimler ayrı olarak düşünülmüştür:

2.1.2.1. Kenar ve köşe yuvarlaklığı

Çoğu araştırmacı bir tanenin genel hatlarının daireselliğe yaklaşma derecesinden (veya üç boyutlu küresellik) ziyade yuvarlaklığın bir tanenin köşelerinin ve kenarlarının göreceli keskinliğini ifade etmesi gerektiğini kabul etmiştir (Wadell, 1932; Pryor, 1971; Pettijohn vd., 1972). Sedimanter tanelerin yuvarlaklığını ölçmek için ilk girişimlerden biri Wentworth

(1919) tarafından yapılmıştır. Önceki çalışmalarda görsel karşılaştırma ölçekleri kullanarak yuvarlaklık tahminleri yapılmıştır (Mackie, 1897; Dunn, 1911). Wentworth, ‘düzlük’ (daha uygun bir şekilde eşitlik olarak da kabul edilir) ve ‘yuvarlaklık’ olarak yaptığı adlandırmalar arasında açık bir ayrım yapmıştır. Yuvarlaklığın, bir tanenin köşelerinin eğrilik yarıçapına bağlı olduğunu belirtmiştir. Yöntemlerin yalnızca en keskin köşenin veya tüm köşelerin yarıçapının ölçülmesi bakımından değişkenlik gösteriyor olmasına rağmen, diğer yazarlar tarafından tane yuvarlaklığının tanımlanması için önerilen tüm ölçümler (Tablo 2.4) bu kavrama dayanmaktadır. Eğrilik yarıçapı tane boyutunun bir ölçüsü ile orantılı olmalıdır. Bu hususta çeşitli yöntemler tekrar önerilmiştir. Wentworth (1919) tarafından önerilen ölçü, tanenin en dışbükey kısmının (diğer bir ifadeyle en keskin köşe) eğrilik yarıçapının, o nokta boyunca en uzun çapın yarısı kadar olmasıdır (bu mutlaka L ’ye eşit değildir). Bu yöntem aynı zamanda Cailleux (1947) tarafından da kabul edilmiştir. Ölçüm, tane şekliyle bir dereceye kadar etkilenir; çok keskin olan formlar, aynı en keskin köşeli eşit formlardan çok daha düşük bir yuvarlaklık değerine sahiptir. Wentworth (1922-b, c) daha sonra keskin köşenin yarıçapının tanenin ortalama yarıçapına oranını hesaplayarak yöntemi revize etmiştir. Yöntem yaygın olarak kullanılmakta olsa da tek bir köşenin keskinliğinin tanenin tamamını temsil edemeyeceği birçok örnek bulunmaktadır. En keskin köşenin eğrilik çapının tane ağırlığının ara eksenine oranı (Kuenen, 1956) ya da en büyük iç teğet çemberin çapına oranı (Dobkins ve Folk, 1970) gibi çeşitli yöntemler önerilmiştir (Tablo 2.4).

Wadell (1932) bir köşeyi, “Aynı alanın maksimum iç teğet dairesinin eğrilik yarıçapına eşit veya daha düşük bir eğrilik yarıçapı olan bir alanın anahattının her bir parçası” olarak tanımlamıştır ve köşelerin eğrilik yarıçapı maksimum iç teğet dairenin yarıçapına eşit olduğunda maksimum yuvarlaklığa ulaşıldığı sonucuna varmıştır. Bir küre maksimum derecede yuvarlaklığa sahiptir, ancak Wadell tanımını kullanarak, her iki ucunda bir yarım küre ile sonlanan bir silindir aynı maksimum yuvarlaklığa sahip olacaktır denilebilmektedir. Tersine, düzenli bir oniki yüzlü (neredeyse küreseldir) sıfır yuvarlaklığa sahiptir, çünkü yüzler tümüyle bir açı ile karşılanmaktadır.

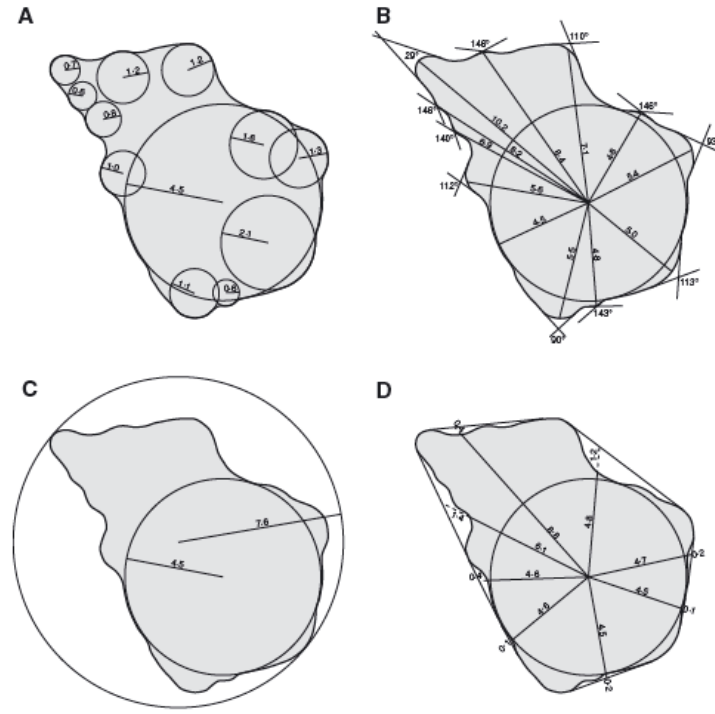
Tablo 2. 4: Sık kullanılan yuvarlaklık indeksleri

Formül	Aralık	Kaynak	Notlar
$\frac{D_k}{L_w}$	0’dan 1’e	Wentworth (1919)	En keskin köşenin eğrilik çapının tanenin uzun eksenine oranı
$\frac{D_k}{(L + I)/2}$	0’dan 1’e	Wentworth (1922-b)	En keskin köşenin eğrilik çapının ortalama tane çapına oranı

$\frac{\sum \frac{D_r}{D_i}}{n} = \frac{(\sum \frac{D_r}{n})}{D_i}$	0'dan 1'e	Wadell (1932) (ilk formül)	Tüm köşelerin eğrilik çapının ortalama en büyük çemberin çapına oranı
$\frac{n}{\sum \frac{D_i}{D_r}}$	0'dan 1'e	Wadell (1932) (ikinci formül)	En büyük çember çapının, tüm köşelerdeki D eğrilik çapına ortalama oranı
$\frac{D_k}{I}$	0'dan 1'e	Kuenen (1956)	En keskin köşenin eğrilik çapının tanenin ara eksenine oranı
$\frac{D_k}{D_i}$	0'dan 1'e	Dobkins&Folk (1970)	En keskin köşenin eğrilik çapının, en büyük çemberin çapına oranı

Wadell (1932, 1933, 1935), köşelerin ortalama eğriliğinin yalnızca en keskin köşeden ziyade bir tanenin dış hattındaki tüm köşelerin yarıçapını ölçerek hesaplanmasını önermiştir (Şekil 2.3). Wadell aydınlık oda görüntülerini 7 cm standart bir boyuta büyütülmüş olarak ölçmüştür. Her bir köşe için eğrilik yarıçapı ve maksimum iç içe daire, çizimin üzerine yerleştirilen şeffaf bir daire ölçeği kullanılarak ölçülmüştür. Wadell, Tablo 2.4'de verilen Yuvarlaklık Derecesi P_d 'nin hesaplanması için iki farklı formül önermiştir. Wadell'in (1935) kendisinin ikinci formülü tercih etmesine rağmen, ayrı köşelerde geniş yuvarlaklık değerleri yelpazesine sahip taneler için biraz daha düşük değerler ürettiğinden, ilk formül sonraki çalışanlar tarafından daha sıklıkla kullanılmıştır.

Köşe yuvarlaklığının belirlenmesi için Wadell yöntemi çok zaman alıcıdır ve sıklıkla, öngörülen tane profilinin köşelerine uyacak şekilde çevrelerin sayısı, konumu ve boyutu ile ilgili belirsizliklerle kuşatılmıştır. Çok keskin köşelerde belirli bir sorun ortaya çıkmaktadır. 7 cm'ye kadar olan taneleri ölçmek için, Wadell (1935) çok küçük olan tüm köşeler için 0,5 mm'lik bir yarıçap kaydetmiştir. Teorik olarak, mükemmel açılara sıfır değeri atanmalı ve n değerinde dikkate alınmalıdır, aksi takdirde hiçbir şekil sıfır yuvarlaklığa sahip olamaz.



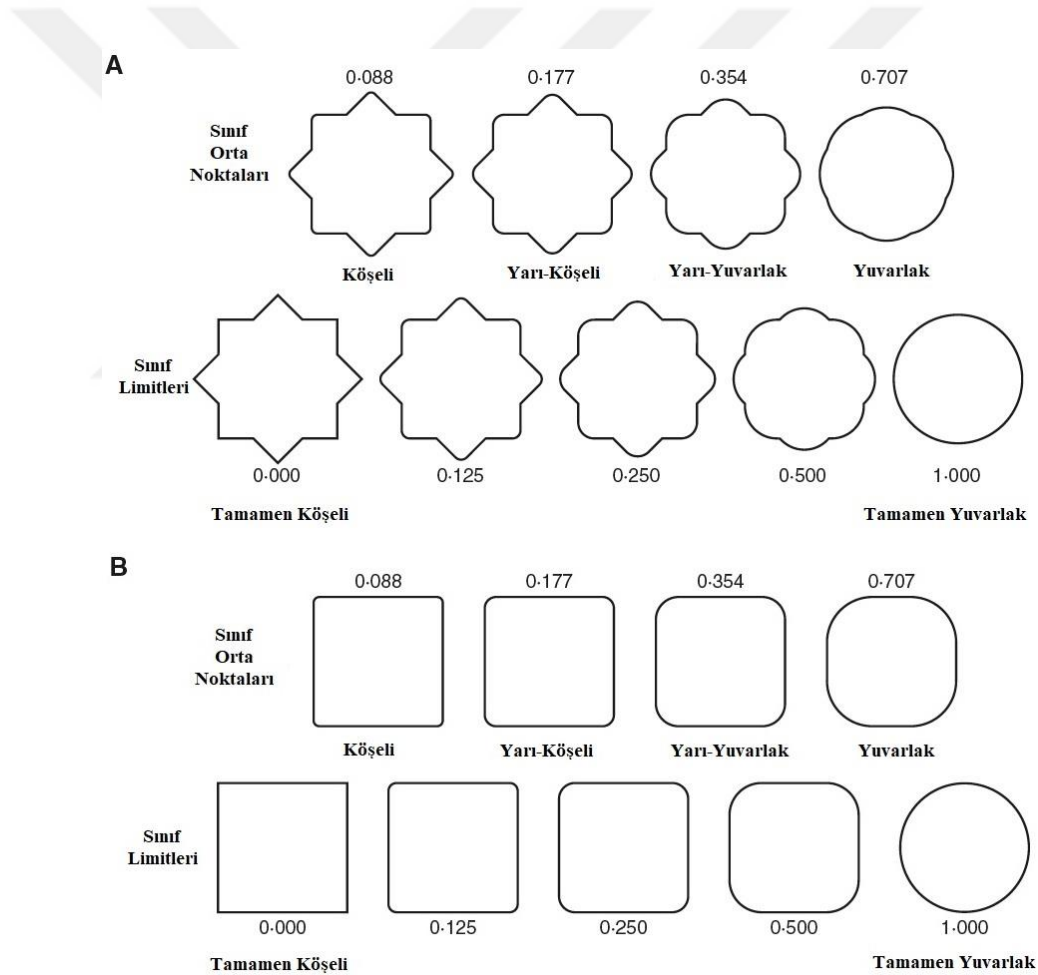
Şekil 2. 3: (A) Tane yuvarlaklığı (Wadell, 1932); (B) açısallık (Lees, 1964-a); (C) dairesellik (Riley, 1941); ve (D) düzensizlik (Blott ve Pye, 2008) tespiti için yapılan ölçümleri gösteren diyagramlar

Bu sistem, yarım yüzyılı aşkın bir süredir, özellikle kum taneleri için yaygın olarak uygulanmıştır. Bununla birlikte, özellikle yüksek ve düşük yuvarlaklık değerleri için belirli bir tane değeri verilmesi gereken yuvarlaklık sınıfını belirlemek zor olabilmekte ve bu da potansiyel olarak önemli işlemci varyasyonuna neden olmaktadır (Folk, 1955). Benn&Ballantyne (1994), tanelerin kenarlarında ve yüzeylerinde görülebilen yıpranma derecesine dayanarak altı sınıf limitini ayırt etmek için tanımlayıcı kriter önermiştir; ancak daha yüksek yuvarlaklık ölçekleri arasındaki farkı tespit etmek halen zordur. Araştırmacıların deneyimlerine de dayanarak, dört “yuvarlaklık” sınıfı, yani açısallık, yarı-açısallık, yarı-yuvarlak ve yuvarlak kullanılırsa, sonuçların daha iyi tekrarlanabilirliği elde edilebilmektedir. Burada, bu dört sınıfın limitlerini 0,5 tabanına göre log skalasına dayalı olarak tanımlayan yeni bir yuvarlaklık sınıflandırma sistemi önerilmiştir (Tablo 2.5). Bu sistem, Powers (1953) tarafından kullanılan 0,7 taban loguna tercih edilmektedir, çünkü birden fazla işlemci ile yapılan denemeler, dört yuvarlaklık sınıfının görsel algılamalarıyla daha iyi oranda eşdeğer olduğunu göstermiştir. Aslında, sınıf sınırları Russell&Taylor (1937) tarafından önerilen orijinal ampirik sınıflamalarla nispeten benzerdir. Bu şemayı kullanarak hem düzenli hem de

düzensiz taneler için iki boyutlu görüntülerin bilgisayar tarafından üretilen bir karşılaştırıcısı tasarlanmıştır (Şekil 2.4).

Tablo 2. 5: Wadell'in (1932) ölçüm yöntemine dayalı alternatif yuvarlaklık sınıflandırma şemaları (Blott ve Pye, 2008).

	Russel&Taylor (1937)		Pettijohn (1949)		Powers (1953)		Blott&Pye (2008)	
	Sınıf Limitleri	Aritmetik Ortalama	Sınıf Limitleri	Geometrik Ortalama	Sınıf Limitleri	Geometrik Ortalama	Sınıf Limitleri	Geometrik Ortalama
Çok Köşeli	-	-	-	-	0,12-0,17	0,14	-	-
Köşeli	0,00-0,15	0,075	0,00-0,15	0,125	0,17-0,25	0,21	0-0,13	0,09
Yarı-Köşeli	0,15-0,30	0,225	0,15-0,25	0,200	0,25-0,35	0,30	0,13-0,25	0,18
Yarı-Yuvarlak	0,30-0,50	0,400	0,25-0,40	0,315	0,35-0,49	0,41	0,25-0,50	0,35
Yuvarlak	0,50-0,70	0,600	0,40-0,60	0,500	0,49-0,70	0,59	0,50-1,00	0,71
Pürüzsüz	0,70-1,00	0,850	0,60-1,00	0,800	0,70-1,00	0,84	-	-



Şekil 2. 4: Tablo 2.5’de önerilen sınıflandırma şemasına dayalı olarak, (A) Sekiz uçlu bir yıldız ve (B) bir kare örnekleri kullanılarak tane yuvarlaklığının kestirimi için bilgisayar tarafından üretilen görsel karşılaştırıcı (Blott ve Pye, 2008).

2.1.2.2. Açısallık (Köşelilik)

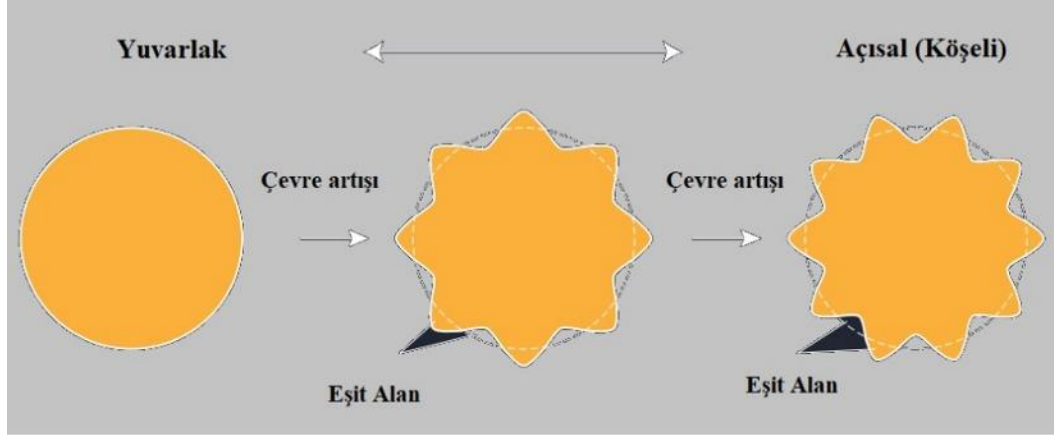
“Açısallık” terimi genellikle basitçe yuvarlaklığın tersi olarak görülse de Lees (1964-a, b), bir köşeyi sınırlayan düzlemler arasındaki açısallık ilişkisini ve en büyük iç teğet daire tarafından tanımlanan tane merkezinden köşenin uzaklığını birleştiren farklı bir kavram olarak kabul etmiştir (Şekil 2.3.-B). Lees herhangi bir köşe için Açısallık Derecesi (A_i) olarak adlandırılan ve aşağıdaki formülü önermiştir:

$$A_i = (180^\circ - a) \frac{x}{r} \quad (2.5)$$

Burada a , köşeyi sınırlayan düzlemler arasındaki ölçülen açı; x , köşenin ucuna maksimum yazılmış dairenin merkezinden olan mesafe ve r dairenin yarıçapıdır. Tane açısallığının toplam derecesi (A), üç ortogonal düzlemde ölçülen tüm köşelerde değerlerin toplamı ile 0’dan 1500’e kadar değişen değerlerle verilmektedir. Hesaplama yöntemi oldukça zaman alıcıdır ve yuvarlak köşeleri sınırlayan düzlemlerin alanına öznel ekstrapolasyon gerektirmektedir. Lees, yönteminin zaman alıcı niteliğini fark etmiş ve görsel bir karşılaştırmacı üretmiştir (Lees, 1964-a). Ne yazık ki, sayısız köşegenlik sınıfları arasında görsel bir ayırım yapmak (özellikle sekiz en küçük açısallık kategoriler arasında) zordur ve tane açısallığı kavramı, genel tane biçiminden (yani tane projeksiyonlarının sayısı ve göreceli büyüklüğü) büyük ölçüde etkilenmektedir.

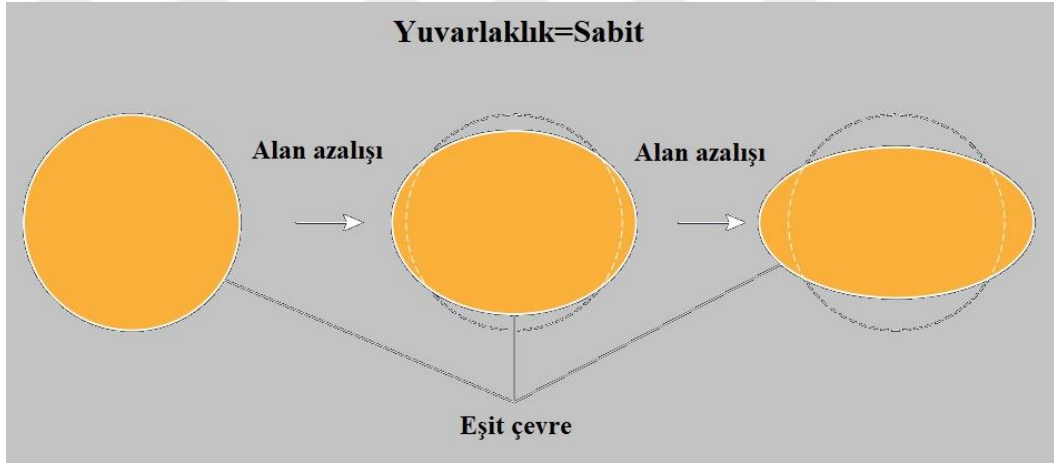
2.1.2.3. Yuvarlaklık için yeni bir parametre

Takashimizu ve Iiyoshi (2016), en-boy oranı ile düzeltilen dairesellik oranını belirtmek için yeni bir yuvarlaklık parametresi R ’yi tanımlamışlardır.



Şekil 2. 5: Çevre uzunluğundaki artış (Takashimizu ve Iiyoshi, 2016)

Burada çevre uzunluğundaki bir artış, tane yuvarlaklığında bir azalmayı temsil etmektedir.



Şekil 2. 6: Dairesellikteki azalma (Takashimizu ve Iiyoshi, 2016)

Burada en-boy oranı artarken dairesellik azalmaktadır.

$$Dairesellik = 4\pi \frac{Alan}{Çevre^2} \quad (2.6)$$

$$R = Dairesellik + (Dairesellik_{kusursuz\ daire} - Dairesellik_{en-boy\ oranı}) \quad (2.7)$$

Dairesellik Denklem 2.6'da tanımlanan değerdir. $Dairesellik_{kusursuz\ daire}$ daireselliğin maksimum değeridir. $Dairesellik_{en-boy\ oranı}$ da sadece en-boy oranı mükemmel bir daireninkinden farklı olduğu dairesellik değeridir.

Takashimizu ve Iiyoshi (2016), ImageJ yazılımını kullanarak tane görüntülerinden bu parametrenin hesaplanmasını göstermişlerdir. Bu yöntem, tane şeklinin parametrelerini türetmek için kolay istatistiksel bir yöntemi temsil etmekte ve önceden yayınlanmış yöntemlerin eksikliklerinin üstesinden gelmeye yardımcı olmaktadır.

2.1.3. Küresellik

Küresellik sık sık form ve yuvarlaklık kavramları ile karıştırılmaktadır. Örneğin, Krumbein (1941), eşit formları (burada $L = I = S$) küre şeklinde tanımlamıştır. Daha önce tartışılan birçok form faktörü küpleri ve küreleri ayırt edemiyor olsa da küresellik (Krumbein'in kesişen küresellik ve Sneed&Folk'un maksimum projeksiyon küresitesi gibi) yaklaşımları olarak kabul edilmiştir. Böylece, bir küp ve düzenli oniki yüzlü aynı denkleğe sahip, ancak oniki yüzlü daha küreseldir. Bu örnek aynı zamanda küresellik kavramının ilişkili olmasına rağmen yuvarlaklıktan farklı olduğunu göstermek için kullanılmaktadır. Düz bir oniki yüzlü, yüksek bir küresellik derecesine sahiptir ancak yüzler bir açıyla buluştuğu için sıfır yuvarlaklığa sahiptir. Doğru bir küre, tüm yönlerde sabit bir eğrilik yarıçapına sahip üç boyutlu kavisli bir formdur ve aynı zamanda mükemmel şekilde yuvarlatılmış olarak da düşünülebilmektedir. Gerçek küresellik derecesi -bir tanenin yüzey alanının eşit hacimde mükemmel bir küreye kıyasla- tam olarak ölçülebilmektedir (Wadell, 1932; Wentworth, 1933). Küresellik ölçüsü, mükemmel bir küre için 1,00, oniki yüzlü çokgen için 0,91 ve bir küp için 0,81 değerindedir. Bununla birlikte, yüzey alanı doğal tanelerde ölçmek genellikle pratik değildir ve küçük taneler için hacim doğru bir şekilde belirlenememektedir. Sonuç olarak, küreselliği tahmin edebilmek için, iki boyutlu tane projeksiyonu ölçümlerine dayanılarak birkaç alternatif yöntem önerilmiştir. Küreselliği belirlemek için yaygın olarak kullanılan formüller Tablo 2.6'da listelenmiştir.

Tablo 2. 6: Sıklıkla kullanılan dairesellik faktörleri (Blott ve Pye, 2008).

Formül	Aralık	Kaynak	Notlar
$\frac{4A}{\pi(L)^2}$	0'dan 1'e	Pentland (1927)	Tane alanının, tanenin en uzun çapına eşit bir çapa sahip bir daire alanına oranı. Pentland "yuvarlaklık" olarak adlandırmıştır.
$\frac{4\pi A}{P^2}$	0'dan 1'e	Cox (1927)	Tane alanının aynı çevreye sahip bir daire alanına oranı. Cox "yuvarlaklık" olarak adlandırmıştır.
$\frac{4A}{\pi(D_c)^2}$	0'dan 1'e	Tickell (1931)	Tane alanının, çevreleyen en küçük çember alanına oranı. Tickell "yuvarlaklık" olarak adlandırmıştır.

$\frac{c}{C} = \sqrt{\frac{4\pi A}{p^2}}$	0'dan 1'e	Wadell (1933)	Tane ile aynı alana sahip bir daire çevresinin tanenin gerçek çevresine oranı. Cox'un (1927) formülünün karekökü.
$\frac{d_c}{D_c} = \sqrt{\frac{4A}{\pi(D_c)^2}}$	0'dan 1'e	Wadell (1935)	Tane ile aynı alana sahip bir dairenin çapının, çevreleyen en küçük çemberin çapına oranı. Formül ayrıca Wadell'de (1933) farklı bir biçimde verilmiştir.
$\sqrt{\frac{D_i}{D_c}}$	0'dan 1'e	Riley (1941)	En büyük içteğet çemberin çapının, en küçük çemberin çapına olan oranının karekökü. Riley "içteğet daire küreselliği" olarak adlandırmıştır.
$\frac{p^2}{A}$	4π'den ∞'a	Janoo (1998)	Çevre/alan genel oranı

Gösterim, karşılaştırma kolaylığı için standartlaştırılmıştır:

P tane çevresi için kullanılmıştır.

A tane alanı için kullanılmıştır.

D_i içteğet en büyük çemberin çapı için kullanılmıştır.

D_c çevreleyen en küçük çemberin çapı için kullanılmıştır.

Cox (1927), iki boyutlu izdüşüm tane görüntüleri kullanarak küreselliği tahmin etmenin ilk yöntemlerinden birini geliştirmiştir. Cox, tane alanını, çevresi aynı olan bir başka dairenin alanıyla karşılaştırmıştır. Pentland (1927), tane alanını aynı çapa sahip bir dairenin alanıyla karşılaştırarak kısmen farklı bir yöntem kullanmıştır. Her iki araştırmacı da buldukları sonuçları yuvarlaklık ölçütleri olarak kabul etmişlerdir, ancak yukarıda belirtildiği gibi bunlar daha doğru biçimde daireselliğin ölçüleridir. Wadell (1933), taneyle aynı alana sahip bir daire çevresinin tanenin ölçülen çevresine oranına dayanan bir dairesellik ölçüsü olan ϕ 'yı önermiştir. Tickell (1931), tane alanının çevreleyen en küçük çember alanına oranına dayanan benzer bir yöntem önermiştir. Wadell (1933, 1935), izdüşüm küresellik olarak tanımladığı, taneyle aynı alana sahip bir dairenin çapının, çevreleyen en küçük çemberin çapına oranına dayanan benzer bir formül önermiştir. Riley (1941) tarafından önerilmiş daha basit bir ölçüm olan ve ϕ_0 olarak adlandırılan daire küresellik, en büyük içteğet daire çapının en küçük çevrelenmiş daire çapına oranının kareköküdür (Şekil 2.3 C). Bu ölçüm öngörülen tane özetlerini iki boyutta belirlemek için basit ve hızlıdır, aynı zamanda sedimentolojik araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Rittenhouse (1943), hesaplanan Wadell izdüşüm küresellik değerlerinin farklı değerleri olan taneler için standart anahat görüntüleri içeren iki boyutlu bir görsel karşılaştırmacı yayınlamıştır. Bununla birlikte, karşılaştırmacı çok sayıda tane taslağını içerdiğinden tutarlılıkla kullanılması oldukça zordur.

Riley (1941) ölçümü kullanılarak, tane daireselliğine ilişkin yeni bir sınıflandırma şeması beş sınıfla geliştirilmiştir (Tablo 2.7). Sınırlar, uzunlukları ve genişlikleri değişen elipslerin daireselliğin değerleri aralığında eşit şekilde dağıldığı şekilde tanımlanmıştır. (Şekil 2.5). Sınıflandırma, poligonlara eşit derecede uygulanabilmektedir, ancak eşit poligonların farklı maksimum dairesellik değerleri olacaktır.

Tablo 2. 7: Tane daireselliğinde (iki boyutta kullanıldığında) veya tane küresellesitesinde (üç boyutlu uygulandıklarında), Riley (1941) metodu kullanılarak ölçülen, önerilen sınıflandırma şeması

	Sınıf Limitleri	Geometrik Ortalama
Çok yüksek dairesellik/küresellik	0,894-1,000	0,949
Yüksek dairesellik/küresellik	0,775-0,894	0,837
Orta dairesellik/küresellik	0,632-0,775	0,707
Düşük dairesellik/küresellik	0,447-0,632	0,548
Çok düşük dairesellik/küresellik	0,000-0,447	0,316

2.1.4. Düzensizlik

Form ölçümlerinin bir kombinasyonu olan küresellik ve yuvarlaklık çoğunlukla en düzenli şekilli taneleri karakterize etmek için yeterlidir. Bu bağlamda, “normal” terimi, düz kenarlı veya iki veya üç boyutlu sürekli eğri bir anahat gösteren şekilleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Bir tane yüzeyinde önemli ölçüde içbükeylik ve dışbükeylik sergilediğinde düzensiz olarak tanımlanabilmektedir.

Bu niteliği yansıtmak için, tane düzensizliğinin sayı niceliğini, yüzey izdüşümlerini ve girintilerin derinliğine göre iki boyutlu bir tane görüntüsünde görülen konkavlıkları (en büyük yazılı daire çevresinden ölçülür) ve izdüşümlerin uzunluklarını (Şekil 2.3 D’de gösterildiği gibi, dışbükey gövdeden ölçülen ve bir tane taslağındaki maksimum izdüşümleri birbirine bağlayan en kısa mesafedeki çizgi) belirten bir ölçümü geliştirilmiştir. Düzensizlik indeksi I, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$I_{(2D)} = \Sigma \frac{y-x}{y} \quad (2.8)$$

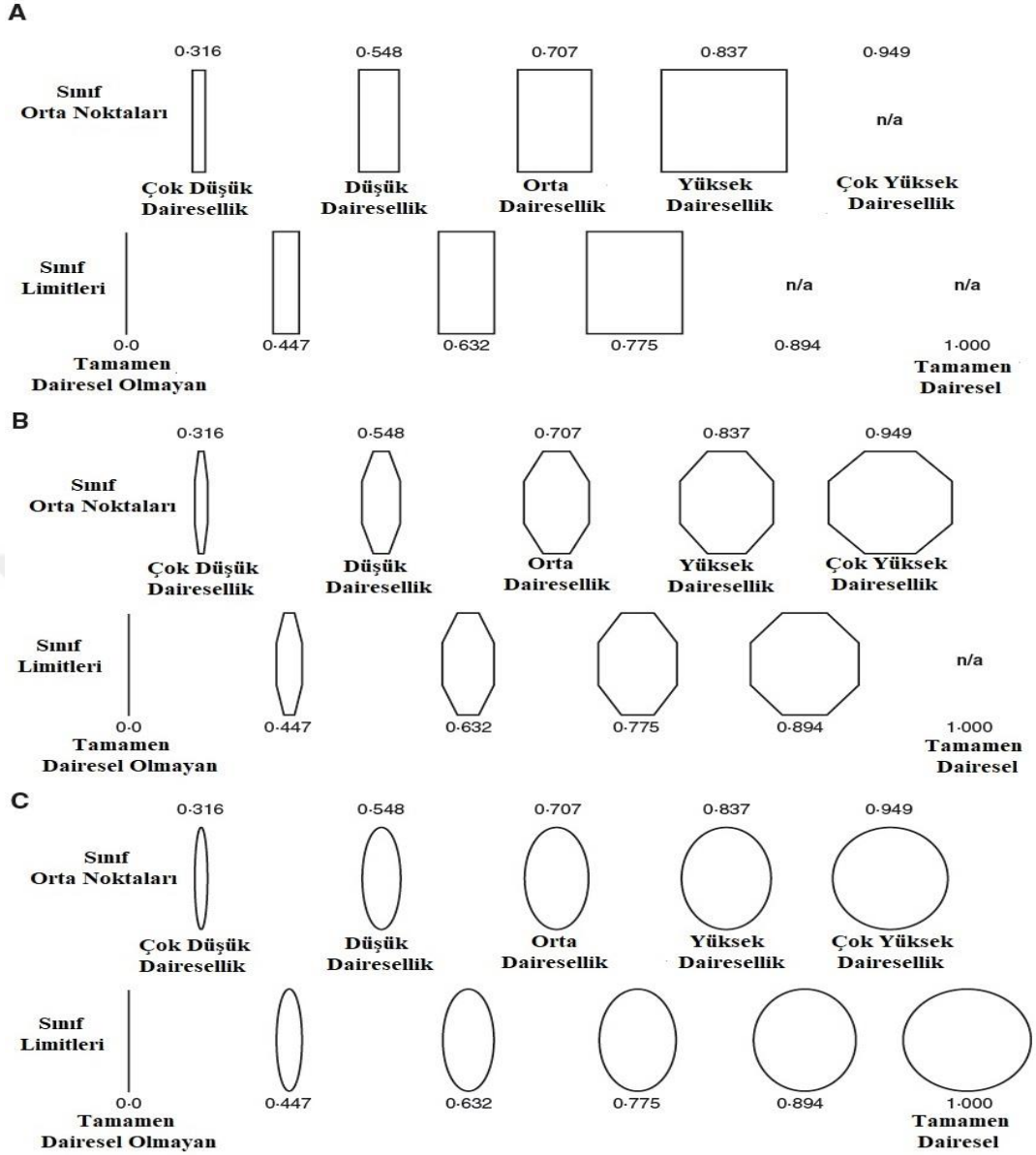
Burada x, en büyük içteğet dairenin merkezinden herhangi bir konkavlığa en yakın noktaya olan uzaklıktır ve y, x ile aynı yönde ölçülen en büyük içteğet dairenin merkezinden konveks gövdeye olan uzaklıktır. Toplam profil düzensizliği derecesi, izdüşüm düzleminde ölçülen tüm içbükeyliklerin toplamı ile gösterilmektedir. Dışbükey gövdenin mesafesinin ölçülmesi

zor olduğunda, y , herhangi bir konkaviteye bitişik olan izdüşümlere olan mesafeyi ölçerek hesaplanabilmektedir:

$$y = \frac{a \cos A + b \cos B}{2} \quad (2.9)$$

Burada a ve b , en büyük içteğet dairenin merkezinden izdüşümün ucuna, konkavlığın her iki yanına olan mesafelerdir ve A ve B , sırasıyla a ile x ve b ile x arasındaki açılardır.





Şekil 2. 7: Tablo 2.7’de önerilen sınıflandırma şemasına dayanılarak tane daireselliğine (iki boyutta) ve küreselliğine (üç boyutlu) ilişkin tahmin için bilgisayar tarafından üretilen görsel karşılaştırıcı² (Blott ve Pye, 2008).

2.1.5. Tane Morfolojisini Kontrol Eden Faktörler

Sedimanter tanelerin morfolojisini iki faktör belirlemektedir. Bunlardan ilki, kaynak kayadan miras alınan ilk morfolojileridir (başlangıç morfolojisi). İkincisi de taşınma esnasında meydana gelen aşınma, kırılma ve ayrılma gibi mekanik değişimlerdir (CU, 2018).

Tanenin başlangıçtaki şekli, kaynağın kaya türü ve ikliminin yanı sıra birleşim ve bölünmeye de bağlıdır. Granit ve kuvarsit gibi masif kayalar sedimanter yaşamlarına neredeyse eşit

² Dairesellik, Riley (1941) tarafından önerilen yöntem kullanılarak hesaplanır. Maksimum dairesellik dereceleri sırasıyla 0,841, 0,961 ve 1,000 olan üç örnek şekil gösterilmektedir: (A) dikdörtgen, (B) sekizgen ve (C) elips.

klastlarla (kırıntılı bir kayanın kurucu parçası) başlamaktadırlar. Buna zıt olarak, kalker ve şeyl gibi ince tabakalı veya yapraklanmış kayalar kıvrımlı veya diskoid çakıllar üretmektedirler (CU, 2018).

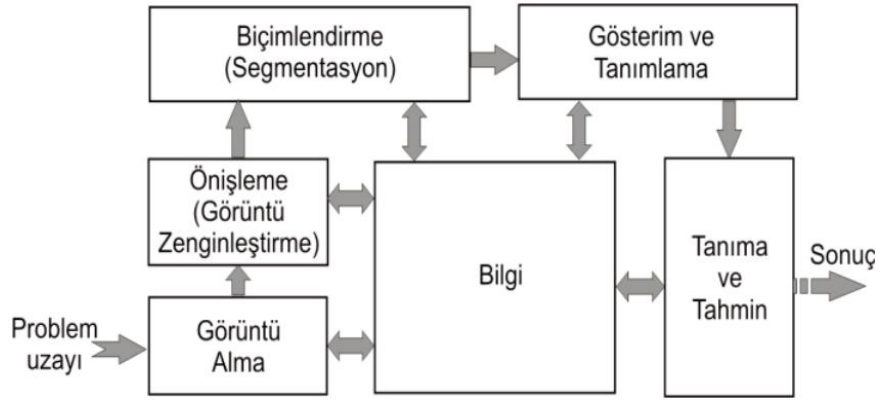
Taşınma esnasında aşınma ve kırma, tane morfolojisini kuvvetli bir şekilde değiştirebilmektedir. Bazı durumlarda, bir tane kütlesi içerisindeki yanal değişim şekil ayrımıyla meydana gelmektedir. Akarsuyla taşınmanın tanenin şekli veya küreselliği üzerinde çok az etkisi vardır. Ancak şekil ve küresellikten farklı olarak, sayısız araştırma akarsuyla taşınma sırasında tane yuvarlaklığının hızla arttığını göstermektedir. Yuvarlaklığın artmasıyla sonuçlanan aşınma oranını etkileyen faktörler, tane büyüklüğü ve bileşiminin yanı sıra taşınma şekli (çekme-uzaklaştırma) ve taşıma aracı (hava-su)'dır (CU, 2018).

2.2. GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ

Görüntü çeşitli yöntemlerle elde edilen bilgilerin $f(x,y)$ şeklinde iki boyutlu bir fonksiyon olarak ifade edilme şeklidir. Bu fonksiyonda x ve y uzay konumunu gösterirken, $f(x,y)$ fonksiyonunun değeri o noktadaki ışıklılık şiddetini göstermektedir. Bir görüntüdeki en küçük birim piksel olarak ifade edilmektedir ve elde edilen görüntünün işlenebilmesi için analog bilgiden dijital bilgiye çevrilmesi yani sayısallaştırılması gerekmektedir. Bu durumda görüntü, satır ve sütunlara bölünmüş ve her bir satır ve sütunun kesişim noktasında (piksel) o noktadaki ışıklılık şiddetine ait değere sahip bir matris formuna dönüşmektedir (Uzuntaş, 2007; Çelik vd., 2012).

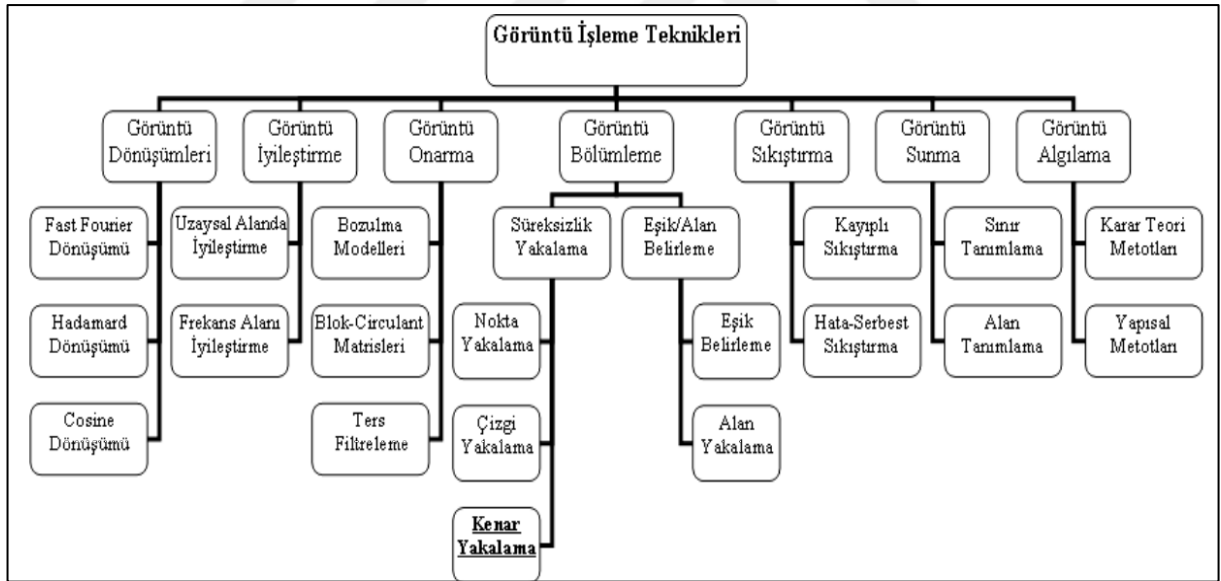
Görüntü işleme, bir sahnenin elektronik olarak yakalanması, iki boyutlu piksel görüntüsüyle sayısallaştırılması ve sahne hakkında resimsel bilgilerin çıkartılabilmesi için işlenen bilgisayarlı bir tekniktir. Görüntü işleme, daha çok kaydedilmiş olan, mevcut görüntüleri işlemek, yani mevcut resim ve grafikleri, değiştirmek, yabancılaştırmak ya da iyileştirmek için kullanılmaktadır. Görüntü analiz sistemi temel olarak; görüntü alma elemanı, görüntü işleme elemanı ve işlenen görüntünün gösterilmesi için kullanılan eleman olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır (Kwan vd., 1999; Çomak vd., 2011; Çelik vd., 2012).

Sayısal görüntü işleme çalışmalarında kullanılan birçok işlem basamakları vardır. En genel haliyle Şekil 2.8'de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 2. 8: Görüntü işleme genel akım şeması (Çomak vd., 2011).

Görüntü; sadece siyah (0 değeri) ve beyaz (1 değeri) renkleri içeren ikili görüntü, gri düzeyli görüntü ve renkli görüntü olarak üçe ayrılmaktadır. Her üç seviyedeki görüntünün sunumu da matris formundadır. Matrisin herhangi bir değeri görüntünün o koordinatlardaki noktanın parlaklık, ısı veya buna benzer farklı niteliklerdeki değeri olabilmektedir (Çomak vd., 2011; Başyigit vd., 2012). Görüntü işleme teknikleri Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2. 9: Görüntü işleme teknikleri (Çomak vd., 2011).

2.2.1. ImageJ Görüntü Analiz Programı

ImageJ, resimlerin görüntülenmesi ve etkileşimli manipülasyonu için hazır araçlar dizisi sunan açık kaynak kodlu bir görüntü işleme programıdır. ImageJ tamamen Java ile üretilmiştir ve bu nedenle Windows, MacOS veya Linux altında herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilir. ImageJ, Wayne Rasband tarafından ABD Ulusal Sağlık Enstitüsü’nde

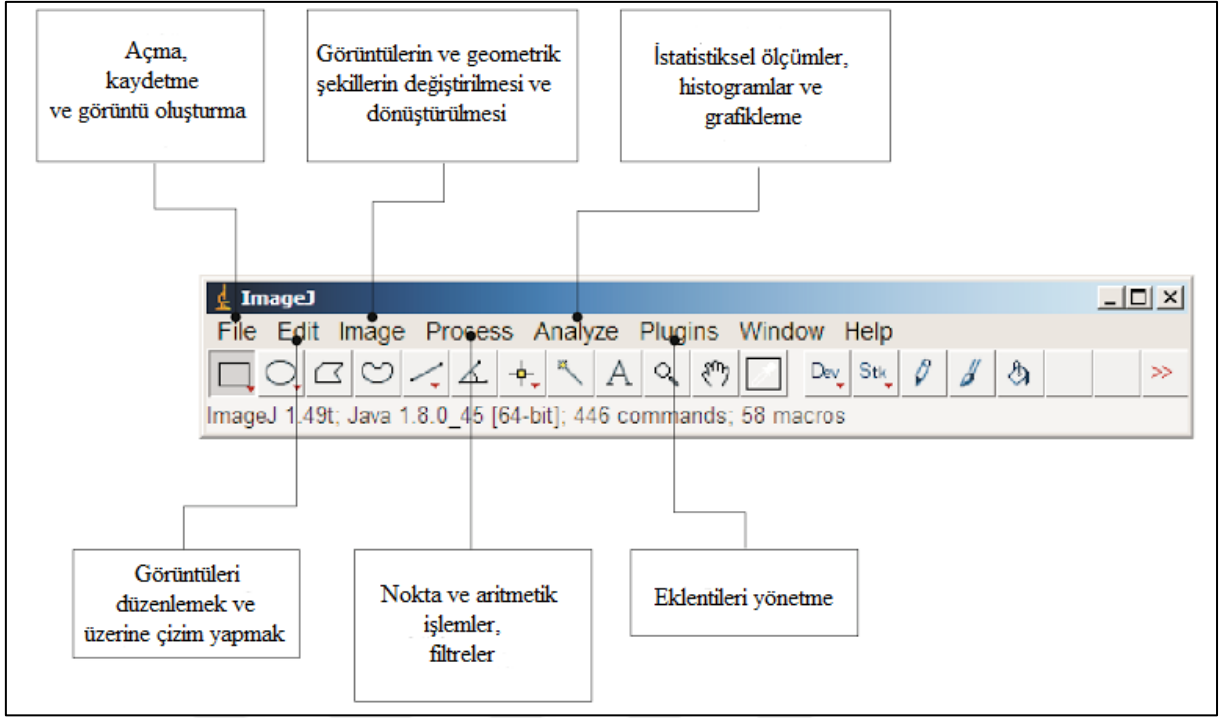
(NIH) geliştirilmiş ve öncülü NIH-Image'in yerini almıştır. ImageJ'nin temel özellikleri şöyledir (Burger ve Burge, 2016, ImageJ, 2018):

- Birçok ortak dosya biçimi desteğiyle, bir dizi kullanıma hazır interaktif araçlar oluşturma, görselleştirme, düzenleme, işleme, analiz etme, yükleme ve depolama.
- Java kod parçalarını yazarak ImageJ'nin çekirdeğini işlevsel olarak genişletmek için basit bir eklenti mekanizması.
- Mevcut işleçleri Java bilgisine sahip olmadan birleştirerek daha büyük işlem bloklarını uygulamayı kolaylaştıran bir makro dil ve ilgili yorumlayıcı (Burger ve Burge, 2016; ImageJ, 2018).

ImageJ programı çalışmaya başladığında, önce aşağıdaki menü girişlerini içeren ana penceresini açmaktadır:

- Dosya: Yeni görüntülerin açılması, kaydedilmesi ve oluşturulması için.
- Düzenle: Görüntüleri düzenlemek ve üzerine çizim yapmak için.
- Görüntü: Görüntülerin ve geometrik şekillerin değiştirilmesi ve dönüştürülmesi için.
- İşlem: Nokta işlemini, filtreler ve çoklu görüntüler arasındaki aritmetik işlemler de dahil olmak üzere görüntü işleme için.
- Analiz: Görüntü verileri, histogramlar ve özel görüntü formatları üzerine istatistiksel ölçümler için.
- Eklenti: Kullanıcı tanımlı eklentileri düzenlemek, derlemek, çalıştırmak ve yönetmek için (Burger ve Burge, 2016; ImageJ, 2018).

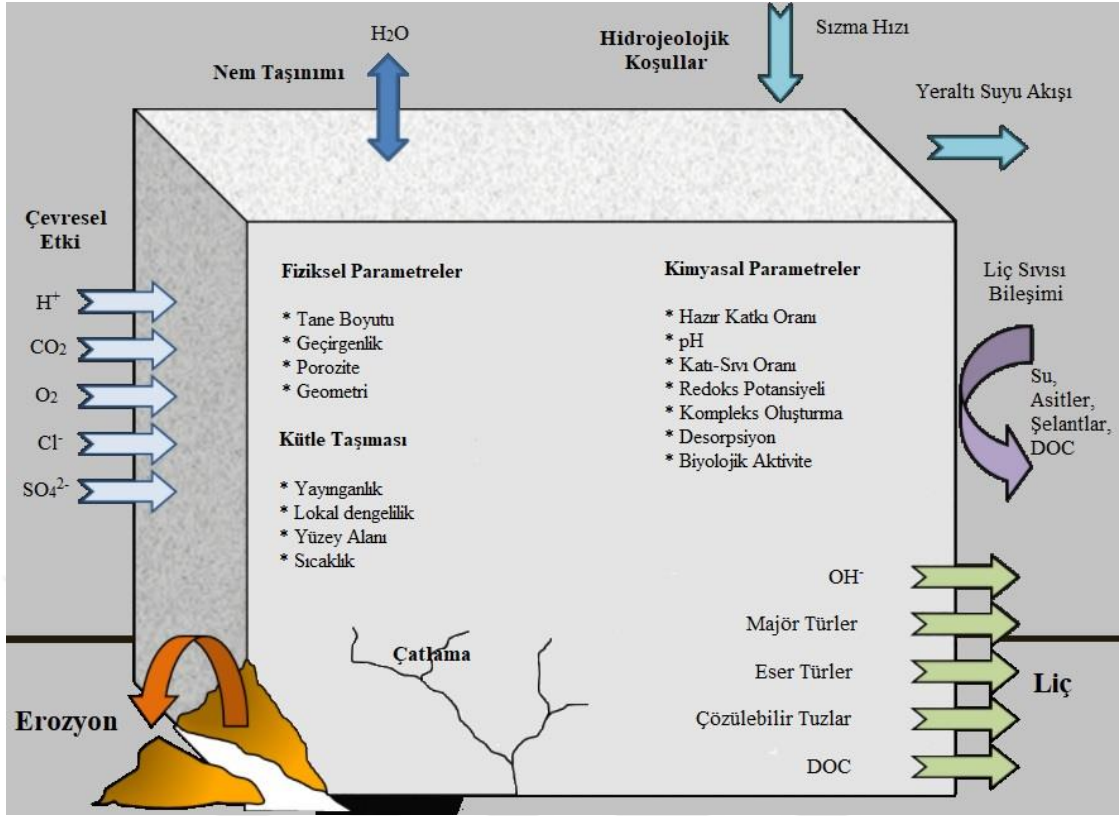
Şekil 2.10'da Windows işletim sistemi için ImageJ ana penceresi verilmiştir.



Şekil 2. 10: Windows işletim sisteminde ImageJ ana penceresi (Burger ve Burge, 2016).

2.3. LİÇ PROSESİ VE ÇÖZÜNME KİNETİĞİ

Liç işlemi genellikle bir mineral karışımın, cevherin veya konsantrenin içermiş olduğu değerli bileşenin temas eden bir su fazına bırakılma sürecidir. Değerli bileşen yönünden düşük tenörlü olan, zenginleştirme işlemleriyle konsantresi zor elde edilebilen, problem teşkil eden veya zenginleştirme işleminin yüksek maliyetli olduğu cevherlere sıkça uygulanan bir prosestir. Liç işlemi önemli bir maden zenginleştirme yöntemidir. Bu yöntemde çözücü özellik gösteren sıvı kimyasallar kullanılarak ekonomik değer arz eden cevherler kazanılmaktadır. Zenginleştirilmek istenilen cevher, kimyasallarla (genelde asit veya baz) çözündürülerek çözeltiliye alınmakta, seçilen kimyasalların türü ve konsantresi, çözündürülmek istenilen cevherin özelliklerine göre değişim göstermektedir. Liç verimi; liç oranı veya miktarını değiştirebilecek pH değişimi, sıcaklık, oksidasyon potansiyeli gibi değişkenlerden etkilenmektedir. Bu faktörler içinde içsel kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar, çevre ortamından kaynaklanan dış basınçlar, erozyon veya kırılmaya bağlı katı matrisin fiziksel olarak bozunması ve liç süreci nedeniyle matris bileşenlerinin kaybı da bulunmaktadır (Okuy, 2013; VU, 2018). Şekil 2.11’de liç işlemini etkileyen fiziksel ve kimyasal faktörler verilmiştir.



Şekil 2. 11: Liç işlemini etkileyen fiziksel ve kimyasal faktörler (VU, 2018)

Liç prosesi, atıkların sulu ya da çözünmüş bileşenlerin kütle taşınımıyla birleşerek katı ve sıvı faz arasında bölüşürülmesini (lokal denge varsayılarak) kapsamaktadır. Kütle taşınımı difüzyon, engellenmiş difüzyon, kıvrımlılık etkileri ve malzemenin gözenek yapısından çevreye etki eden yüzey alanı etkilerinin toplamıdır. Bir maddenin sıvı-katı bölümlenmesini (LSP) etkileyen önemli kimyasal faktörler çözelti pH'ını, redoks, çözünmüş organik maddenin varlığını ve biyolojik aktiviteyi içermektedir. Bağlı hidrolik iletkenlik, gözeneklilik ve dolgu geometrisi gibi fiziksel faktörler, bileşenlerin katı fazdan sıvı faza taşınma oranının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (VU, 2018).

2.3.1. Liç Kinetik Modelleri

Hidrometalurjide, liç proseslerinin çoğu, süreç hakkında bilgi sahibi olmak ve daha sonra karar vermede yardımcı olmak için heterojen katı/sıvı reaksiyonlar için kinetik modelleri izlemektedir. Liç olayı esnasında, katı madde bünyesinde bulunan reaktanlar çözünerek sıvı faza taşınmaktadır. Bu nedenle liç kinetiği incelemeleri esnasında genellikle heterojen faz reaksiyonların değerlendirilmesinde kullanılan kinetik modellere başvurulmaktadır. Burada katının önemli olan özellikleri, katının tane boyutu ve şeklidir. Örnek olarak çok küçük tanelerden oluşan bir katı düşük katı/sıvı oranlarında liçi için ortamı tamamen homojen bir

sıvı gibi kabul etmek ve homojen reaksiyon modelleri uygulamak mümkündür. Fakat bu durum basitleştirme olarak kabul edilmektedir. Yıllar boyunca liç proseslerinde çekirdek modelleri, kinetik modeller, reaksiyon modelleri, termodinamik modeller, ampirik ve yarı ampirik modeller, değişken aktivasyon enerji modelleri, jeokimyasal modeller ve termodinamik modeller olmak üzere çeşitli modeller kullanılmıştır. Liç prosesleri genellikle heterojen faz reaksiyon modelleriyle açıklanmaktadır. Heterojen faz reaksiyonlarının açıklanması için yaygın olarak kullanılan iki temel model vardır. Bunlar, Küçülen Çekirdek Modeli ve Küçülen Partikül Modelidir (Carrillo-Pedroza vd., 2012; Othusitse ve Muzenda, 2015).

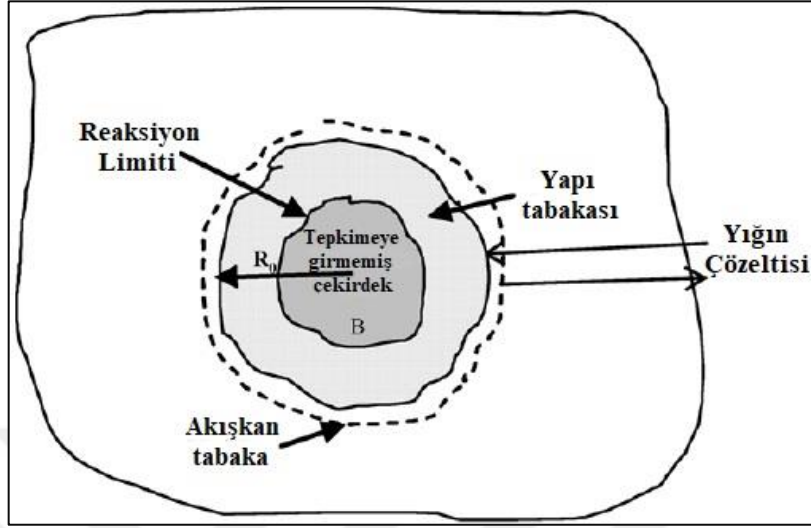
2.3.1.1. Küçülen Çekirdek Modeli

Küçülen çekirdek modeli ilk olarak Yagi ve Kunii (Yagi ve Kunii 1955, Yagi ve Kunii 1961) tarafından, gaz türleri ve katı taneler arasındaki reaksiyonları tanımlamak ve belirli koşullar altında çeşitli fizikokimyasal olayları birleştirmek üzere geliştirilmiştir. Küçülen çekirdek modeli, katı tanelerin çözülme veya reaksiyon ile tüketildiği durumları tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu model, yanan bir kömür tanesinin etrafındaki kül tabakasının oluşumundan katalizör rejenerasyonuna kadar geniş kapsamlı alanlar için geçerlidir (Yagi ve Kunii, 1955; Yagi ve Kunii, 1961; Lan vd., 2015; UM, 2018).

Bir çekirdek küçüldüğünde çekirdek etrafında bir reaksiyon ürünü katmanı veya jel filmi olan iç direnç tabakası oluşmakta ve liç işlemi ekstraksiyon veriminde meydana gelen azalma ile sonuçlanmaktadır. Bununla birlikte, birçok durumda tane boyutu (tepkimemiş çekirdek ve katman dahil) zamanla azalmaktadır. Başka bir deyişle, ürün tabakası çekirdeğin etrafında oluşsa da çekirdek küçülürken o da küçülmektedir (Çalıklı 2007; Safari vd., 2009; Hsu vd., 2009). Şekil 2.12’de küçülen çekirdek modeli gösterilmiştir.

Küçülen çekirdek modelinde zamanla, dönüşen reaktan kesri artarken partikülün boyutunda değişim gözlenmemektedir. Bu modelde reaksiyona giren katı madde bünyesindeki reaktanın yer aldığı çekirdeğin zamanla küçülmesi söz konusuysa, katı bünyesinde yer alan reaksiyona girmemiş veya reaksiyon ürünlerinde bulunduğu poroz tabakanın artan süreyle daha da kalınlaşması söz konusudur. Bundan dolayı kütle transferi için iki faz arasında iki direncin varlığından söz edilmesi mümkündür. Bunlardan biri dışta oluşan tabaka boyunca akışkan reaktanın difüzyonuna gösterilen direnç ve diğeri ise akışkan ile katı maddedeki reaktanın

reaksiyonuna gösterilen dirençtir. Bu kademelerden hangisi en yavaş ise reaksiyonun kinetiğini o belirlemektedir (Carrillo-Pedroza vd., 2012).



Şekil 2. 12: Küçülen çekirdek modeli (Carrillo-Pedroza vd., 2012)

Bu modelde liğin reaksiyon kontrollü olması durumunda geçerli olan denklem;

$$kt = 1 - (1 - x)^{\frac{1}{3}} \quad (2.10)$$

Burada k görünür hız sabiti, t liç süresi, x 0 ve 1 arasında olmak üzere reaksiyona giren element fraksiyonu veya reaksiyonun ilerleme derecesini temsil etmektedir ve aşağıdaki denklemle hesaplanabilmektedir;

$$x = \frac{C}{C_0} \quad (2.11)$$

k görünür hız sabitinin hesaplanması için gerekli olan denklem;

$$k = \frac{k_s C_A}{R_0 \rho} \quad (2.12)$$

Burada k_s reaksiyonun hız sabiti, ρ cevher yoğunluğu, R_0 reaksiyona girmemiş tane yarıçapı ve C_A da çözeltideki reaktif konsantrasyonunu temsil etmektedir. Bu denklemlerin mono boyutlu tanelere uygulanmasının nedeni tanelerin dar bir fraksiyonunun ortalama boyutunun kinetik modelde kullanılabilesidir.

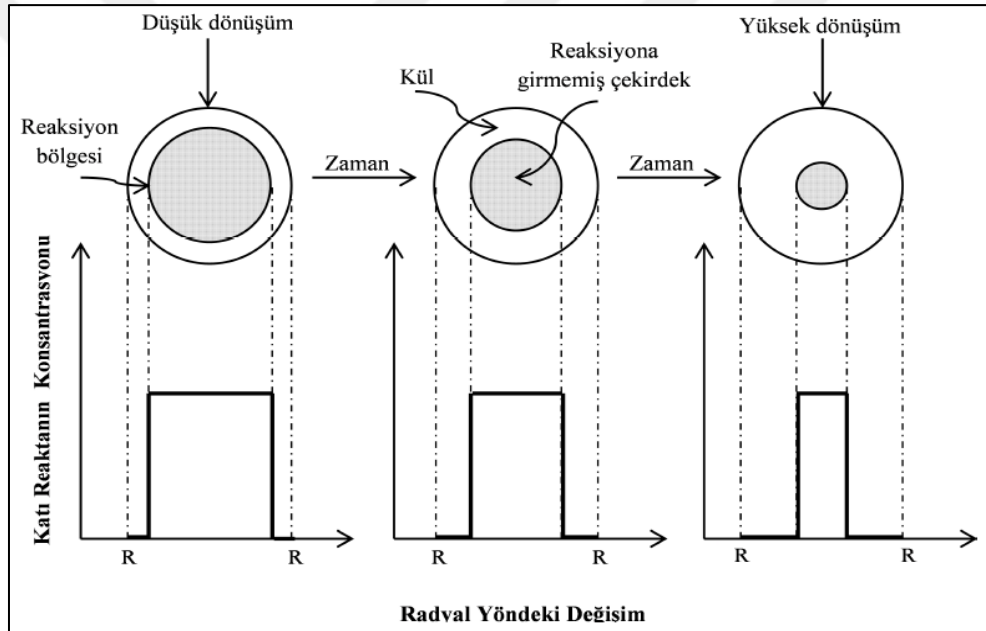
Küçülen çekirdek modelindeki difüzyon kontrollü durum için önerilen eşitlik ise aşağıdaki gibidir:

$$kt = 1 - \frac{2}{3}x - (1 - x)^{2/3} \quad (2.13)$$

k aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

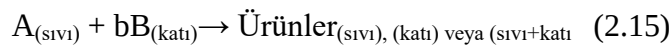
$$k = \frac{2DC_A}{R_0^2\rho} \quad (2.14)$$

Burada D difüzyon katsayısıdır (Brouwers ve Van Eijk, 2002; Velardo vd., 2002; Carrillo-Pedroza vd., 2012; Othutse ve Muzenda, 2015).



Şekil 2. 13: Küçülen çekirdek modelinde etkin çekirdek çapının reaksiyon süresine bağlı olarak değişimi

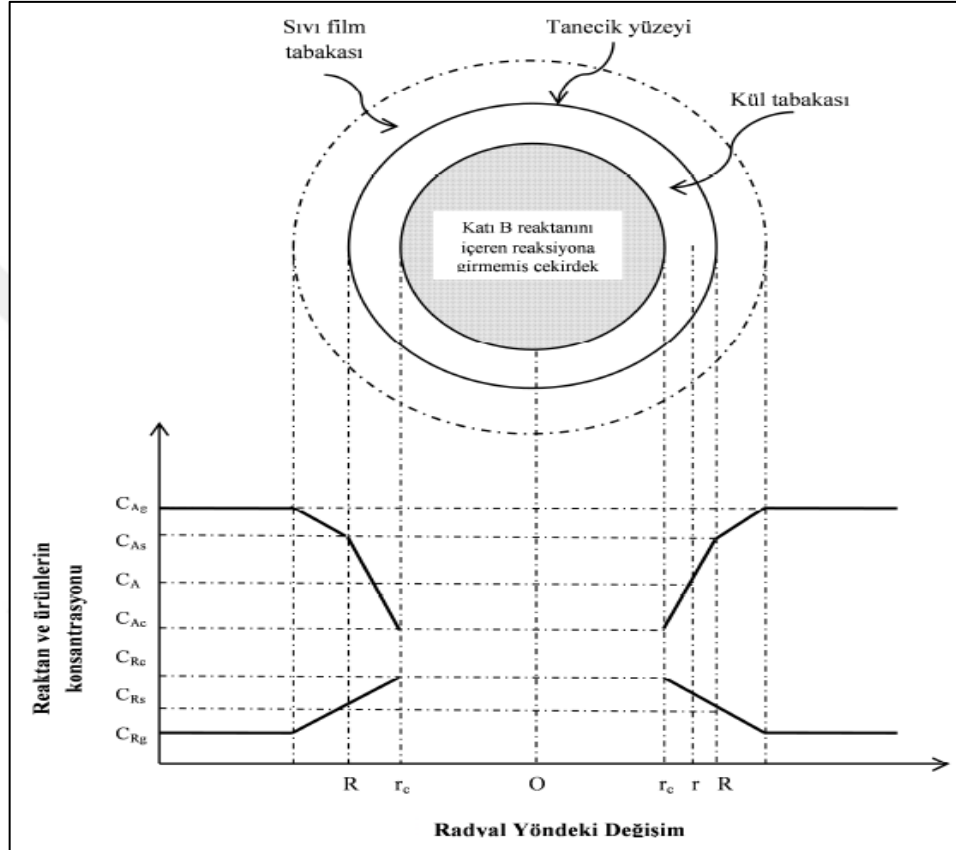
Saf olmayan katı maddelerden değerli bileşenlerin liçe kazanımı da bu modele uyduğundan, liç kinetiğini açıklayabilmek için küçülen çekirdek modelinin ayrıntılı incelenmesinde fayda vardır.



Küçülen çekirdek modelinde yukarıdaki eşitlikte verilen temsili bir heterojen reaksiyonun kontrolünde gerçekleşen basamaklar:

1. Katı tane yüzeyini saran sıvı film içerisinde reaktan A'nın difüzyonu,

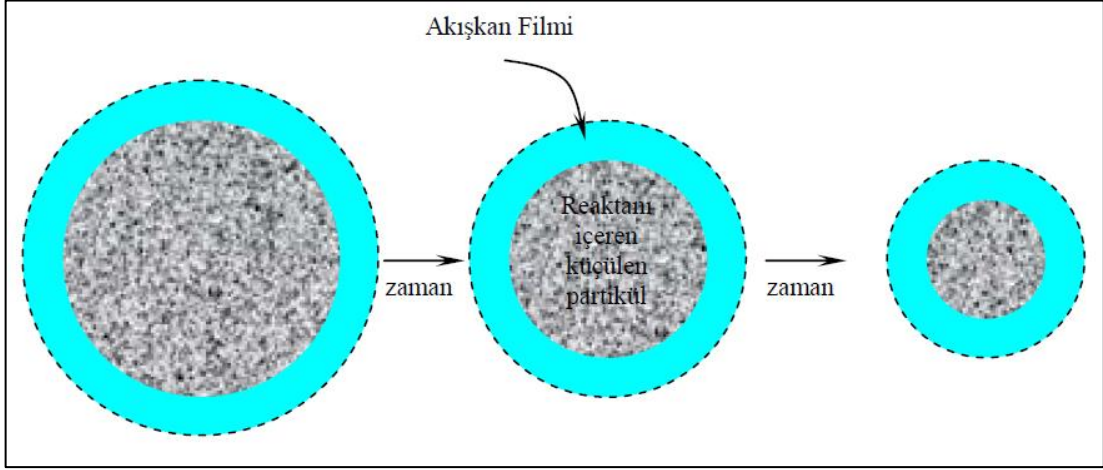
2. Katı tane yüzeyini saran tabaka içerisinde reaktan A'nın difüzyonu,
3. Katı tane yüzeyinde reaktan A ile katı reaktan B'nin reaksiyonu,
4. Yüzeyde oluşan ürünlerin tane yüzeyini saran kül tabakasından difüzlenererek tane dış yüzeyine taşınımı,
5. Yüzeyde oluşan ürünlerin tane yüzeyini saran sıvı filminden difüzlenererek ana çözeltiye geçiştir.



Şekil 2. 14: Küçülen çekirdek modelinde tane çapının reaktan konsantrasyonlarına göre değişimi

2.3.1.2. Küçülen Partikül Modeli

Küçülen partikül modelinde ilerleyen reaksiyon zamanına bağlı olarak dönüşen reaktan kesrindeki bir artışın yanında, partikülün boyutunda sürekli olarak bir azalmanın meydana gelmesi söz konusudur. Liç prosesi çözelti sınır tabakasındaki reaktan difüzyonu, katı bir ürün tabakası veya yüzey kimyasal reaksiyon hızıyla kontrol edilmektedir. Dolayısıyla buradaki kütle transferi için direnç teşkil edecek iki husus, katı partikülün dış yüzeyinde oluşan akışkan film boyunca difüzyon ve yüzey reaksiyonlarıdır (Aydoğan vd., 2005).



Şekil 2. 15: Küçülen partikül modeli

Bu modelde de reaksiyon kontrollü durum için eşitlik aynı olup, film difüzyonu için geçerli olan eşitlik aşağıdaki gibidir:

$$kt = 1 - (1 - x)^{\frac{2}{3}} \quad (2.16)$$

Diffüzyon veya yüzey kimyasal reaksiyonu en yavaş adım olduğu zaman modelin basitleştirilmiş denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$k_d t = \left[1 - \frac{2}{3}x - (1 - x)^{\frac{2}{3}} \right] = \frac{2M_B D C_A}{\rho_B a r_0^2} t \quad (2.17)$$

$$k_r t = [1 - (1 - x)^{\frac{1}{3}}] = \frac{k_c M_B C_A}{\rho_B a r_0} t \quad (2.18)$$

Burada x tepkimeye giren fraksiyon, k_c kinetik sabiti, M_B katı maddenin moleküler ağırlığı, C_A çözeltideki reaktif konsantrasyonu, ρ_B katı yoğunluğu, a liç reaksiyonundaki reaktif maddenin stokiyometrik katsayısı, r_0 katı tanenin başlangıç yarıçapı, t reaksiyon süresi, D gözenekli ürün tabakasındaki difüzyon katsayısı, k_d ve k_r de hız sabitleri olarak tanımlanmıştır (Velardo vd., 2002; Aydoğan vd., 2005; Espiari vd., 2006; Aydoğan vd., 2006).

2.4. ÖNCEDEN YAPILMIŞ OLAN ÇALIŞMALAR

Wang vd. 2013 yılında yapmış oldukları “Acid resistance of goethite in nickel laterite ore from Western Australia. Part I. The relationship between goethite morphologies and acid leaching performance” adlı çalışmalarında götitin morfolojisi ve liç performansı arasındaki

ilişkiyi araştırmışlardır. Laterit cevherlerinde götit içeren nikel, yığın liçi performansında aşırı değişkenlik göstermektedir. Seçilen numuneler için atmosferik basınçlı liç prosesi kullanılarak liç performansının değişkenliği gösterilmiştir. X-ışını kırınımına dayalı kantitatif mineralojik analiz, transmisyon elektron mikroskopisi görüntüsünden kristalit morfolojisi ve liç öncesi ve sonrası lateritik cevher örneklerinin enerji dağılımlı X-ışını spektrometrisi ile ölçülen kimyasal bileşim asit dirençli (uzun süreli liç) götitin parajenetik olarak silika veya kaolinit ile iç içe geçmiş olduğunu göstermiştir. Uzun süreli liç örneklerinde tek büyük etki alanlı götit ve yüksek kromlu götit de tespit edilmiştir (Wang vd., 2013).

Nazari ve Asselin 2009 yılında yapmış oldukları “Morphology of chalcopirite leaching in acidic ferric sulfate media” adlı çalışmalarında asidik demir sülfat ortamında liçin kalkopirit morfolojisine olan etkisini araştırmışlardır. Asidik demir sülfat çözeltisinde atmosferik kalkopirit liçi ile ilgili morfolojiyi açıklamak için, perkolasyon teorisine dayanan iki boyutlu bilgisayar simülasyonları kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, liç ortamında piritli ve piritli kalkopirit kalıntıları arasındaki gözlenen morfolojideki farklılıkların anlaşılmasıdır. Simüle edilmiş morfolojinin, pirit varlığında kalkopirit liç deneylerinde daha önce gözlemlenen kalıntı morfolojisiyle tutarlı olduğu görülmüştür. Böylece, pirit katalizli liç sırasında gözlemlenen gelişmiş geri kazanımların ve kendine has morfolojinin aktif anodik davranıştan kaynaklandığı tespit edilmiştir (Nazari ve Asselin, 2009).

Wu vd. 2009 yılında yapmış oldukları “The effect of preferential flow on extraction and surface morphology of copper sulphides during heap leaching” adlı çalışmalarında düşük dereceli bakır sülfidlerin seçkili akış durumunda ekstraksiyonu ve yüzey morfolojisi araştırılmıştır. Yapılan deney sonucunda, asit yoğunluğunun alkali gang ve matris tarafından tüketildiği görülmüş, bu nedenle Cu^{2+} ve toplam Fe konsantrasyonunun ilk liç aşamasında arttığı gözlenmiştir. Cevher ekstraksiyonu, konum derinliğinin artması ile azalmıştır. Bu deneyin uygulanan düşük sulama nedeniyle ince bölgede seçkili akış meydana gelmiş ve ince cevherlerin ekstraksiyonunun kaba cevherlerden daha büyük olduğu görülmüştür. SEM görüntüleri, kolon içindeki üst cevherlerin yüzeyinin ciddiye bozulduğunu fakat orta ve alttaki cevherlerin hafifçe aşındığını göstermiştir. Sülfür ve jarositin çöktürme tabakasına bağlı olarak, alt cevher yüzeyinde birçok çatlak gözlemlenmiştir (Wu vd., 2009).

Song vd. 2013 yılında yapmış oldukları “Effect of morphology on sulphuric acid leaching of malachite ores” adlı çalışmalarında malakit cevherlerinin sülfürik asitle liçinde morfolojinin

etkisini araştırmışlardır. Malakit cevherlerinden sülfürik asitle bakır liçi ve gang mineralleriyle ilişkili malakit tanelerinin morfolojisi arasındaki ilişki taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Çalışma ince tabaka ve granül şeklindeki gang mineralleri ile ilişkili olan iki malakit cevheri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, liç kinetiklerinin malakit morfolojisi ile yakından ilişkili olduğunu göstermiştir. Daha büyük spesifik yüzey alanı nedeniyle, ince tabakalı malakit, granüler malakitten daha yüksek bir bakır liç oranına sahip olduğu görülmüştür (Song vd., 2013).

Souza vd. 2007 yılında yapmış oldukları “The leaching kinetics of a zinc sulphide concentrate in acid ferric sulphate” adlı çalışmalarında demirce zengin bir çinko sülfid konsantresinin asit ferrik sülfat ortamında çözünme kinetiğini araştırmışlardır. Sıcaklık, demir iyonu ve sülfürik asit konsantrasyonları, karıştırma hızı ve tane boyutunun liç kinetiği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Liç prosesi iki aşamaya ayrılmıştır. İlk aşamada çözünme kinetiği çinko sülfür taneleri yüzeyindeki kimyasal reaksiyon ile kontrol edilmiş, ikinci aşamada ise reaksiyon, reaktiflerin veya ürünlerin elemental kükürt (kül) tabakasından difüzyonuyla kontrol edilmiştir. Kimyasal kontrollü basamağın aktivasyon enerjisi 27,5 kJ/mol, difüzyon kontrollü basamak için belirlenen değer 19,6 kJ/mol olmuştur. Demir iyonu ve sülfürik asit konsantrasyonlarına göre reaksiyon sırası sırasıyla yaklaşık 0.50 ve 1.00 olmuştur. Çinko sülfid konsantrasyonunun liç öncesi ve sonrası morfolojisi SEM-EDS ile incelenmiştir. Çinko sülfid konsantrelerinin liç öncesi taneleri berrak bir yüzey sunar ve yaklaşık olarak aynı form ve ebada sahipken, liç sonrası katı maddenin pürüzlülüğünde aşamalı olarak artış ve ayrıca tane yüzeylerini kaplayan elementer sülfür miktarında bir artış olduğu gözlenmiştir (Souza vd., 2007).

Majima vd. 2013 yılında yapmış oldukları “The Leaching of Chalcopyrite in Ferric Chloride and Ferric Sulfate Solutions” adlı çalışmalarında hem ferrik klorid hem ferrik sülfat solüsyonlarında doğal kalkopirit liçini, hem de tek bir kalkopirit kristali kullanarak liç morfolojisini incelemişler ve iki sonucun da birbirinden oldukça farklı olduğunu görmüşlerdir. Demir klorür, gözenekli bir elemental kükürt tabakası üretirken, demirli sülfat, elemental kükürt gibi plaka benzeri kristallerin bir agregatının oluşumunu sağlamıştır. Kalkopirit liçinin morfolojik özelliklerinden dolayı demir klorürün daha etkili bir reaktan olduğu görülmüştür. Her iki liç kinetiğinin, reaksiyon yüzey alanındaki bir artışın sonucu olarak, uzun bir süre boyunca doğrusal olduğu ve bunu takiben bir hızlandırma aşamasının bulunduğu tespit edilmiştir. Demir klorür liç kinetiği çalışması ve kalkopiritin bir asidik

klorür solüsyonunda anodik çözünmesiyle elde edilen sonuçların karşılaştırması, her iki reaksiyondaki liç hızının ve aktivasyon enerjilerinin uyumlu olduğunu ortaya koymuştur (Majima vd., 2013).



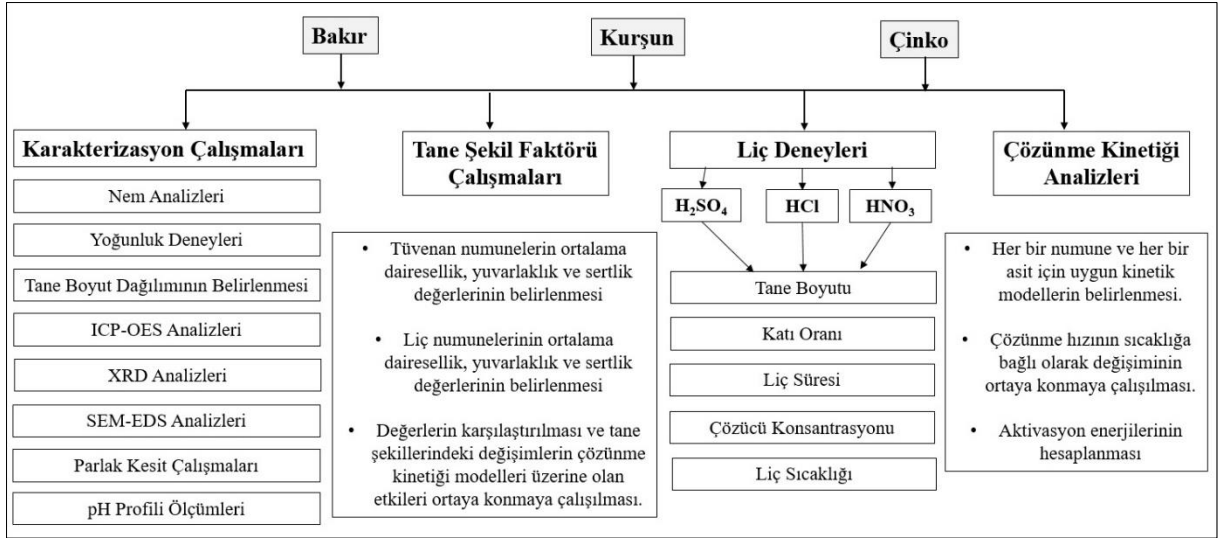
3. YÖNTEM

Çalışmanın temelini Balıkesir ili Balya ilçesi kurşun-çinko cevheri ve Kastamonu ili Küre ilçesi bakır cevheri oluşturmaktadır. Numunelerin fiziksel özelliklerinin saptanması amacıyla nem, yoğunluk ve tane boyut dağılımı analizleri; kimyasal özelliklerinin saptanması amacıyla ICP-OES analizleri; mineralojik özelliklerinin saptanması amacıyla XRD, SEM-EDS, parlak kesit çalışmaları ve pH ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Karakterizasyon çalışmalarının ardından Pb-Zn ve Cu numuneleri üzerinde liç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda tane boyutu, katı oranı, liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametreleri denenerek optimum değerler elde edilmiştir. Çözünme kinetiği analizleri kapsamında Pb, Zn ve Cu için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olan deneylerde genel reaksiyon hızını kontrol eden kinetik modelin belirlenmesi amacıyla kimyasal kontrollü model, difüzyon kontrollü model ve film difüzyonu modeli altında olduğu durumlar ayrı ayrı irdelenerek, her bir numune ve her bir asit için uygun kinetik modeller belirlenmiştir. Pb, Zn ve Cu için H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 deneylerinden elde edilmiş olan sonuçlara ilgili kinetik modeller uygulanarak çözünme hızının sıcaklığa bağlı olarak değişimi ortaya konmaya çalışılmıştır.

Tane şekil faktörü çalışmaları kapsamında öncelikli olarak tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerinin mikroskop fotoğrafları çekilmiş ve ImageJ programı aracılığıyla ortalama dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerleri belirlenmiştir. Ardından her bir asit ile liç işlemine tabi tutulmuş Pb-Zn ve Cu numunelerinden liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametrelerinin denendiği ve optimum değerlerin belirlendiği deneylere ait liç numunelerinin mikroskop fotoğrafları çekilerek ImageJ programı aracılığı ile ortalama dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerleri belirlenmiştir. Tüvenan numunelerden elde edilmiş olan değerler ile liç numunelerinden elde edilmiş olan değerler karşılaştırılmış ve tane şekillerindeki değişimlerin çözünme kinetiği modelleri üzerine olan etkileri ortaya konmaya çalışılmıştır.

Şekil 3.1’de tez kapsamında yapılmış deneysel çalışmalara ait akım şeması verilmiştir.



Şekil 3. 1: Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait akım şeması

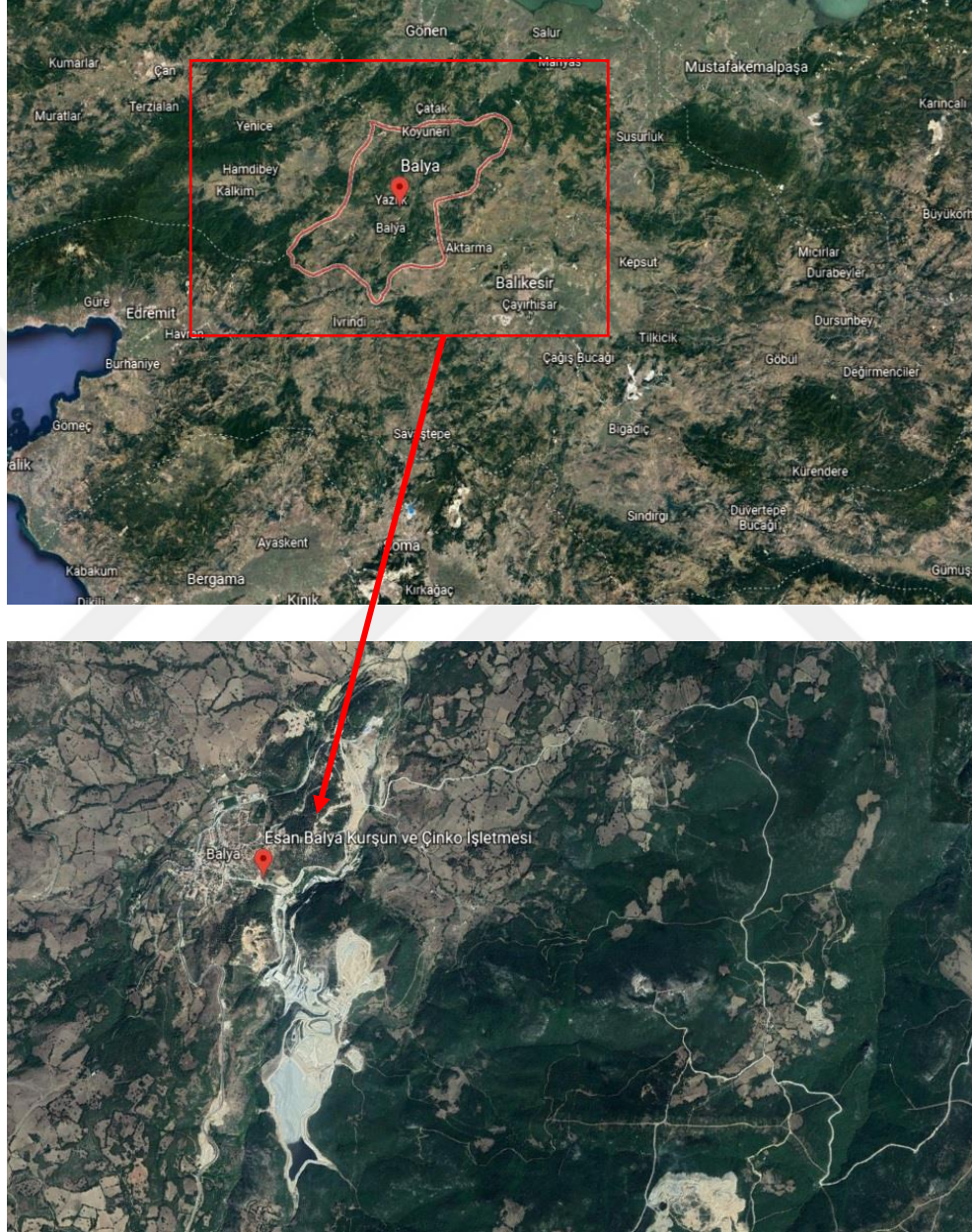
3.1. ÇALIŞMA SAHASI

Deneysel çalışmalara esas olan çalışma sahaları Balıkesir ili Balya mevkii ve Kastamonu ili Küre mevkiileridir.

Balıkesir ili bulunduğu jeolojik yapısı nedeniyle özellikle baz metal cevherleşmeleri bakımından çok zengindir. Bunların başında antik çağdan beri zaman zaman işletildiği bilinen Balya kurşun-çinko yatağı gelmektedir. Balya Kurşun-Çinko maden yatağı, Biga Yarımadası'nın güneydoğusunda, Balıkesir il merkezinin 50 km kuzeybatısındaki Balya ilçe merkezi ve çevresini içine alan yaklaşık 8km²'lik bir alana yayılmıştır. Yatakta %7,2 Zn, %2,7 Pb ve %0,3 Cu tenörlü 3.260.000 ton görünür rezerv tespit edilmiştir (Gül, 2014; Çelik Balcı vd., 2014; Bozan vd., 2017; MTA-1, 2019). Şekil 3.2'de Balıkesir Balya kurşun-çinko cevheri çalışma sahasının yer bulduru haritası verilmiştir.

Eski çağlarda da işletilen Balya Pb-Zn maden yatağı Osmanlı döneminde (1839) ve sonrasında yabancı şirketler tarafından 1939 yılına kadar işletilmiştir. Bu işletmelerden arta kalan madenlerin ve atıkların yeniden işletmeye alınmasına yönelik çalışmalar 1997 yılına kadar devam etmiştir. İnceleme alanında yabancı bloklar halinde Paleozoyik, Mezozoyik ve Tersiyer yaşlı formasyonlar vardır. Çalışma alanının temelini Permien yaşlı Çamoba formasyonuna ait allokon kireçtaşları ve temel kayası üzerine uyumsuzlukla Triyas yaşlı çok düşük dereceli bölgesel metamorfizma izleri taşıyan çamurtaşı ve fillat (Nilüfer birimi), silttaşı ve kumtaşı (Hodul birimi) ve çakıltaşı ve konglomera (Orhanlar grovakı) ile temsil

edilen Karakaya formasyonuna ait kayaç birimleri oluşturmaktadır. Permien kireçtaşları, Triyas yaşlı Karakaya formasyonu içerisinde olistoitler şeklinde bulunmaktadır. Balya Pb-Zn cevher oluşumunun genellikle dasit-kireçtaşı dokanağında kontakt pirometasomatik ve kireçtaşının çatlaklarında hidrotermal damar türünde geliştiği ortaya konmuştur.



Şekil 3. 2: Balıkesir Balya kurşun-çinko cevheri çalışma sahası

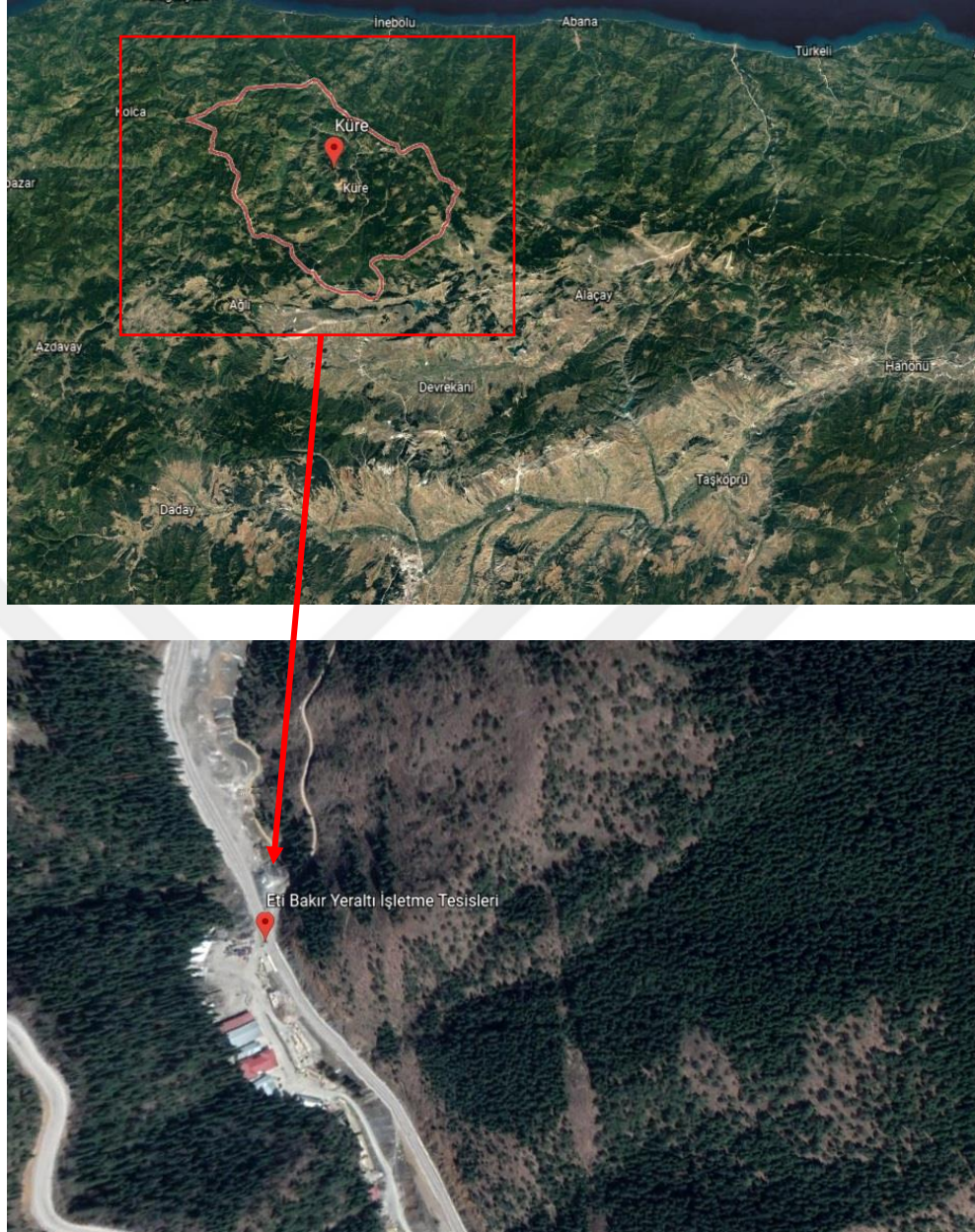
Balya madeninin oluşumunda büyük rol oynadığı düşünülen magmatizmanın asidik kaya özelliğinde olduğu ve cevherleşmenin ise damar tipi, saçılmış ve dokanak tipi olmak üzere üç farklı oluşum tipinden meydana geldiği belirtilmektedir. Cevherleşmeler dasit, dasit porfiri ve mikrodiorit türü kayaçlar içerisinde yer almaktadır. Cevherleşmeler, dasit çatlaklarında

realgar, orpiment, galenit, sfalerit ve pirit; kireçtaşının çatlaklarında ise galenit, sfalerit, antimonit, pirit, realgar ve orpiment birlikteliklerinden oluşmaktadır. Genel olarak cevher mineralleri pirit, markazit, sfalerit, galen, kalkopirit ve arsenopiritten oluşmaktadır. Balya madeni çevresinde Tersiyer yaşlı volkanik ve tortul kayaçlar, granodiyorit, Jura yaşlı kireçtaşları, Triyas yaşlı tortul kayaçlar, Permiyen yaşlı kireçtaşı ve Epimetamorfik şistler bulunmaktadır. Ayrıca yörede, kuvvetli bir tektonizmanın izleri gözlenmekte, KD-GB doğrultulu faylar yanında D-B ve KKB-GGB doğrultulu faylar da bulunmaktadır (Avin, 2011; Karadeniz, 2011; Çelik Balcı vd., 2014; Gül, 2014; Bozan vd., 2017).

Küre ilçesi ülkemizdeki bakır cevherleşmeleri bakımından önemli bir yöredir. İlçedeki Aşıköy ve Bakibaba bakır yatakları altın ve gümüşün de yan ürün olarak bulunduğu cevherleşmelerdir. Aşıköy bakır yatağında %1,56 Cu, 2,48 gr/ton Au ve 10 gr/ton Ag tenörlü 11.229.208 ton, Bakibaba yatağında ise %3,24 Cu, 1,5 gr/ton Au ve 5-20 gr/ton Ag tenörlü 250.000 ton görünür rezerv tespit edilmiştir (MTA-2, 2019). Şekil 3.3’de Kastamonu Küre bakır cevheri çalışma sahasının yer bulduru haritası verilmiştir.

Küre volkanojenik masif sülfid yatakları Pontid kuşağının batısındaki Kastamonu bölgesinde yer almaktadır. Bu civarda, subgrovak ve siyah şeylerle birlikte denizaltı volkanizmasına bağlı bazaltik kayaçlar yaygın olarak görülmekte olup, Pontid sıradağlarının hareketli batı kesimini oluşturmaktadır. Masif bakırlı yataklar, Küre’de subgrovak-siyah şeyl birlikleri ile sınır oluşturan bazaltik dizilimin yerini almışlardır. Küre yatağı Türkiye’nin üçüncü büyük bakır madeni olmasına karşın, jeolojik olarak çok az incelenmiştir (Çürük, 2006).

Küre bakır yatakları olarak bilinen ve başlıca pirit kalkopiritten oluşan masif ve ağsal-saçınımlı sülfid yatakları, Küre ilçe merkezinin batısında yer alır ve kuzeyden güneye doğru; Toykondu, Aşıköy, Bakibaba ve Kızılsu olarak sıralanırlar. Bu yataklar; Tetis okyanus kabuğunun Rodop-Pontid kıtası üzerindeki parçaları olarak yorumlanan Küre masif sülfid yatakları çevresinde, tabanda ultrabazikler, onun üzerinde bazaltik kayaçlar ve siyah şeyllerden oluşan Küre Formasyonu ile bunları keser vaziyette gabro-diyorit ve dasitler yer alır. Bazaltik kayaçlar yaygın olarak yastık lav şeklinde izlenmektedir. Küre civarındaki Liyas yaşlı volkanitler ve siyah şeyller etkin bir biçimde kıvrımlanmışlardır.



Şekil 3. 3: Kastamonu Küre bakır cevheri çalışma sahası

Kıvrım eksenleri kabaca K-G yönlüdür. Araştırmalar sonucu okyanus ortası sırtı bazaltı olduğu belirtilen Küre bazaltlarıyla birlikte bulunan siyah şeyller de bazaltlar gibi, yer yer masif sülfid kütlelerinin taban, çoğunlukla da tavan kayacı durumundadır. Buradaki cevher kütlelerinin birkaçı bazaltların içinde bulunduğu gibi, bazıları siyah şeyllerin içinde, ya da bazaltların üzerinde bulunmakta, üstten siyah şeyller tarafından örtülmektedir. Çalışma alanının tabanında yer alan ultrabazikler, serpantinleşmiş peridotit, dunit ve piroksenitlerden oluşmuş olup Küre'nin kuzeybatısında, Elmakütüğü tepe, Ömer Yılmaz Mahallesi çevresinde ve Karacakaya tepenin doğusunda yüzeylenirler. Küre yöresinde ofiyolitlerin alt sınırı

görülmemektedir. İçinde çok az oranda kromit ve krom spinel izlenmektedir (Demir, 2012; Altun vd., 2015).

3.2. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN CİHAZLAR VE YÖNTEMLER

Tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmaların tamamı Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'ne ait Cevher ve Kömür Hazırlama Laboratuvarı, Cevher ve Kömür Zenginleştirme Laboratuvarı, Mineral Karakterizasyonu Laboratuvarı ve Kimyasal Analiz Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Numune Hazırlamada Kullanılan Cihazlar

Numunelerin deneysel çalışmalara hazır hale getirilmesinde öncelikli olarak konileme-dörtleme aparatları ve Riffle numune bölme aparatları kullanılarak temsili numuneler elde edilmiştir. Primer ve sekonder kırıcı olarak çene ağız açıklığı 100x100 mm, alt çene açıklığı 0-30 mm arası ayarlanabilir çeneli kırıcı (Baz Makine, Türkiye) kullanılmıştır. 2 mm altına ufalanan numuneler bilyalı değirmende, elek ile kapalı devre çalışarak öğütülmüştür. Elementer analizler ve yoğunluk deneyleri için agat öğütücü (Retsch, RM 200, Almanya) kullanılmıştır.

3.2.2. Fiziksel Analizler

Deneylere esas olan numunelerin nem içeriğini saptamak amacıyla etüvde (Memmert, UF 450, Almanya) 105°C'de nem analizleri gerçekleştirilmiştir. Fiziksel analizler kapsamında ikincil olarak numunelerin tane boyut dağılımlarını belirlemek amacıyla tane boyutu analizleri gerçekleştirilmiştir. Tane boyut analizinde eleklerle (Retsch, Almanya) yaş eleme yöntemi kullanılmıştır. Numunelerin yoğunluğunun belirlenmesi amacıyla piknometre ile yoğunluk deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm yoğunluk deneylerinde 50 ml'lik piknometreler ve distile su kullanılmıştır. Nem ve yoğunluk analizleri ASTM standartlarına göre yapılmıştır.

3.2.3. Kimyasal Analizler

Kurşun-çinko ve bakır cevherlerinin kimyasal özellikleri ve içerdiği elementler hakkında bilgi edinilmesi amacıyla İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) analizleri gerçekleştirilmiştir. ICP-OES analizleri Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Maden Analizleri ve Teknolojisi Daire Başkanlığı'nda gerçekleştirilmiştir.

3.2.4. Mineralojik Analizler

Numunelerin mineralojik özellikleri hakkında bilgi edinilmesi amacıyla XRD cihazı (Rigaku, MiniFlex 600, Japonya) ile X-Işını Kırınımı (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin morfolojileri hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile fotoğrafları çekilmiş ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Maden Analizleri ve Teknolojisi Daire Başkanlığı'nda gerçekleştirilmiştir. Parlak kesit çalışmaları kapsamında, numunelerin parlak kesitleri doğaltaş ve mermer kesme cihazı (Vommak, Türkiye) ve parlatma cihazı (Vommak, Türkiye) kullanılarak hazırlanmıştır. Elde edilen parlak kesitler polarize ışık mikroskobu (Olympus, BX51-P, Japonya) yardımıyla incelenerek yorumlanmıştır.

3.2.5. pH profili

Kurşun-çinko ve bakır numunelerinin pH-profilini çıkartmak amacıyla -38 µm tane boyutunda malzeme ve ultra saf su kullanılarak %1 katı oranında süspansiyonlar hazırlanmıştır. Asidik ortam için 0,1 M HCl ve alkali ortam için 0,1 M NaOH ile hazırlanan süspansiyonlar, bir beher içerisinde manyetik karıştırıcı ile 500 dev/dak hızda karıştırılmış ve bu işlem esnasında belirli periyotlarla süspansiyonların pH değerleri okunmuştur. Kurşun-çinko ve bakır süspansiyonlarının pH-profilini ölçümleri pH metre (HANNA, HI 2211, Almanya) kullanılarak yapılmıştır.

3.2.6. Tane Şekil Faktörü Çalışmaları

Tane şekil faktörü çalışmaları kapsamında dijital mikroskop (IronX) ile tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerinin fotoğrafları çekilmiştir. Her bir numune için en az 10 fotoğraf çekilerek, her bir numune için toplamda en az 300 tane şekil faktörü analizi yapılabilecek şekilde veri toplanmıştır. Daha sonra bu fotoğraflar ImageJ programı aracılığıyla analize tabi tutulmuş ve tüm fotoğraflardan elde edilen verilerin ortalamaları alınarak her bir numune için ortalama dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerleri belirlenmiştir.

Ardından her bir asit ile liç işlemine tabi tutulmuş Pb, Zn ve Cu numunelerinden liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametrelerinin denendiği ve optimum değerlerin belirlendiği deneylere ait liç numunelerinin mikroskop fotoğrafları çekilmiştir. Her bir numune için en az 10 fotoğraf çekilerek, her bir numune için toplamda en az 300 tane şekil faktörü analizi yapılabilecek şekilde veri toplanmıştır. Daha sonra bu fotoğraflar ImageJ programı

aracılığıyla analize tabi tutulmuş ve tüm fotoğraflardan elde edilen verilerin ortalamaları alınarak her bir numune için ortalama dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerleri belirlenmiştir.

Tüvenan numunelerden elde edilmiş olan değerler ile liç numunelerinden elde edilmiş olan değerler karşılaştırılmış ve tane şekillerindeki değişimlerin çözünme kinetiği modelleri üzerine olan etkileri ortaya konmaya çalışılmıştır.

3.2.7. Kimyasal Çözündürme (Liç) Deneyleri

Kimyasal çözündürme işlemleri karıştırma hızı ve sıcaklık kontrollü olarak, ısıtıcılı karıştırıcılarda (IKA C MAg HS 10) beherler içerisinde gerçekleştirilmiştir. Liç deneyler Pb, Zn ve Cu için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Liç deneylerinde tane boyutu, katı oranı, çözünme süresi, çözücü konsantrasyonu ve pülp sıcaklığı parametrelerinin numunelerin çözünmelerine etkileri incelenmiştir.

Liç işlemi sonrasında çözeltilere katı-sıvı ayrımı işlemi uygulanmıştır. Katı kısım kurutularak kimyasal analize tabi tutulmuştur. Liç verimleri ise aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır:

$$\% Verim = \frac{Tüvenanda Pb,Zn,Cu - Artıkta Pb,Zn,Cu}{Tüvenanda Pb,Zn,Cu} * 100 \quad (3.1)$$

3.2.8. Çözünme Kinetiği Analizleri

Çözünme kinetiği analizleri kapsamında Pb, Zn ve Cu için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olan deneylerde genel reaksiyon hızını kontrol eden kinetik modelin belirlenmesi amacıyla kimyasal kontrollü model, difüzyon kontrollü model ve film difüzyonu modeli altında olduğu durumlar ayrı ayrı irdelenerek, her bir numune ve her bir asit için uygun kinetik modeller belirlenmiştir. Pb, Zn ve Cu için H₂SO₄, HCl ve HNO₃ deneylerinden elde edilmiş olan sonuçlara ilgili kinetik modeller uygulanarak çözünme hızının sıcaklığa bağlı olarak değişimi ortaya konmaya çalışılmıştır. Her numune ve her asit için -106+75 µm tane boyutu, 1 M asit dozajı, %20 katı oranı, 0-30 dak liç süresi, 50-90 °C pülp sıcaklığı, 250 dev/dak karıştırma hızı koşullarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Kinetik analizler kapsamında gerçekleştirilen deneylerde 5 dakikalık periyotlarda pülp içerisinden 1 ml'lik alikotlar alınmış ve 49 ml saf su ile seyreltilerek Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarı'ndaki Atomik Absorpsiyon Spektrometresi (AAS) (Perkin Elmer, ABD) cihazı ile analize tabi tutulmuştur.

Söz konusu asit ortamlarında farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen liç deneyleri sonucunda çözünme işleminin hangi çözünme modeline uygun olduğunu tespit etmek amacıyla küçülen çekirdek modelinde kimyasal kontrollü durum için Bölüm 2.3’de verilmiş olan (2.10) denklemi, difüzyon kontrollü durum için (2.13) denklemi ve küçülen partikül modelinde film difüzyonu olarak kontrol edildiği durum için (2.16) denklemleri kullanılmıştır. Elde edilen korelasyon katsayılarına göre kinetik modeller belirlenmiştir. Söz konusu kinetik modellere ait görünür hız sabiti değerlerinin doğal logaritması alınmış ve $1/T$ değerlerine oranlayarak grafiklendirilmiştir. Grafikteki doğrunun eğimi $-E_a/R$ ’ye eşit olduğu için, bu değerden yola çıkılarak liç prosesinin aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır.



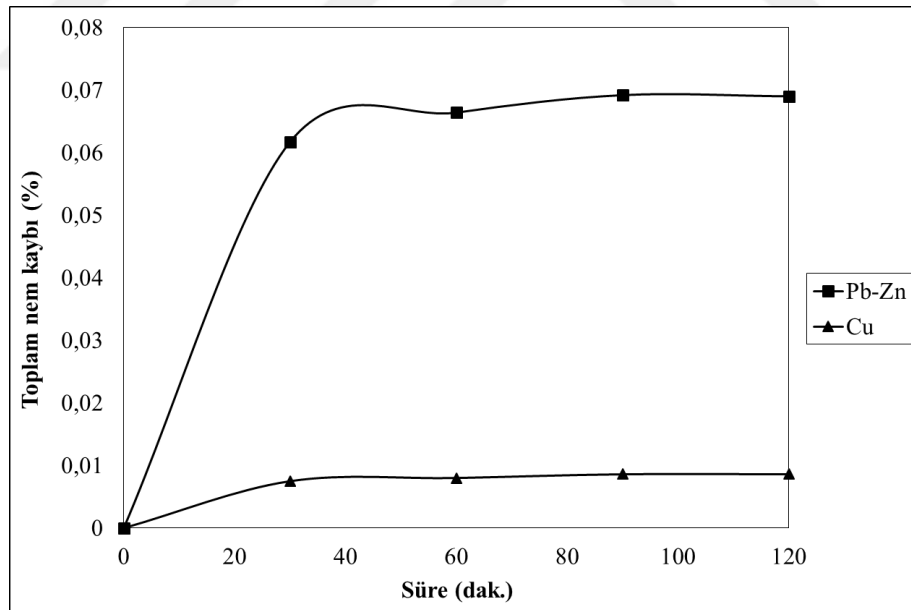
4. BULGULAR

4.1. NUMUNELERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

4.1.1. Nem Analizleri

Cevherin nem oranının fazla olması, kırma-eleme safhasında problem yaratabilmekte ve belirlenen kapasiteye ulaşılabilmesini engelleyebilmektedir. Ayrıca nem içeriği fazla olan malzemenin liç işlemleri öncesi kurutma işlemine tabi tutulması gerekmektedir.

Bu nedenle deneylere esas olan numunelere nem analizi yapılmış ve orijinal nem içeriklerini kaybetmeden gerçekleştirilen nem analizlerinin sonucunda, tüvenan Pb-Zn numunesinin toplam %0,069, Cu numunesinin %0,0086 nem içerdiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan da numunelerin nem içeriklerinin önemli boyutta olmadığı gözlenmiştir. Şekil 4.1’de tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerine ait nem analizi grafiği verilmiştir.



Şekil 4. 1: Tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerinin nem analizi grafiği

4.1.2. Tane Boyut Analizleri

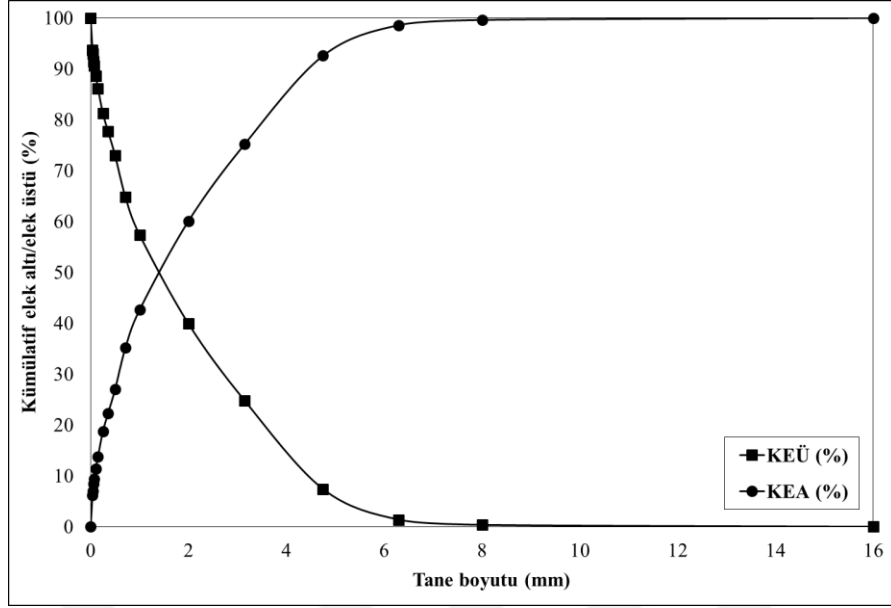
Çeneli kırıcı kullanılarak boyut küçültme işlemine tabi tutulan deneylere esas numuneler temsili olarak azaltıldıktan sonra yaş eleme yöntemiyle tane boyut analizi gerçekleştirilmiştir.

Tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerinin kırıcı çıkışı tane boyut dağılım sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir.

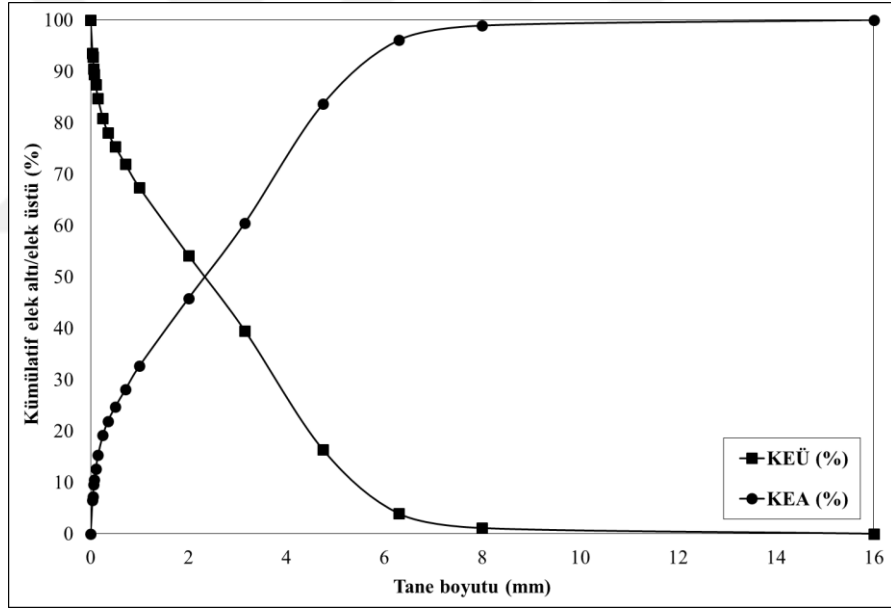
Tablo 4. 1: Tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerinin kırıcı çıkışı tane boyut dağılım sonuçları

Elek açıklığı	Miktar				Toplam			
	(gr)		(%)		Elek Üstü (%)		Elek Altı (%)	
	Pb-Zn	Cu	Pb-Zn	Cu	Pb-Zn	Cu	Pb-Zn	Cu
+8	6,08	20,01	0,382	1,095	0,382	1,095	100,000	100,000
-8+6.30	16,09	51,24	1,011	2,803	1,393	3,898	99,618	98,905
-6.30+4.75	95,91	226,85	6,026	12,411	7,419	16,309	98,607	96,102
-4.75+3.15	276,22	424,05	17,356	23,200	24,775	39,510	92,581	83,691
-3.15+2	240,58	267,98	15,116	14,662	39,891	54,171	75,225	60,490
-2+1	278,44	240,27	17,495	13,146	57,387	67,317	60,109	45,829
-1+0.710	118,82	84,74	7,466	4,636	64,852	71,953	42,614	32,683
-0.710+0.500	128,90	61,99	8,099	3,392	72,952	75,345	35,148	28,047
-0.500+0.355	76,29	49,91	4,794	2,731	77,745	78,075	27,049	24,655
-0.355+0.250	56,23	51,13	3,533	2,797	81,278	80,873	22,255	21,925
-0.250+0.150	78,05	70,71	4,904	3,869	86,182	84,742	18,722	19,127
-0.150+0.106	38,39	49,51	2,412	2,709	88,595	87,450	13,818	15,258
-0.106+0.075	31,73	36,77	1,994	2,012	90,588	89,462	11,406	12,550
-0.075+0.063	14,52	18,81	0,912	1,029	91,501	90,491	9,412	10,538
-0.063+0.045	23,74	42,67	1,492	2,335	92,992	92,826	8,500	9,509
-0.045+0.038	12,03	12,36	0,756	0,676	93,748	93,502	7,008	7,174
-0.038	99,50	118,77	6,252	6,498	100,000	100,000	6,252	6,498
Toplam	1591,52	1827,77	100,00	100,00				

Tablo 4.1’deki veriler kullanılarak oluşturulan ve Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de verilen elek altı ve elek üstü eğrilerinden kırıcı çıkışı Pb-Zn numunesinin d_{50} boyutu 1,4 mm, d_{80} boyutu 3,55 mm; Cu numunesinin d_{50} boyutu 2,32 mm, d_{80} boyutu 4,48 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 4. 2: Tüvenan Pb-Zn numunesinin kırıcı çıkışı elek altı ve elek üstü eğrileri



Şekil 4. 3: Tüvenan Cu numunesinin kırıcı çıkışı elek altı ve elek üstü eğrileri

4.1.3. Yoğunluk Tayini

Deneylere esas olan Pb-Zn ve Cu numunelerinin yoğunluklarının belirlenmesinde piknometre ile yoğunluk analizi yöntemi kullanılmıştır. Yoğunluk deneylerinde kullanılan numuneler agat öğütücü ile $-75 \mu\text{m}$ tane boyutuna indirilerek ölçüme hazır hale getirilmiştir. Deney sonucunda tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerinin yoğunlukları sırasıyla $4,89 \text{ g/cm}^3$ ve $4,96 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur.

4.2. NUMUNELERİN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Numunelerin kimyasal içeriklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen ICP-OES analizi sonucunda Pb-Zn numunesinin %1,41 Pb ve %2,14 Zn içerdiği, Cu numunesinin %4,24 Cu içerdiği belirlenmiştir. Tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerine ait ICP-OES analizi sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir.

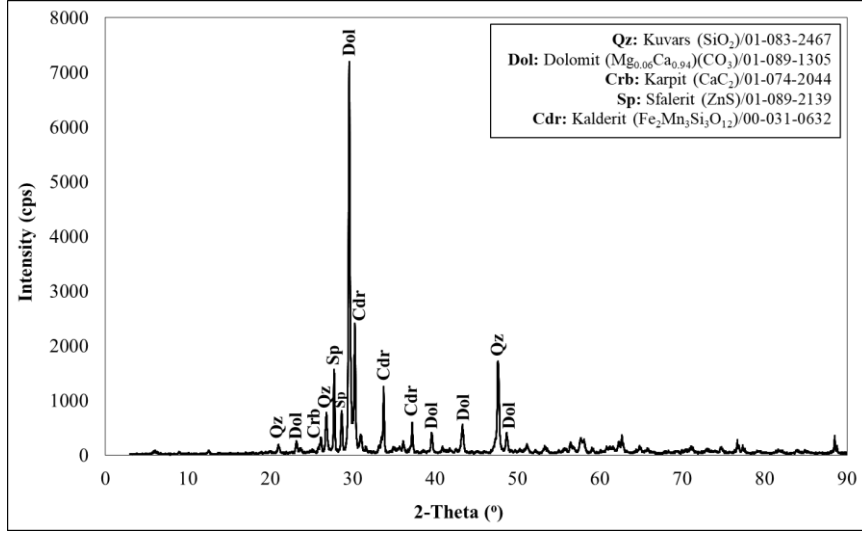
Tablo 4. 2: Tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerine ait ICP-OES analizi sonuçları

Bileşen	As	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Zn
İçerik (ppm)	685	152	20	1121	>50000	2759	12	17	14108	173	<10	21356
Pb-Zn												
İçerik (ppm)	432	34	4653	42405	>50000	451	44	33	396	34	66	4402
Cu												

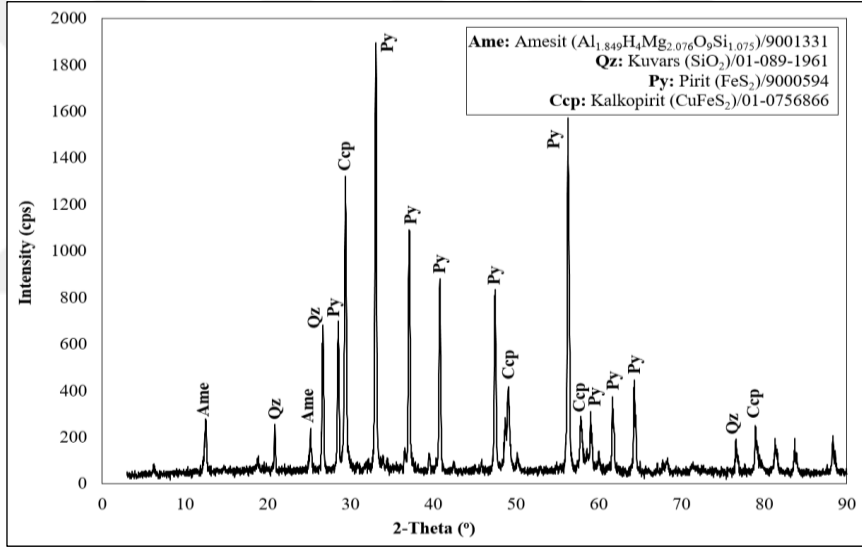
4.3. NUMUNELERİN MİNERALOGİK ÖZELLİKLERİ

4.3.1. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizleri

Numunelerin mineralojik yapısı hakkında bilgi edinilmesi amacıyla XRD Analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de sırasıyla Pb-Zn ve Cu numunelerinin XRD kırınım desenleri verilmiştir. XRD ölçümü sonucunda Pb-Zn numunesinin kuvars (SiO_2), dolomit ($(\text{Mg}_{0.06}\text{Ca}_{0.94})(\text{CO}_3)$), sfalerit (ZnS), karpit (CaC_2) ve kalderit ($\text{Fe}_2\text{Mn}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}$) içerdiği belirlenmiştir. Cu numunesinin XRD ölçüm sonuçları incelendiğinde, numunenin kuvars (SiO_2), amesit ($\text{Al}_{1.849}\text{H}_4\text{Mg}_{2.076}\text{O}_9\text{Si}_{1.075}$), pirit (FeS_2) ve kalkopirit (CuFeS_2) içerdiği görülmüştür.



Şekil 4. 4: Pb-Zn numunesinin XRD kırınım deseni



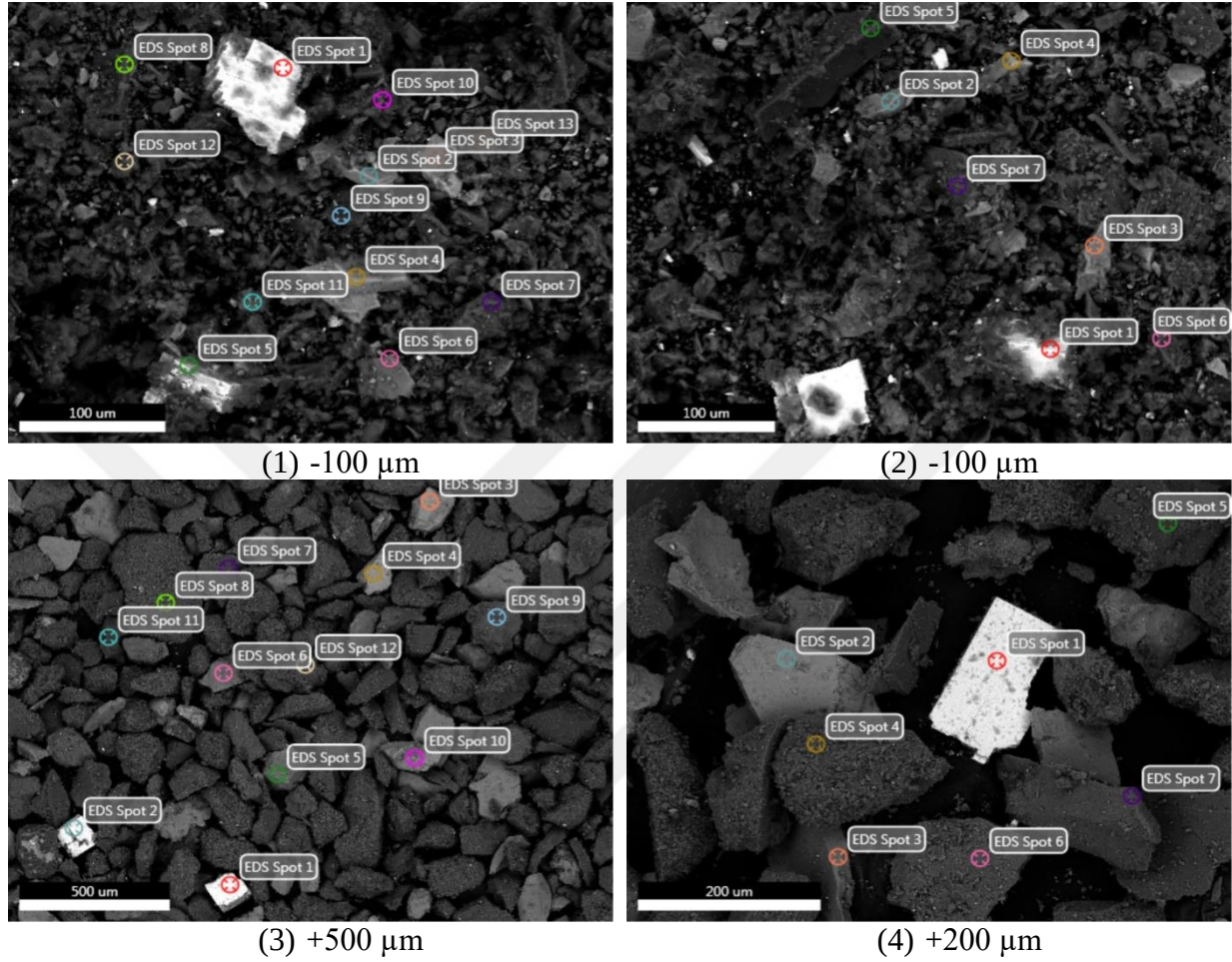
Şekil 4. 5: Cu numunesinin XRD kırınım deseni

4.3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) Analizi

Pb-Zn ve Cu numunelerinin elementel kompozisyonlarının tanımlanabilmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları çekilmiş ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

Pb-Zn numunesi için EDS analiz sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.6, Tablo 4.3), 1. fotoğraf için ortalama %9,95 Pb ve %9,55 Zn, 2. fotoğraf için %7,88 Pb ve %6,64 Zn, 3. fotoğraf için %12,71 Pb ve %13,58 Zn ve 4. fotoğraf için %11,31 Pb ve %8,04 Zn içeriği tespit edilmiştir. Numunenin kükürt ve kalsiyum oranının yüksek olduğu gözlenmiştir. Tabloda verilen

elementlere ek olarak numunede Al, Fe, Mg, Si, Cu, Cd, Mn, Ni, Sr, K, Na, C ve Ti varlığına da rastlanmıştır.



Şekil 4. 6: Pb-Zn numunesinin EDS analizine tabi tutulan SEM fotoğrafları

Tablo 4. 3: Pb-Zn numunesinin EDS analiz sonuçları (%W: ağırlık, %A: atomik ağırlık)

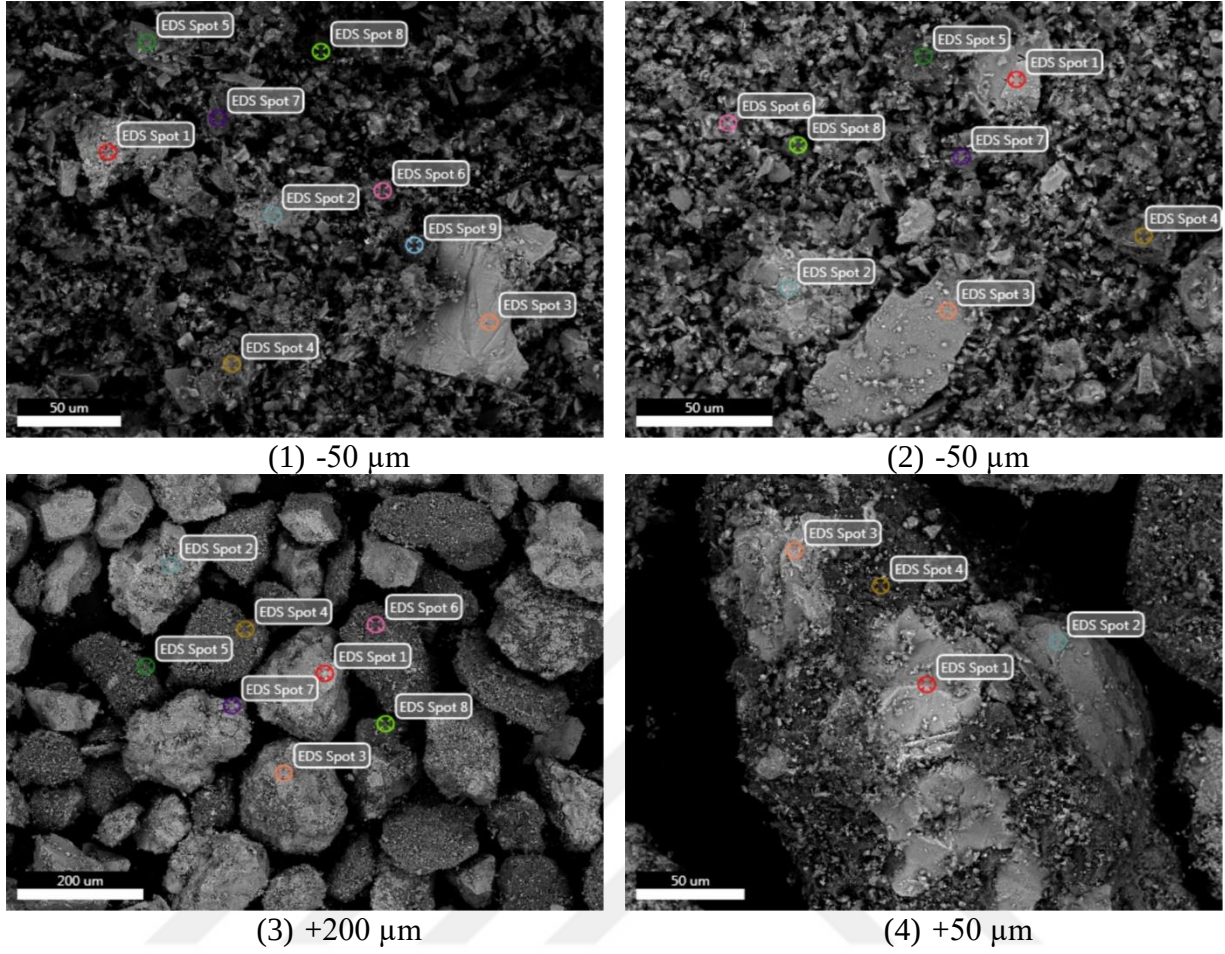
		O		S		Ca		Pb		Zn	
		%W	%A	%W	%A	%W	%A	%W	%A	%W	%A
-100 µm	1	13,10	50,43	12,17	23,37	1,59	2,45	71,29	21,19	0,00	0,00
	2	15,71	33,13	32,89	34,6	2,05	1,73	0,00	0,00	40,98	21,15
	3	18,16	38,65	28,45	30,21	2,37	2,02	0,00	0,00	43,7	22,76
	4	12,47	27,88	30,76	34,3	1,29	1,15	0,00	0,00	38,66	21,14
	5	21,75	59,38	10,37	14,12	4,66	5,08	56,23	11,85	0,00	0,00
	6	22,90	41,53	34,92	31,61	4,54	3,29	0,00	0,00	0,84	0,37
	7	45,21	63,4	0,61	0,42	19,45	10,89	0,00	0,00	0,00	0,00
	8	58,15	73,5	0,87	0,55	13,37	6,74	0,00	0,00	0,00	0,00

	9	52,75	66,36	0,00	0,00	0,52	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	56,84	65,52	0,58	0,34	23,87	10,98	0,00	0,00	0,00	0,00
	11	49,92	68,28	0,63	0,43	17,68	9,65	1,76	0,19	0,00	0,00
	12	48,52	64,85	1,2	0,8	13,65	7,28	0,00	0,00	0,00	0,00
	13	45,79	65,15	0,49	0,35	21,08	11,97	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ort.	35,48	55,24	11,84	13,16	9,7	5,65	9,95	2,56	9,55	5,03
-100 µm	1	25,54	65,51	9,94	12,72	4,85	4,96	55,17	10,93	0,00	0,00
	2	9,36	20,56	43,41	47,57	1,08	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	39,19	67,62	15,82	13,62	5,82	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	12,52	28,70	31,29	35,80	1,35	1,24	0,00	0,00	46,24	25,95
	5	53,66	67,54	1,61	1,01	2,40	1,21	0,00	0,00	0,00	0,00
	6	55,48	64,30	2,56	1,48	21,94	10,15	0,00	0,00	0,27	0,08
	7	46,92	66,28	0,76	0,54	22,43	12,65	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ort.	34,67	54,36	15,06	16,11	8,55	5,02	7,88	1,56	6,64	3,72
+500 µm	1	10,46	45,62	10,33	22,47	1,48	2,58	75,68	25,48	0,00	0,00
	2	9,06	41,60	10,42	23,88	1,65	3,02	76,78	27,23	0,00	0,00
	3	3,99	11,04	31,62	43,61	0,29	0,32	0,00	0,00	58,17	39,35
	4	5,11	13,85	30,71	41,50	0,43	0,46	0,00	0,00	58,75	38,94
	5	12,74	27,27	38,90	41,52	1,08	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00
	6	9,92	21,22	49,38	52,70	1,72	1,47	0,00	0,00	0,00	0,00
	7	48,78	62,08	0,61	0,39	36,26	18,42	0,00	0,00	0,00	0,00
	8	48,01	65,34	1,48	1,00	13,75	7,47	0,00	0,00	0,00	0,00
	9	40,17	58,23	0,88	0,64	24,22	14,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	13,81	30,73	31,28	34,73	1,23	1,09	0,00	0,00	46,02	25,07
	11	51,70	65,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	12	44,42	60,09	0,00	0,00	16,06	8,67	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ort.	24,85	41,86	17,13	21,87	8,18	4,87	12,71	4,39	13,58	8,61
+200 µm	1	8,49	41,20	11,30	27,37	0,36	0,69	79,15	29,66	0,00	0,00
	2	4,89	13,05	33,75	44,91	0,59	0,63	0,00	0,00	56,28	36,73
	3	6,21	14,10	51,05	57,86	0,88	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	54,51	65,32	0,00	0,00	32,78	15,68	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	46,81	60,79	0,00	0,00	0,73	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00
	6	32,64	52,26	0,00	0,00	29,02	18,55	0,00	0,00	0,00	0,00
	7	38,30	57,71	0,00	0,00	25,87	15,56	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ort.	27,41	43,49	13,73	18,59	12,89	7,47	11,31	4,24	8,04	5,25

Cu numunesi için EDS analiz sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.7, Tablo 4.4), 1. fotoğraf için ortalama %6,95, 2. fotoğraf için %5,36, 3. fotoğraf için %7,35 ve 4. fotoğraf için %11,76 Cu içeriği tespit edilmiştir. Numunenin demir ve kükürt oranının yüksek olduğu gözlenmiştir. Tabloda verilen elementlere ek olarak numunede Al, Si, Mg, K, Ca, Na, Ti ve Mn varlığına da rastlanmıştır.

Tablo 4. 4: Cu numunesinin EDS analiz sonuçları (%W: ağırlık, %A: atomik ağırlık)

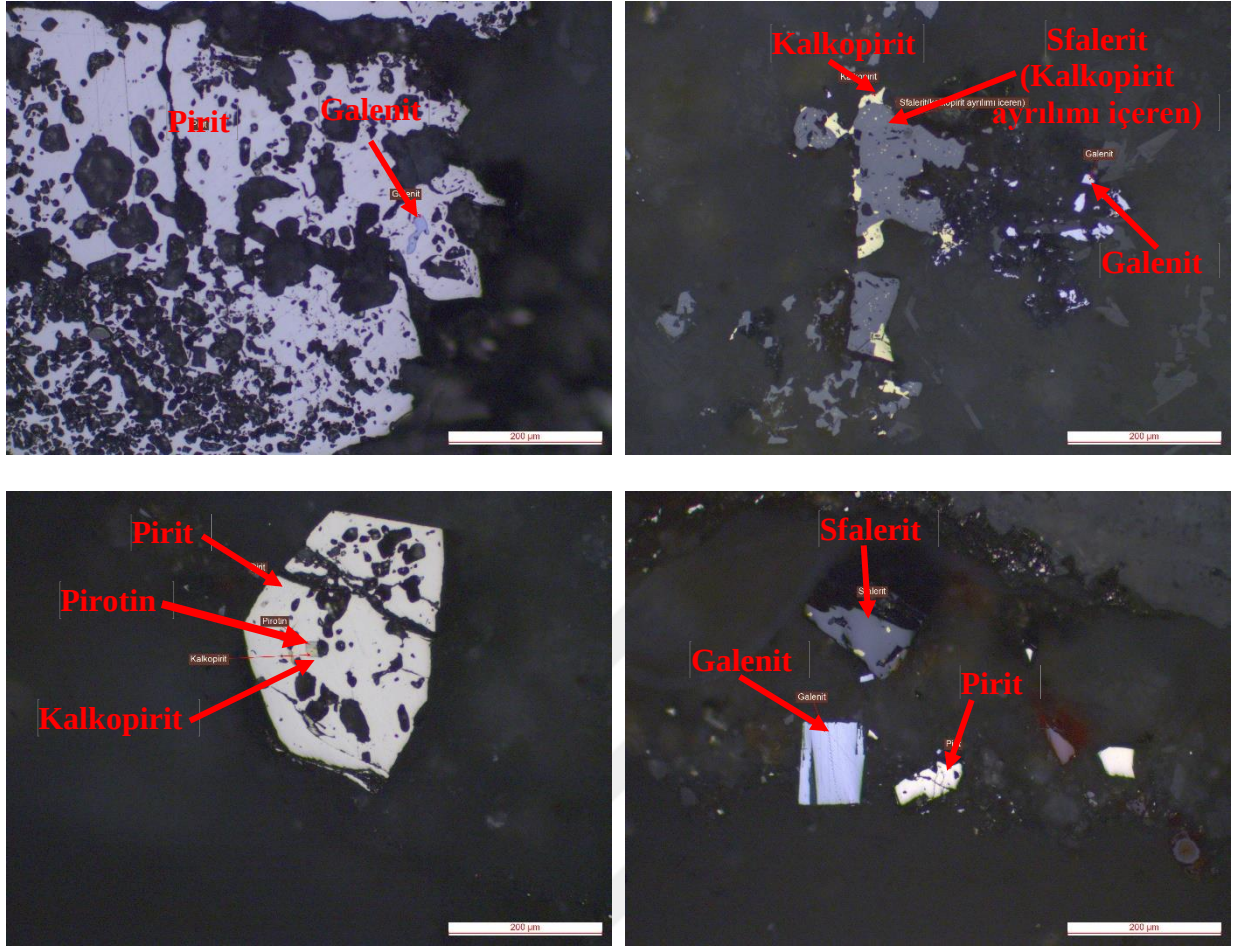
		O		S		Fe		Cu	
		%W	%A	%W	%A	%W	%A	%W	%A
-50 μm	1	1,74	4,70	36,18	48,71	41,51	32,09	19,97	13,57
	2	3,81	9,00	51,49	60,73	44,70	30,27	0,00	0,00
	3	2,95	7,98	33,69	45,46	31,06	24,06	31,74	21,61
	4	6,57	14,72	51,04	57,08	40,91	26,27	0,00	0,00
	5	16,66	33,86	32,53	33,00	34,65	20,18	8,15	4,17
	6	32,37	54,38	31,19	26,14	31,22	15,02	1,21	0,51
	7	44,48	59,66	1,07	0,71	5,89	2,26	0,00	0,00
	8	57,74	71,11	39,27	27,55	2,16	0,76	0,00	0,00
	9	49,98	65,85	29,75	22,33	7,18	2,71	1,45	0,48
	Ort.	24,04	35,70	34,02	35,75	26,59	17,07	6,95	4,48
-50 μm	1	3,25	8,27	41,96	53,26	38,30	27,91	16,48	10,56
	2	2,94	7,73	38,52	50,48	33,87	25,48	24,66	16,30
	3	5,19	11,94	52,20	59,95	42,62	28,11	0,00	0,00
	4	52,88	63,43	2,05	1,23	2,18	0,75	0,00	0,00
	5	48,69	63,19	1,57	1,02	2,88	1,07	0,00	0,00
	6	14,53	30,15	37,97	39,32	40,89	24,31	1,70	0,89
	7	45,26	63,90	1,49	1,05	22,21	8,98	0,00	0,00
	8	50,17	64,42	2,76	1,77	1,77	0,65	0,00	0,00
	Ort.	27,86	39,13	22,32	26,01	23,09	14,66	5,36	3,47
+200 μm	1	4,30	11,20	36,19	47,04	30,22	22,55	29,29	19,21
	2	4,00	10,50	34,53	45,24	31,01	23,32	29,54	19,53
	3	8,35	18,39	49,75	54,70	41,20	26,01	0,00	0,00
	4	49,40	64,82	2,27	1,48	11,77	4,42	0,00	0,00
	5	56,65	69,70	3,21	2,00	3,03	1,09	0,00	0,00
	6	42,74	57,04	2,05	1,36	1,81	0,69	0,00	0,00
	7	11,29	23,81	50,38	53,02	38,34	23,17	0,00	0,00
	8	45,84	60,76	2,75	1,82	3,74	1,42	0,00	0,00
	Ort.	27,82	39,53	22,64	25,83	20,14	12,84	7,35	4,84
+50 μm	1	9,36	21,72	35,09	40,64	26,53	17,64	25,40	14,85
	2	5,42	12,44	52,19	59,72	42,38	27,84	0,00	0,00
	3	15,30	32,00	30,66	32,00	24,27	14,54	21,62	11,39
	4	56,40	69,87	2,37	1,46	1,33	0,47	0,00	0,00
	Ort.	21,62	34,01	30,08	33,46	23,63	15,12	11,76	6,56



Şekil 4. 7: Cu numunesinin EDS analizine tabi tutulan SEM fotoğrafları

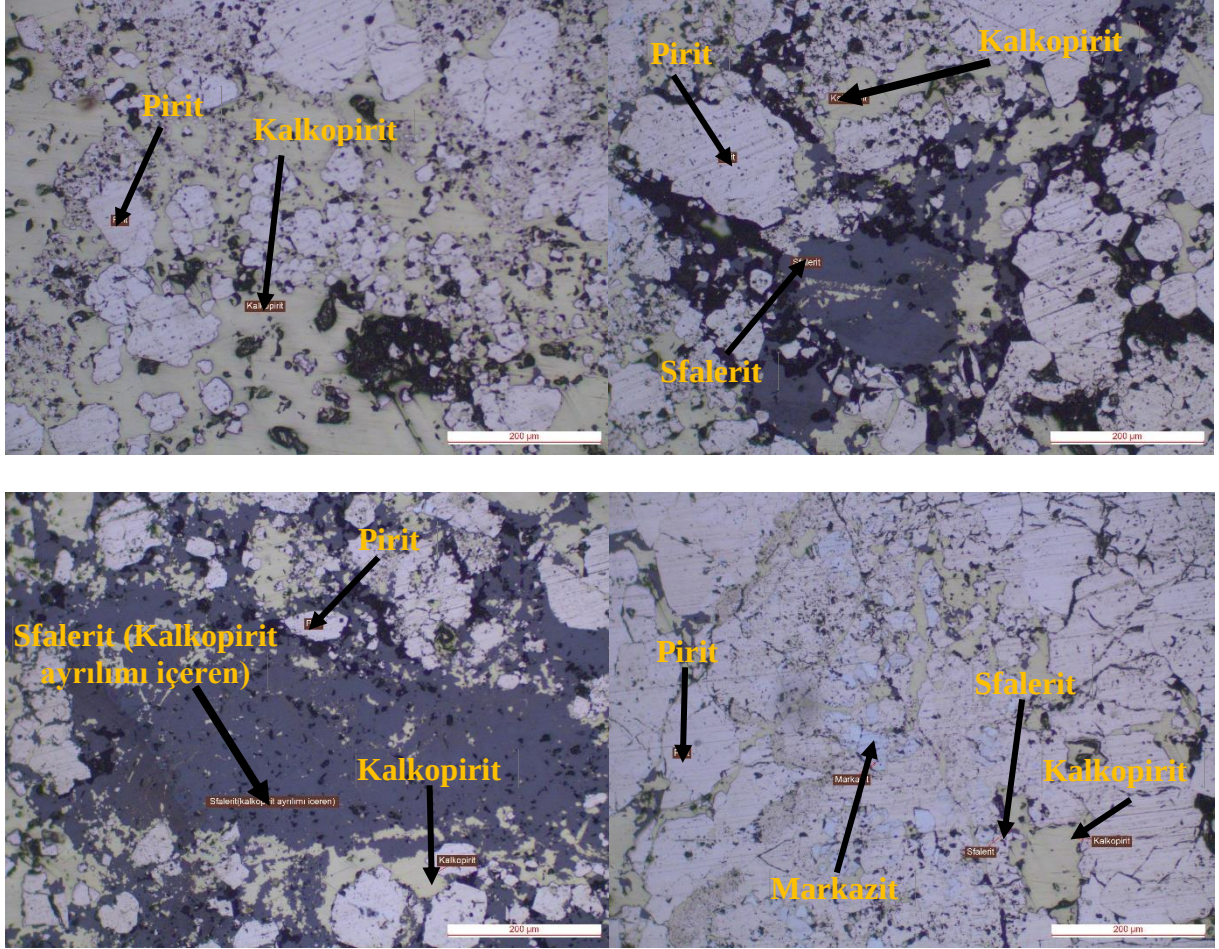
4.3.3. Parlak Kesit Çalışmaları

Pb-Zn numunesine ait parlak kesit fotoğrafları Şekil 4.8’de verilmiştir. Parlak kesit çalışmaları sonucunda Pb-Zn numunesinde galen, sfalerit ve çok az miktarda da pirit olduğu gözlenmiştir. Sfaleritler içerisinde kalkopirit (CuFeS_2) inklüzyonları ara parajenezi oluşturmaktadır ve özşekilsizdir. Galenler çatlaklı formda, özşekilsiz, izotropik olarak görülmektedir. Basınç ikizlenmeleri yoktur, çok basınca maruz kalmamıştır. Sfaleritler galene göre daha az orandadır. Kalkopirit inklüzyonludur. Gang mineralleri olarak anizotropik şekilde, yan kayacı temsil edecek formda kireçtaşı gözlenmektedir. Piritler parlak, özşekilsiz formdadır, açık renklidir, süngerimsi yapıdadır. Gang minerallerinin hakimiyeti söz konusudur. Küçük psedömorflar şeklinde, gang içerisinde kapanım olarak demir sülfürler görülmektedir. İkincil demir oksit boyamaları çatlaklar ve kırıklar noktasında mevcuttur. Galen az oranda bulunmaktadır.



Şekil 4. 8: Pb-Zn numunesine ait parlak kesit fotoğrafları

Cu numunesine ait parlak kesit fotoğrafları Şekil 4.9’da verilmiştir. Cu numunesi incelendiğinde, bakırın kalkopirit minerali formunda, psedömorf, rölyefli, çok yüksek, ince kristalen halinde ve küp sistemi kristalize olmuş şekilde olduğu görülmüştür. Bakırın mineral oranının oldukça düşük olduğu görülmüştür. Bir miktar kurşuna rastlanmıştır. Pirit kristalleri idiomorf yani özşekillidir. Hematit mineralleri iç yansımali olarak limonitleşmeye dönüşür haldeyken hematit minerallerine rastlanmıştır. Öz şekilsiz bir şekildedir, izotropiktir. Gang mineralleri anizotropik görüntüsüyle koyu renkli görülmektedir. Demir alterasyon olarak iç yansımayı yükseltmektedir. Demir oluşumu kataklastik dokulu ve damar dolgusu şeklinde ikincil formdadır.



Şekil 4. 9: Cu numunesine ait parlak kesit fotoğrafları

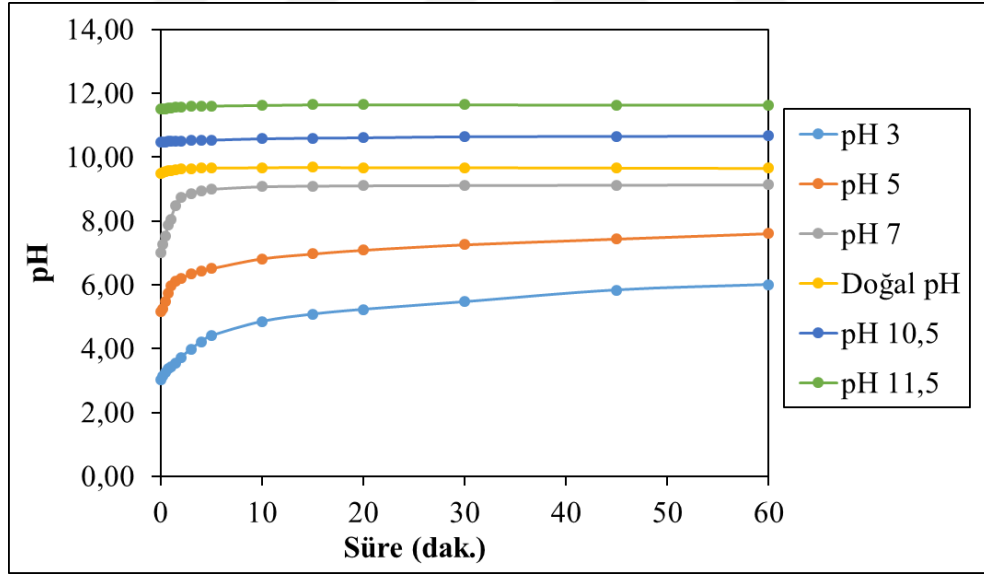
4.4. pH PROFİLİ

Tüvenan Pb-Zn (Tablo 4.5, Şekil 4.10) ve Cu (Tablo 4.6, Şekil 4.11) numunelerinin saf su içerisindeki pH profili çıkarılmıştır. Buna göre numunelerin süreye bağlı pH değişimi incelenmiştir.

Numunenin pH profilinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler numunenin kendi doğal pH'ı olan 9,49 ve pH 3, 5, 7, 10,5 ve 11,5'da yapılmıştır. Elde edilen pH profili incelendiğinde pH 3, pH 5 ve pH 7 deneylerinde numunenin pH değerinin belirli bir süre sonra bazik bölgede tampon bir pH değerine (pH 8 civarında) ulaşma eğilimi göstermeye başladığı görülmüştür. Deneylerde incelenen bazik pH değerleri olan pH 10,5 ve pH 11,5'da ise zamana bağlı çok önemli bir değişim görülmemiştir. Bunun nedeni numunenin yüksek karbonat içeriği nedeniyle bazik bir yapıda olması ve numuneden çözünerek çözeltiliye geçen katyonların kısıtlı miktarda olması ile açıklanabilmektedir.

Tablo 4. 5: Pb-Zn numunesinin saf su içerisinde süreye bağlı pH profili

Süre (dak.)	pH 3	pH 5	pH 7	Doğal pH	pH 10,5	pH 11,5
0,00	3,03	5,15	7,01	9,49	10,47	11,50
0,25	3,13	5,26	7,26	9,52	10,47	11,50
0,50	3,27	5,47	7,52	9,55	10,48	11,52
0,75	3,36	5,73	7,88	9,57	10,49	11,53
1,00	3,42	5,97	8,06	9,59	10,50	11,54
1,50	3,56	6,11	8,48	9,60	10,51	11,56
2,00	3,72	6,19	8,74	9,63	10,51	11,57
3,00	3,98	6,34	8,87	9,64	10,52	11,59
4,00	4,22	6,44	8,94	9,65	10,53	11,60
5,00	4,40	6,51	9,00	9,66	10,54	11,61
10,00	4,85	6,82	9,08	9,67	10,58	11,63
15,00	5,08	6,97	9,10	9,68	10,60	11,65
20,00	5,23	7,09	9,11	9,67	10,61	11,65
30,00	5,47	7,26	9,12	9,67	10,64	11,65
45,00	5,84	7,44	9,13	9,66	10,65	11,64
60,00	6,01	7,61	9,14	9,65	10,66	11,64

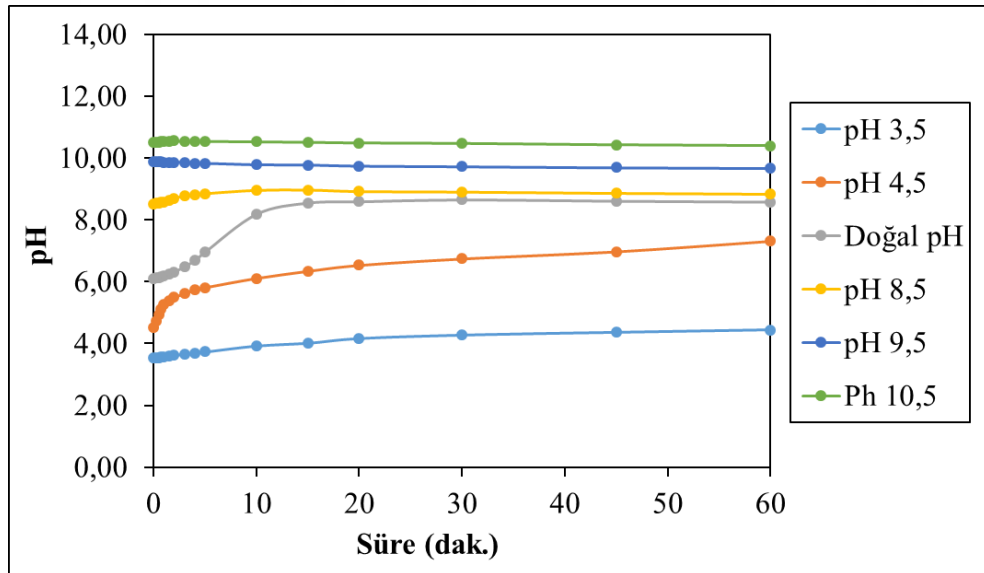
**Şekil 4. 10:** Pb-Zn numunesinin pH profili

Numunenin pH profilinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler numunenin kendi doğal pH'ı olan 6,11 ve pH 3,5, 4,5, 8,5, 9,5 ve 10,5'da yapılmıştır. Elde edilen pH profili incelendiğinde pH 4,5, pH 8,5, pH 9,5 ve pH 10,5 deneylerinde numunenin pH değerinin belirli bir süre sonra bazik bölgede tampon bir pH değerine (pH 8 civarında) ulaşma eğilimi göstermeye başladığı görülmüştür. Deneylerde incelenen asidik pH değeri olan 3,5'da ise zamana bağlı çok önemli bir değişim görülmemiştir. Bunun nedeni numunenin yüksek SO_3^-

iyon içeriği nedeniyle asidik özellik göstermesi ve numuneden çözünerek çözeltiye geçen anyonların kısıtlı miktarda olması ile açıklanabilmektedir.

Tablo 4. 6: Cu numunesinin saf su içerisinde süreye bağlı pH profili

Süre (dak.)	pH 3,5	pH 4,5	Doğal pH	pH 8,5	pH 9,5	pH 10,5
0,00	3,53	4,51	6,11	8,52	9,88	10,50
0,25	3,53	4,72	6,13	8,53	9,88	10,50
0,50	3,54	4,95	6,14	8,55	9,87	10,51
0,75	3,56	5,11	6,17	8,57	9,87	10,53
1,00	3,57	5,26	6,18	8,58	9,86	10,54
1,50	3,60	5,38	6,26	8,63	9,86	10,55
2,00	3,62	5,49	6,32	8,70	9,86	10,56
3,00	3,66	5,62	6,48	8,77	9,84	10,54
4,00	3,69	5,73	6,69	8,82	9,81	10,53
5,00	3,73	5,81	6,96	8,85	9,82	10,54
10,00	3,92	6,11	8,19	8,96	9,78	10,53
15,00	4,01	6,34	8,55	8,97	9,77	10,51
20,00	4,16	6,53	8,59	8,92	9,74	10,49
30,00	4,27	6,74	8,65	8,90	9,72	10,47
45,00	4,36	6,97	8,61	8,86	9,69	10,42
60,00	4,44	7,31	8,58	8,83	9,67	10,39



Şekil 4. 11: Cu numunesinin pH profili

4.5. LİÇ DENEYLERİ

Balıkesir Balya bölgesinden alınan Pb-Zn numuneleri ve Kastamonu Küre bölgesinden alınan Cu numuneleriyle yapılan liç deneylerinde Pb, Zn ve Cu içeriklerinin yüksek verimle kazanılması amaçlanmıştır. Konuyla ilgili önceden yapılmış olan çalışmalarda elde edilmiş olan bulgular incelenip, numunelerin kimyasal özellikleri de göz önünde bulundurularak deneylerde çözücü reaktif olarak H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 çözeltilerinin denenmesi uygun görülmüştür. Her bir çözelti için tane boyutu, katı oranı, liç süresi, çözücü konsantrasyonu ve pülp sıcaklığının Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerine etkileri incelenmiştir.

4.5.1. Tane Boyutunun Etkisi

Deney koşulları:

Tane boyutu: 150 μm , 106 μm , 75 μm

Asit dozajı: 1M

Katı Oranı: %20

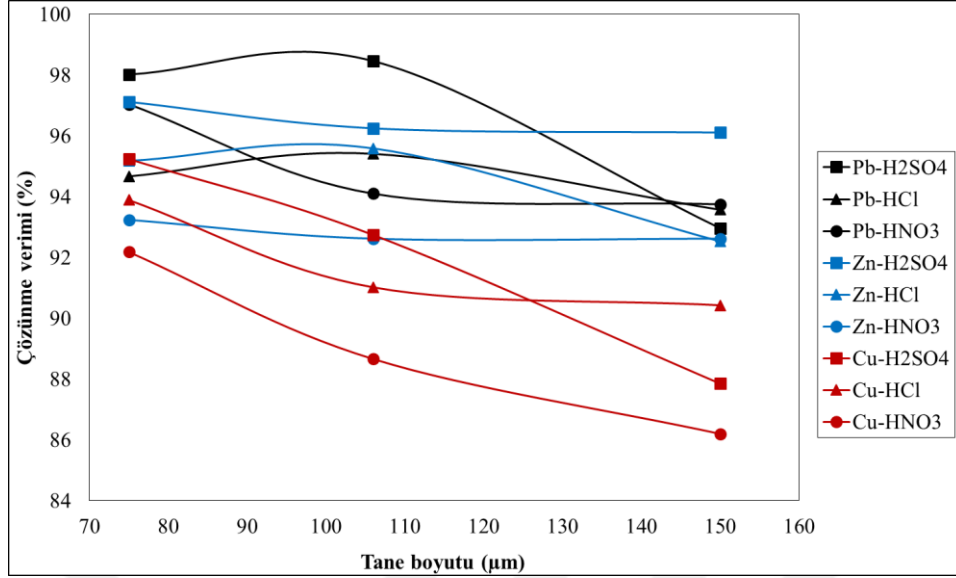
Liç süresi: 2 saat

Sıcaklık: 25°C

Karıştırma hızı: 250 dev/dak

Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin tane boyutuna göre değişim grafiği Şekil 4.12’de verilmiştir.

Şekil 4.12’de görülen sonuçlara göre, en yüksek Pb çözünme verimleri H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 deneyleri için sırasıyla %98,46, %95,41 ve %97,04 olarak bulunmuş ve sırasıyla 106 μm , 106 μm ve 75 μm tane boyutunda yapılan deney şartlarında gerçekleşmiş; en yüksek Zn çözünme verimleri sırasıyla %97,12, %95,59 ve %93,24 olarak bulunmuş ve sırasıyla 75 μm , 106 μm ve 75 μm tane boyutunda yapılan deney şartlarında gerçekleşmiş; en yüksek Cu çözünme verimleri sırasıyla %95,24, %93,89 ve %92,18 olarak bulunmuş ve 75 μm , 75 μm ve 75 μm tane boyutunda yapılan deney şartlarında gerçekleşmiştir. H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 liç deneylerinde Pb için optimum tane boyutları sırasıyla 106 μm , 106 μm ve 75 μm ; Zn için optimum tane boyutları sırasıyla 75 μm , 106 μm ve 75 μm ; Cu için optimum tane boyutları tüm deneyler için 75 μm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 12: Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin tane boyutuna göre değişim grafiği

4.5.2. Katı Oranının Etkisi

Deney koşulları:

Tane boyutu: 106 µm (H₂SO₄ liçi (Pb) ve HCl liçi (Pb ve Zn)), 75 µm (H₂SO₄ liçi (Zn ve Cu) HCl liçi (Cu) ve HNO₃ liçi (Pb, Zn ve Cu))

Katı Oranı: %5, %10, %15, %20, %25

Asit dozajı: 1M

Liç süresi: 2 saat

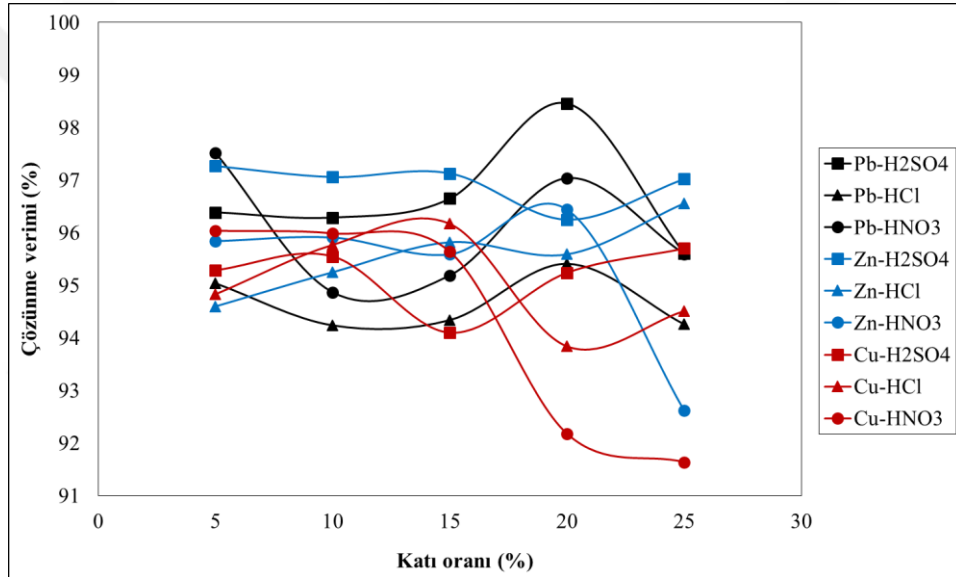
Sıcaklık: 25°C

Karıştırma hızı: 250 dev/dak

Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin katı oranına göre değişim grafiği Şekil 4.13'de verilmiştir.

Şekil 4.13'de görülen sonuçlara göre, en yüksek Pb çözünme verimleri H₂SO₄, HCl ve HNO₃ deneyleri için sırasıyla % 98,46, % 95,41 ve %97,52 olarak bulunmuş ve sırasıyla %20, %20 ve %5 katı oranı ile yapılan deney koşullarında gerçekleşmiş; en yüksek Zn çözünme verimleri %97,27, %96,56 ve %96,44 olarak bulunmuş ve sırasıyla %5, %25 ve %20 katı oranı ile yapılan deney koşullarında gerçekleşmiş; en yüksek Cu çözünme verimleri sırasıyla %95,70, %96,17 ve %96,04 olarak bulunmuş ve sırasıyla %25, %15 ve %5 katı oranı ile yapılan deney koşullarında gerçekleşmiştir. Pb çözünme verimleri incelendiğinde, H₂SO₄ ve HCl deneyleri için optimum katı oranı, en yüksek verimlerin de elde edildiği %20 olarak

belirlenmiş; HNO_3 liç deneylerinde %5 ve %20 katı oranlarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen çözünme verimleri arasında önemli bir fark görülmediğinden, optimum katı oranı %20 olarak belirlenmiştir. Zn çözünme verimleri incelendiği zaman, H_2SO_4 liç deneylerinde %5 ve %15 katı oranlarında elde edilen çözünme verimleri arasında önemli bir fark görülmediğinden optimum katı oranı %15 olarak belirlenmiştir. HCl ve HNO_3 liç deneylerinde ise optimum katı oranı %25 ve %20 olarak belirlenmiştir. Cu çözünme verimleri incelendiği zaman, HNO_3 liç deneylerinde %5 ve %15 katı oranlarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen çözünme verimleri arasında önemli bir fark görülmediğinden optimum katı oranı %15 olarak belirlenmiştir. H_2SO_4 ve HCl liç deneyleri için optimum katı oranı, en yüksek çözünme verimlerinin de elde edildiği %25 ve %15 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 13: Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin katı oranına göre değişim grafiği

4.5.3. Liç Süresinin Etkisi

Deney koşulları:

Tane boyutu: 106 μm (H_2SO_4 liçi (Pb) ve HCl liçi (Pb ve Zn)), 75 μm (H_2SO_4 liçi (Zn ve Cu) HCl liçi (Cu) ve HNO_3 liçi (Pb, Zn ve Cu))

Katı Oranı: %15 (H_2SO_4 liçi (Zn), HCl liçi (Cu) ve HNO_3 liçi (Cu)), %20 (H_2SO_4 liçi (Pb), HCl liçi (Pb) ve HNO_3 liçi (Pb ve Zn)), %25 (H_2SO_4 liçi (Cu), HCl liçi (Zn))

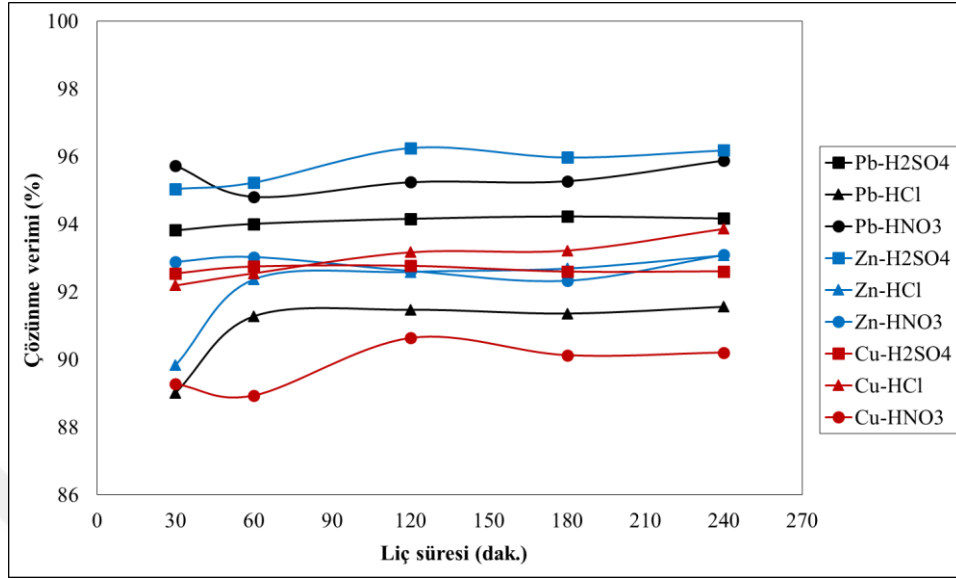
Liç süresi: 30 dak, 60 dak, 120 dak, 180 dak, 240 dak

Asit dozajı: 1M

Sıcaklık: 25°C

Karıştırma hızı: 250 dev/dak

Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin liç süresine göre değişim grafiği Şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4. 14: Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin liç süresine göre değişim grafiği

Şekil 4.14’de görülen sonuçlara göre, en yüksek Pb çözünme verimleri H₂SO₄, HCl ve HNO₃ deneyleri için sırasıyla %94,23, %91,56 ve %95,88 olarak bulunmuş ve sırasıyla 180 dak, 240 dak ve 240 dak liç süresi ile yapılan deney koşullarında gerçekleşmiş; en yüksek Zn çözünme verimleri %96,25, %93,08 ve %93,09 olarak bulunmuş ve sırasıyla 120 dak, 240 dak ve 240 dak liç süresi ile yapılan deney koşullarında gerçekleşmiş; en yüksek Cu çözünme verimleri sırasıyla %92,77, %93,86 ve %90,64 olarak bulunmuş ve sırasıyla 120 dak, 240 dak ve 120 dak liç süresi ile yapılan deney koşullarında gerçekleşmiştir. H₂SO₄, HCl ve HNO₃ deneylerinde Pb için optimum liç süreleri sırasıyla 120 dak, 120 dak ve 30 dak; Zn için 120 dak, 60 dak ve 60 dak; Cu için de 60 dak, 120 dak ve 120 dak olarak belirlenmiştir. Optimum süreler belirlenirken, hem en yüksek çözünme verimi ile aralarında önemli bir fark olmaması hem de liç süresinden kaynaklı maliyet ve zamanda kayıp dikkate alınmıştır.

4.5.4. Asit Dozajının Etkisi

Deney koşulları:

Tane boyutu: 106 µm (H₂SO₄ liçi (Pb) ve HCl liçi (Pb ve Zn)), 75 µm (H₂SO₄ liçi (Zn ve Cu) HCl liçi (Cu) ve HNO₃ liçi (Pb, Zn ve Cu))

Katı Oranı: %15 (H₂SO₄ liçi (Zn), HCl liçi (Cu) ve HNO₃ liçi (Cu)), %20 (H₂SO₄ içi (Pb), HCl liçi (Pb) ve HNO₃ liçi (Pb ve Zn)), %25 (H₂SO₄ liçi (Cu), HCl liçi (Zn))

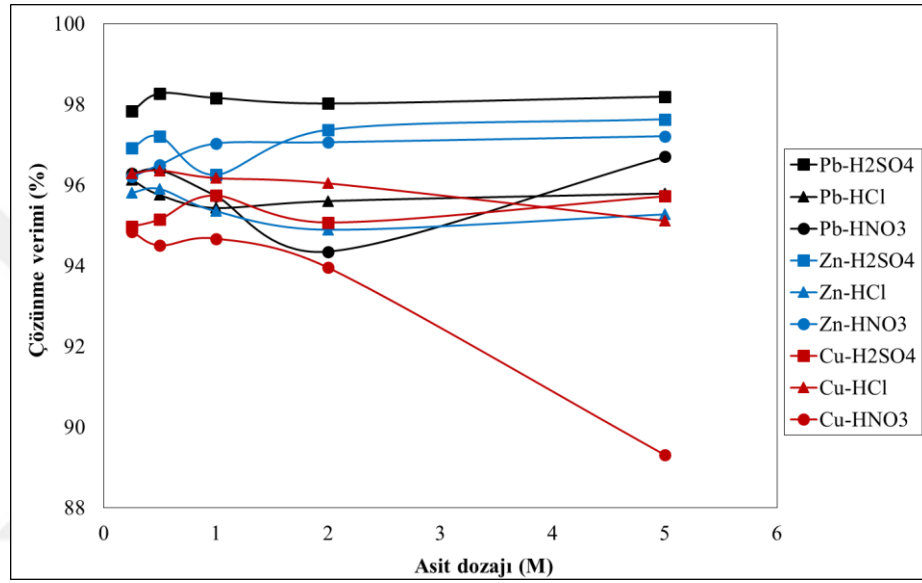
Liç süresi: 30 dak (HNO_3 liçi (Pb)), 60 dak (H_2SO_4 liçi (Cu), HCl liçi (Zn) ve HNO_3 liçi (Zn)), 120 dak (H_2SO_4 liçi (Pb, Zn), HCl liçi (Pb, Cu), HNO_3 liçi (Cu))

Asit dozajı: 0,25 M, 0,5 M, 1 M, 2 M, 5 M

Sıcaklık: 25°C

Karıştırma hızı: 250 dev/dak

Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin asit dozajına göre değişim grafiği Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4. 15: Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin asit dozajına göre değişim grafiği

Şekil 4.15’de görülen sonuçlara göre, en yüksek Pb çözünme verimleri H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 deneyleri için sırasıyla % 98,27 % 96,13 ve %96,70 olarak bulunmuş ve sırasıyla 0,5 M, 0,25 M ve 5 M asit dozajı ile yapılan deney koşullarında gerçekleşmiş; en yüksek Zn çözünme verimleri %97,63, %95,90 ve %97,21 olarak bulunmuş ve sırasıyla 5 M, 0,5 M ve 5 M asit dozajı ile yapılan deney koşullarında gerçekleşmiş; en yüksek Cu çözünme verimleri sırasıyla %95,74, %96,36 ve %94,84 olarak bulunmuş ve sırasıyla 1 M, 0,5 M ve 0,25 M asit dozajı ile yapılan deney koşullarında gerçekleşmiştir. H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 deneylerinde Pb için optimum asit dozajları sırasıyla 0,5 M, 0,25 M ve 0,5 M; Zn için 0,5 M, 0,5 M ve 1 M; Cu için de 1 M, 0,5 M ve 0,25 M olarak belirlenmiştir.

4.5.5. Pülp sıcaklığının etkisi

Deney koşulları:

Tane boyutu: 106 μm (H_2SO_4 liçi (Pb) ve HCl liçi (Pb ve Zn)), 75 μm (H_2SO_4 liçi (Zn ve Cu) HCl liçi (Cu) ve HNO_3 liçi (Pb, Zn ve Cu))

Katı Oranı: %15 (H_2SO_4 liçi (Zn), HCl liçi (Cu) ve HNO_3 liçi (Cu)), %20 (H_2SO_4 içi (Pb), HCl liçi (Pb) ve HNO_3 liçi (Pb ve Zn)), %25 (H_2SO_4 liçi (Cu), HCl liçi (Zn))

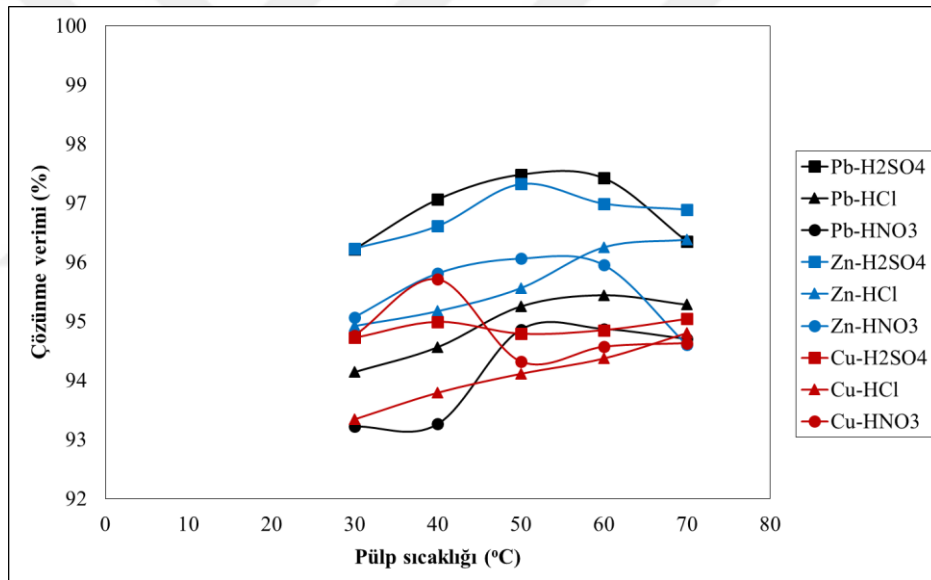
Liç süresi: 30 dak (HNO_3 liçi (Pb)), 60 dak (H_2SO_4 liçi (Cu), HCl liçi (Zn) ve HNO_3 liçi (Zn)), 120 dak (H_2SO_4 liçi (Pb, Zn), HCl liçi (Pb, Cu), HNO_3 liçi (Cu))

Asit dozajı: 0,25 M (HCl liçi (Pb) ve HNO_3 liçi (Cu)), 0,5 M (H_2SO_4 liçi (Pb ve Zn), HCl liçi (Zn ve Cu), HNO_3 liçi (Pb)), 1 M (H_2SO_4 liçi (Cu) ve HNO_3 liçi (Zn))

Sıcaklık: 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C

Karıştırma hızı: 250 dev/dak

Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin pülp sıcaklığına göre değişim grafiği Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4. 16: Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin pülp sıcaklığına göre değişim grafiği

Şekil 4.16'da görülen sonuçlara göre, en yüksek Pb çözünme verimleri H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 deneyleri için sırasıyla % 97,48 % 95,44 ve %94,87 olarak bulunmuş ve sırasıyla 50 °C, 60 °C ve 60 °C pülp sıcaklığı ile yapılan deney koşullarında gerçekleşmiş; en yüksek Zn çözünme verimleri %97,32, %96,38 ve %96,06 olarak bulunmuş ve sırasıyla 50 °C, 70 °C ve 50 °C pülp sıcaklığı ile yapılan deney koşullarında gerçekleşmiş; en yüksek Cu çözünme verimleri sırasıyla %95,04, %94,80 ve %95,71 olarak bulunmuş ve sırasıyla 70 °C, 70 °C ve 40 °C pülp sıcaklığı ile yapılan deney koşullarında gerçekleşmiştir. H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 deneylerinde

Pb, Zn ve Cu için optimum pülp sıcaklıkları en yüksek verimin elde edildiği sıcaklıklar olarak belirlenmiştir.

5. TARTIŞMA

5.1. KİNETİK ANALİZ

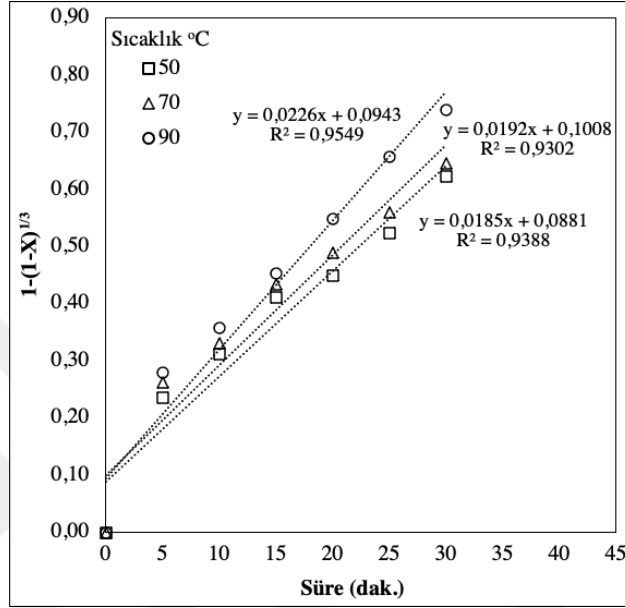
Liç kinetiğinin incelenmiş olduğu deneylerde, Pb, Zn ve Cu için H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 deneylerinden elde edilmiş olan sonuçlara ilgili kinetik modeller uygulanarak çözünme hızının sıcaklığa bağlı olarak değişimi ortaya konmaya çalışılmıştır. Her numune ve her asit için $-106+75\ \mu m$ tane boyutu, 1 M asit dozajı, %20 katı oranı, 0-30 dak liç süresi, 50-90 °C pülp sıcaklığı, 250 dev/dak karıştırma hızı koşullarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Söz konusu asit ortamlarında farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen liç deneyleri sonucunda çözünme işleminin hangi çözünme modeline uygun olduğunu tespit etmek amacıyla küçülen çekirdek modelinde kimyasal kontrollü durum için Bölüm 2.3’de verilmiş olan (2.10) denklemi, difüzyon kontrollü durum için (2.13) denklemi ve küçülen partikül modelinde film difüzyonu olarak kontrol edildiği durum için (2.16) denklemleri kullanılmıştır. Elde edilen korelasyon katsayılarına göre kinetik modeller belirlenmiştir. Söz konusu kinetik modellere ait görünür hız sabiti değerlerinin doğal logaritması alınmış ve $1/T$ değerlerine oranlayarak grafiklendirilmiştir. Grafikteki doğrunun eğimi $-E_a/R$ ’ye eşit olduğu için, bu değerden yola çıkılarak liç prosesinin aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır.

Aktivasyon enerjisi hidrometalurjik proseslerde belirlenen kinetik modeli doğrulamak için kullanılabilecek önemli parametrelerden biridir. Eğer aktivasyon enerjisi 12 kJ/mol’dan düşük ise proses difüzyon kontrollü, 12-39 kJ/mol aralığında ise karışık kontrollü, 39 kJ/mol’dan yüksek ise kimyasal kontrollüdür denir (Adebayo ve Olasehinde, 2015).

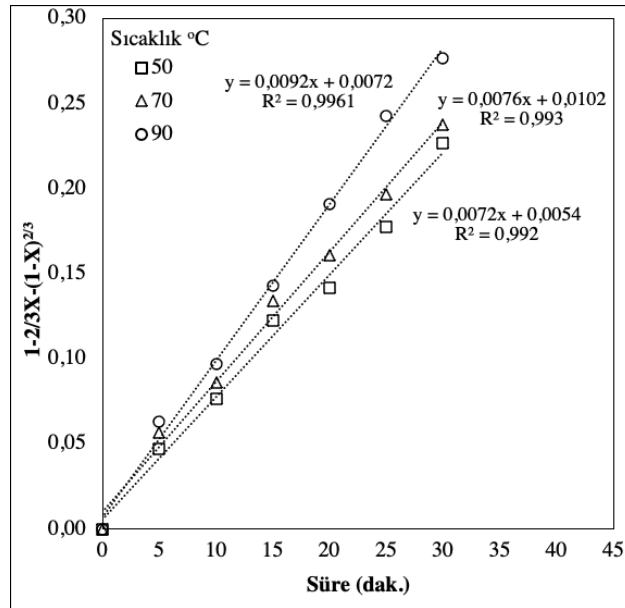
5.1.1. Pb liç deneylerinin kinetik analizi

5.1.1.1. H_2SO_4 deneyleri için liç kinetiği

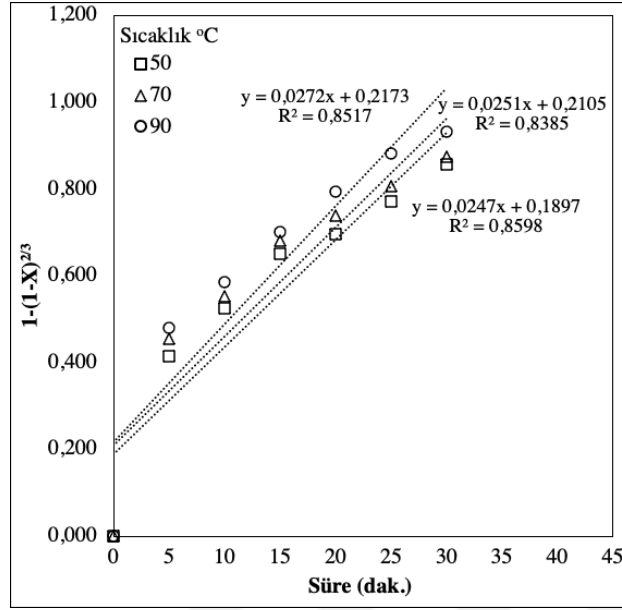
Kinetik analiz çalışmaları kapsamında H_2SO_4 ortamında farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimlerine kimyasal model, difüzyon modeli ve film difüzyonu modeli uygulanmıştır (Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3).



Şekil 5. 1: H_2SO_4 ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği



Şekil 5. 2: H_2SO_4 ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği



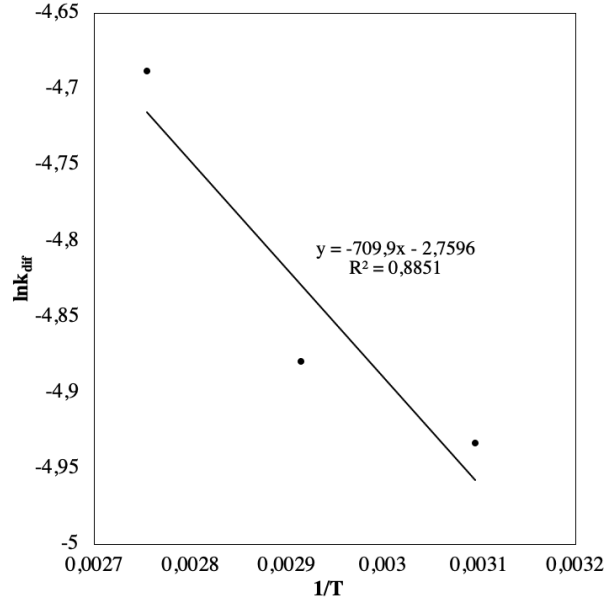
Şekil 5. 3: H₂SO₄ ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği

Grafiklerden elde edilen doğruların eğimlerinden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanarak her bir sıcaklık ve her bir çözünme modeli için Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5. 1: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (H₂SO₄ liçi-Pb)

Sıcaklık (°C)	Kimyasal Kontrollü Model $1-(1-X)^{1/3}$		Difüzyon Kontrollü Model $1-2/3X-(1-X)^{2/3}$		Film Difüzyon Modeli $1-(1-X)^{2/3}$	
	Görünür hız sabiti (k_s)	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_{dif})	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_d)	Korelasyon katsayısı (R^2)
50	0,0185	0,9388	0,0072	0,9920	0,0247	0,8598
70	0,0192	0,9302	0,0076	0,9930	0,0251	0,8385
90	0,0226	0,9549	0,0092	0,9961	0,0272	0,8517

Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Tablo 5.1 incelendiği zaman 50-90 °C aralığında Pb çözünmesinin Küçülen Çekirdek Modeli’nde difüzyon kontrollü modele uyduğu görülmektedir. H₂SO₄ ile Pb liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği Şekil 5.4’de verilmiştir.

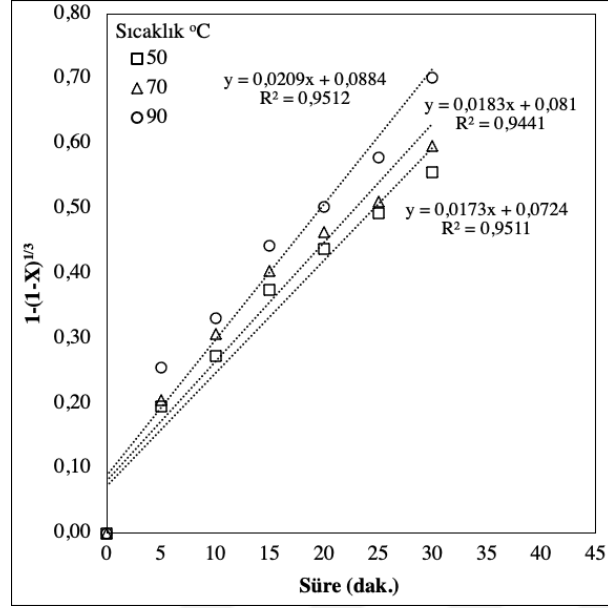


Şekil 5. 4: H₂SO₄ ile gerçekleştirilen Pb liçi için Arrhenius grafiği

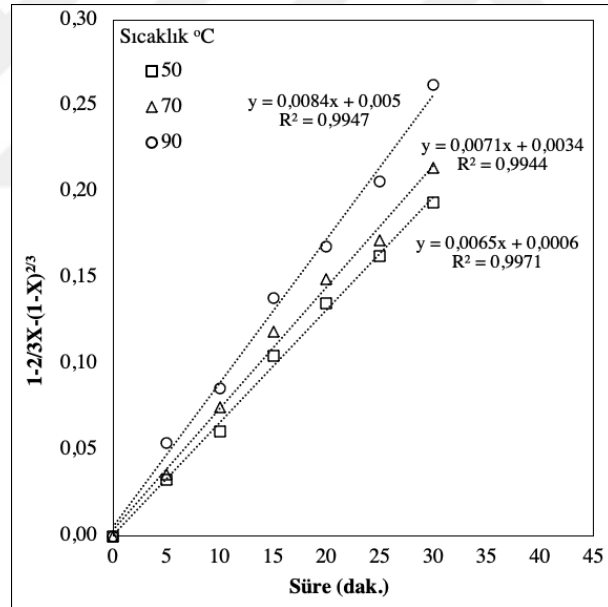
Şekil 5.4’de verilmiş olan Arrhenius grafiğinden elde edilmiş olan doğrunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi 5,902 kJ/mol’dür. Markovic ve Ptitsyn 1998 yılında yapmış oldukları çalışmalarında prosesin görünen aktivasyon enerjisini 12,8 kJ/mol olarak hesaplamışlardır. Dutrizac ve Chen 1994 yılında yapmış oldukları çalışmalarında görünen aktivasyon enerjisini 61,2 kJ/mol olarak hesaplamış ve sıcaklık arttıkça reaksiyonun da hızla arttığını bildirmişlerdir.

5.1.1.2. HCl deneyleri için liç kinetiği

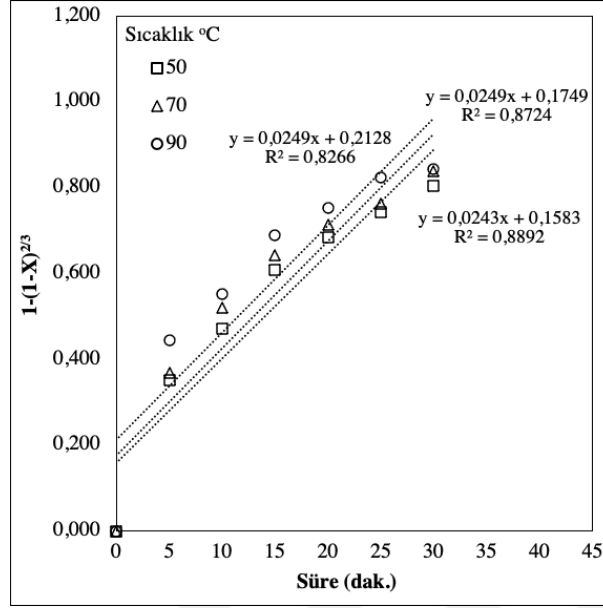
Kinetik analiz çalışmaları kapsamında HCl ortamında farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimlerine kimyasal model, difüzyon modeli ve film difüzyonu modeli uygulanmıştır (Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7).



Şekil 5. 5: HCl ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği



Şekil 5. 6: HCl ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği



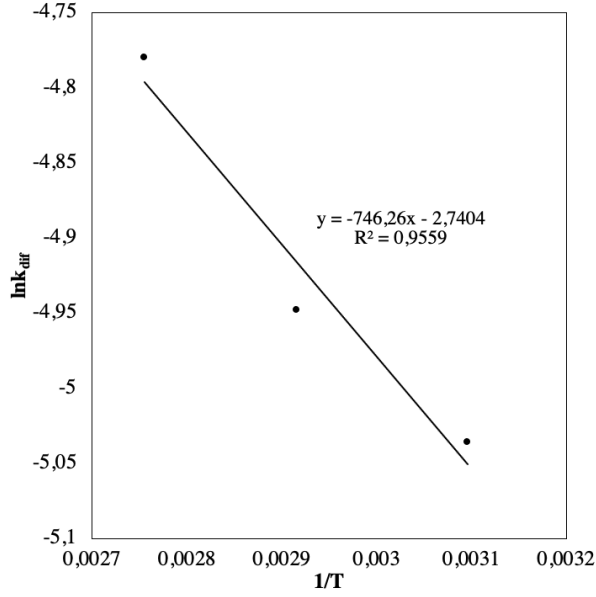
Şekil 5. 7: HCl ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği

Grafiklerden elde edilen doğruların eğimlerinden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanarak her bir sıcaklık ve her bir çözünme modeli için Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5. 2: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (HCl liçi-Pb)

Sıcaklık (°C)	Kimyasal Kontrollü Model $1-(1-X)^{1/3}$		Difüzyon Kontrollü Model $1-2/3X-(1-X)^{2/3}$		Film Difüzyon Modeli $1-(1-X)^{2/3}$	
	Görünür hız sabiti (k_s)	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_{dif})	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_d)	Korelasyon katsayısı (R^2)
50	0,0173	0,9511	0,0065	0,9971	0,0243	0,8892
70	0,0183	0,9441	0,0071	0,9944	0,0249	0,8724
90	0,0209	0,9512	0,0084	0,9947	0,0249	0,8266

Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Tablo 5.2 incelendiği zaman 50-90 °C aralığında Pb çözünmesinin Küçülen Çekirdek Modeli’nde difüzyon kontrollü modele uyduğu görülmektedir. HCl ile Pb liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği Şekil 5.8’de verilmiştir.

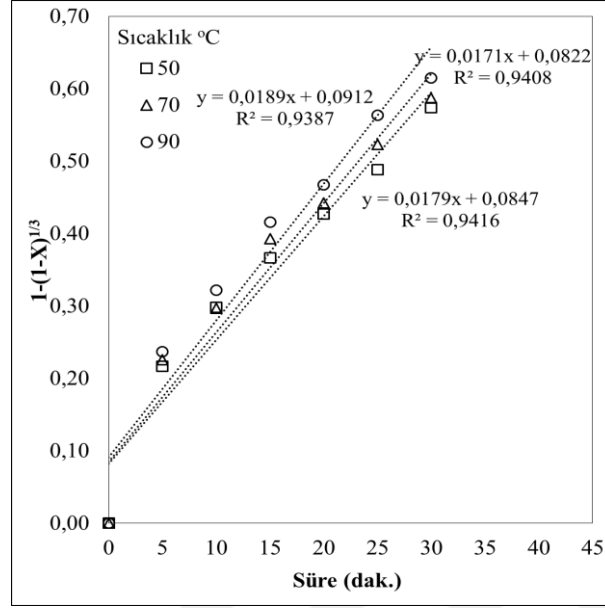


Şekil 5. 8: HCl ile gerçekleştirilen Pb liçi için Arrhenius grafiği

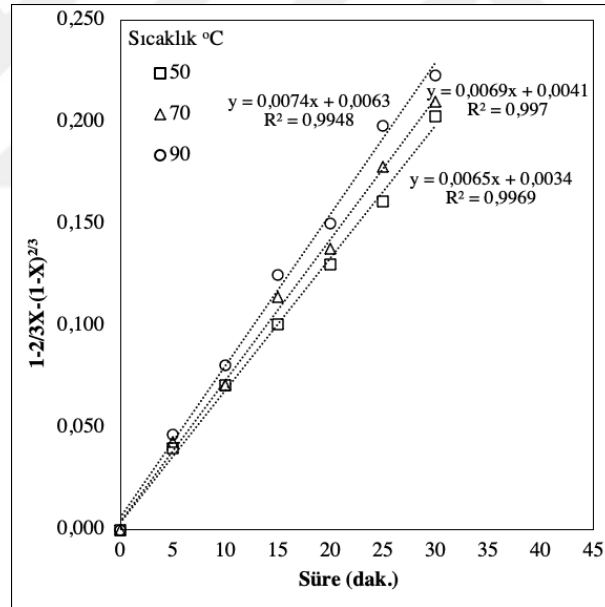
Şekil 5.8’de verilen Arrhenius grafiğinden elde edilmiş olan doğrunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi 6,204 kJ/mol’dür. Baba ve Adekola 2012 yılında yapmış oldukları çalışmalarında aktivasyon enerjisini 38.74 kJ/mol olarak hesaplamışlardır ve galen çözünme mekanizmasının, çözünme işlemi için hız kontrol adımı olarak yüzey kimyasal reaksiyonu ile difüzyon kontrollü mekanizma için küçülen çekirdek modelini takip etmek üzere kurulduğunu belirtmişlerdir. Baba ve Adekola 2011 yılında yapmış oldukları çalışmada 0.3 M FeCl₃/8.06 M HCl ortamında aktivasyon enerjisini 26.5 kJ/mol olarak hesaplamışlardır ve liç reaksiyonu için yüzey difüzyon modelini önermişlerdir. 8,06 M H₂O₂/8,06 M HCl ortamında aktivasyon enerjisini 40.6 kJ/mol olarak hesaplamışlardır ve liç reaksiyonu için yüzey kimyasal reaksiyon modelini önermişlerdir. Nunez ve ark. 1990 yılında yapmış oldukları çalışmalarında aktivasyon enerjisini 58.5 kJ/mol olarak hesaplamışlar ve hidroklorik asidin aktivitesini arttırmak için kullanılan klorürden bağımsız olduğunu belirtmişlerdir.

5.1.1.3. HNO₃ deneyleri için liç kinetiği

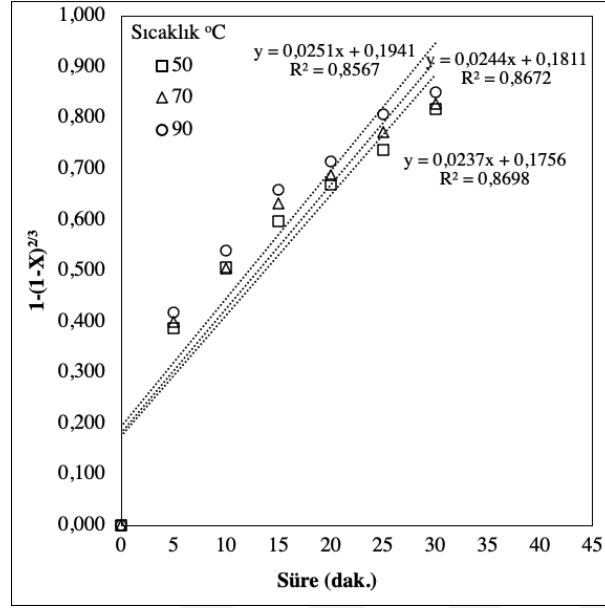
Kinetik analiz çalışmaları kapsamında HNO₃ ortamında farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimlerine kimyasal model, difüzyon modeli ve film difüzyonu modeli uygulanmıştır (Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11).



Şekil 5. 9: HNO₃ ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği



Şekil 5. 10: HNO₃ ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği



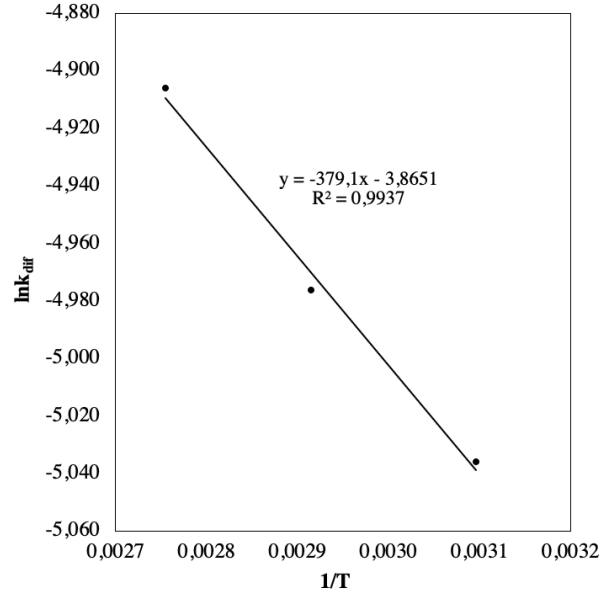
Şekil 5. 11: HNO₃ ile Pb liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği

Grafiklerden elde edilen doğruların eğimlerinden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanarak her bir sıcaklık ve her bir çözünme modeli için Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5. 3: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (HNO₃ liçi-Pb)

Sıcaklık (°C)	Kimyasal Kontrollü Model $1-(1-X)^{1/3}$		Difüzyon Kontrollü Model $1-2/3X-(1-X)^{2/3}$		Film Difüzyon Modeli $1-(1-X)^{2/3}$	
	Görünür hız sabiti (k_s)	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_{dif})	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_d)	Korelasyon katsayısı (R^2)
50	0,0179	0,9416	0,0065	0,9969	0,0237	0,8698
70	0,0171	0,9408	0,0069	0,9970	0,0244	0,8672
90	0,0189	0,9387	0,0074	0,9948	0,0251	0,8567

Şekil 5.9, Şekil 5.6, Şekil 5.10 ve Tablo 5.3 incelendiği zaman 50-90 °C aralığında Pb çözünmesinin Küçülen Çekirdek Modeli’nde difüzyon kontrollü modele uyduğu görülmektedir. HNO₃ ile Pb liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5. 12: HNO₃ ile gerçekleştirilen Pb liçi için Arrhenius grafiği

Şekil 5.12’de verilmiş olan Arrhenius grafiğinden elde edilmiş olan doğrunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi 3,151 kJ/mol’dür. Nasimov ve ark. 2019 yılında yapmış oldukları çalışmalarında düşük sıcaklık ve asit konsantrasyonunda aktivasyon enerjisini 12,392 kJ/mol olarak, daha yüksek sıcaklık ve asit konsantrasyonunda ise 46,778 kJ/mol olarak hesaplamışlardır. Aydoğan ve ark. 2007 yılında yapmış oldukları çalışmalarında aktivasyon enerjisini 42 kJ/mol olarak hesaplamışlar ve prosesin yüzey kimyasal reaksiyon kontrollü küçülen çekirdek modeline uygun olduğunu belirtmişlerdir. Nnanwube ve Onukwuli 2018 yılında yapmış oldukları çalışmalarında aktivasyon enerjisini 27,01 kJ/mol olarak hesaplamışlar ve prosesin difüzyon kontrollü modele uygun olduğunu belirtmişlerdir. Azizi ve Ghasemi 2017 yılında yapmış oldukları çalışmalarında prosesin film difüzyon modeline uygun olduğunu belirtmişler ve aktivasyon enerjisini 7,71 kJ/mol olarak hesaplamışlardır.

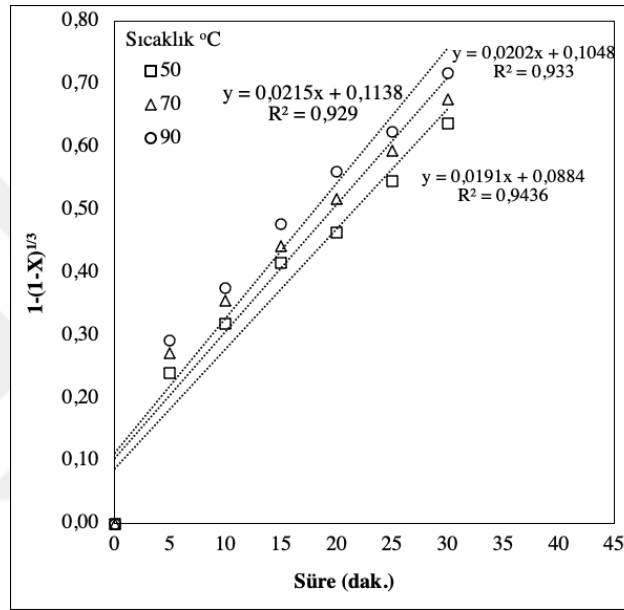
H₂SO₄, HCl ve HNO₃ ile yapılan Pb liç deneylerinin kinetik analizleri incelendiğinde, her üç kinetik analiz çalışması sonucu belirlenmiş olan kinetik modellerle, Arrhenius grafiklerinden elde edilmiş olan verilerle hesaplanan aktivasyon enerjilerinin değer aralıkları birbirlerini doğrulamaktadır. Difüzyon kontrollü model için her üç deney için de tüm sıcaklık değerleri için nispeten iyi oranda değerler elde edilmiş olup, tüm çizgiler orijinden ya da orijine yakın bir yerden geçmektedir. Bu da reaksiyonun incelenen tüm sıcaklık aralıklarında difüzyon kontrollü olduğunu göstermektedir. Arrhenius grafiğinde belirgin bir kırılmanın olmaması da

incelenen tüm sıcaklık aralıkları boyunca tek bir kinetik kontrol sürecinin etkin olduğunu göstermektedir.

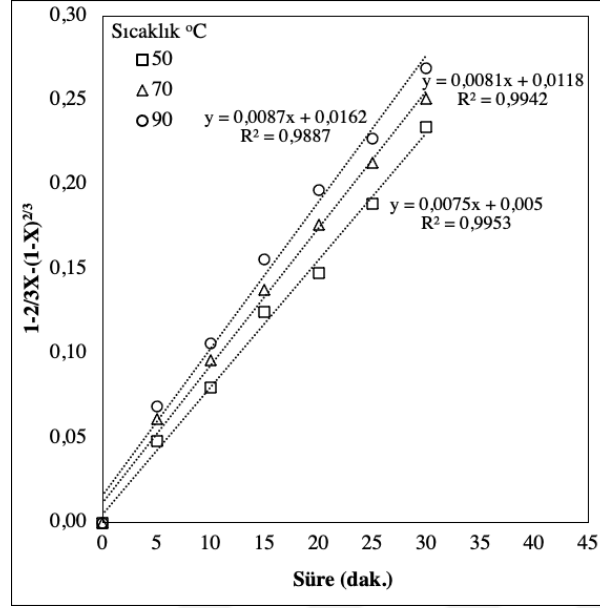
5.1.2. Zn liç deneylerinin kinetik analizi

5.1.2.1. H_2SO_4 deneyleri için liç kinetiği

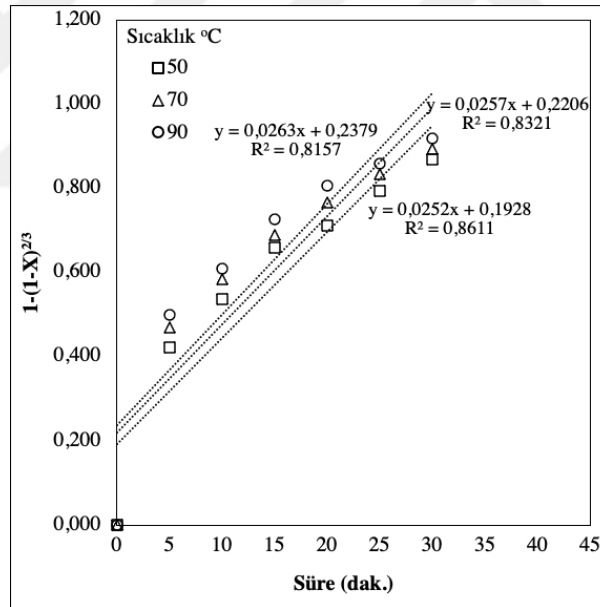
Kinetik analiz çalışmaları kapsamında H_2SO_4 ortamında farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimlerine kimyasal model, difüzyon modeli ve film difüzyonu modeli uygulanmıştır (Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15).



Şekil 5. 13: H_2SO_4 ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği



Şekil 5. 14: H₂SO₄ ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği



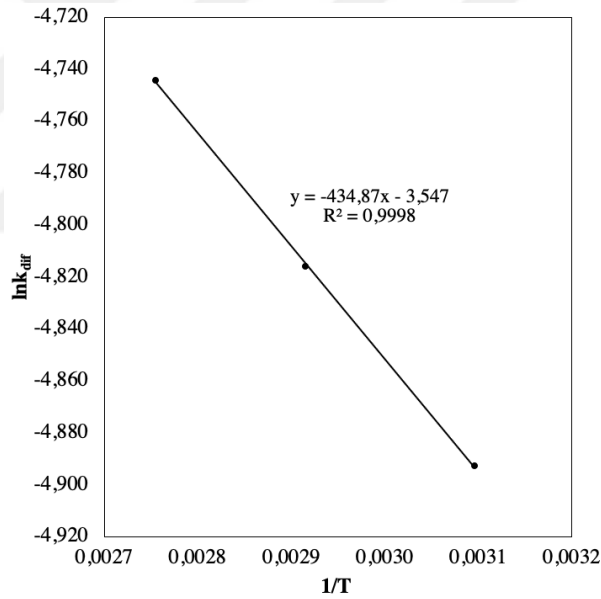
Şekil 5. 15: H₂SO₄ ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği

Grafiklerden elde edilen doğruların eğimlerinden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanarak her bir sıcaklık ve her bir çözünme modeli için Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablo 5. 4: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (H₂SO₄ liçi-Zn)

Sıcaklık (°C)	Kimyasal Kontrollü Model 1-(1-X) ^{1/3}		Difüzyon Kontrollü Model 1-2/3X-(1-X) ^{2/3}		Film Difüzyon Modeli 1-(1-X) ^{2/3}	
	Görünür hız sabiti (k _s)	Korelasyon katsayısı (R ²)	Görünür hız sabiti (k _{dif})	Korelasyon katsayısı (R ²)	Görünür hız sabiti (k _d)	Korelasyon katsayısı (R ²)
50	0,0191	0,9436	0,0075	0,9953	0,0252	0,8611
70	0,0202	0,9330	0,0081	0,9942	0,0257	0,8321
90	0,0215	0,9290	0,0087	0,9887	0,0263	0,8157

Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Tablo 5.4 incelendiği zaman 50-90 °C aralığında Zn çözünmesinin Küçülen Çekirdek Modeli'nde difüzyon kontrollü modele uyduğu görülmektedir. H₂SO₄ ile Zn liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği Şekil 5.16'da verilmiştir.



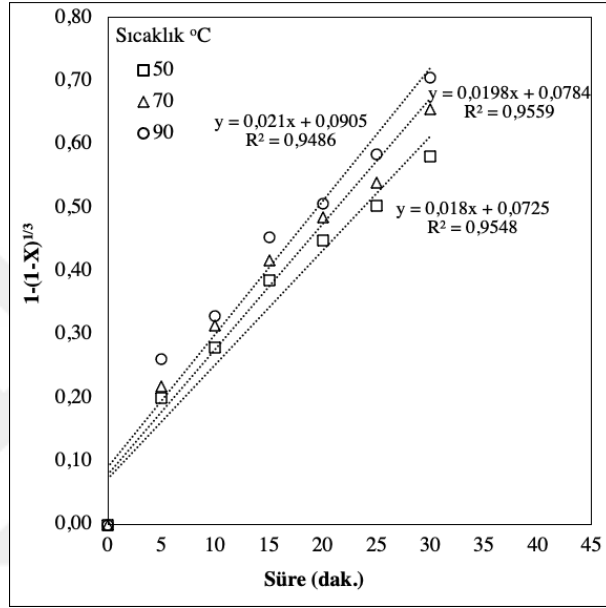
Şekil 5. 16: H₂SO₄ ile gerçekleştirilen Zn liçi için Arrhenius grafiği

Şekil 5.16'da verilmiş olan Arrhenius grafiğinden elde edilmiş olan doğrunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi 3,615 kJ/mol'dür. Aydoğan 2006 yılında yapmış olduğu çalışmada aktivasyon enerjisini 43 kJ/mol olarak hesaplamış ve prosesin yüzey kimyasal reaksiyon kontrollü olduğunu belirtmiştir. Sokic ve ark. 2012 yılında yapmış oldukları çalışmalarında aktivasyon enerjisini 55 kJ/mol olarak hesaplamışlardır. Hasani ve ark. 2016 yılında yapmış oldukları çalışmalarında aktivasyon enerjisini 29.23 kJ/mol olarak

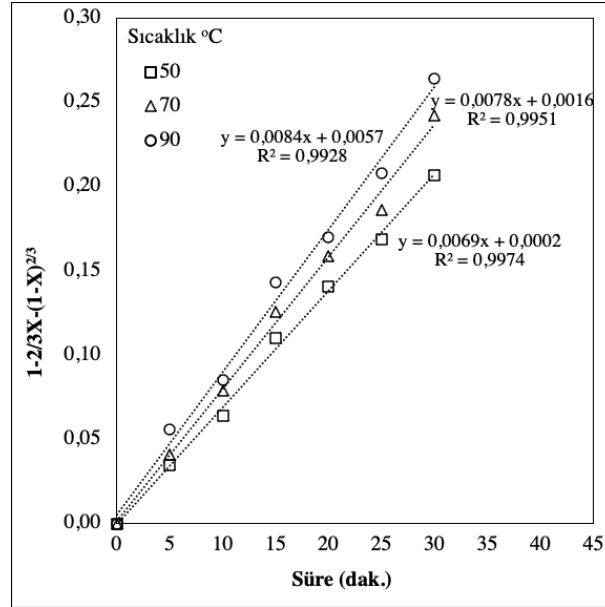
hesaplamışlardır. Pecina ve ark. 2008 yılında yapmış oldukları çalışmalarında aktivasyon enerjisini 50 kJ/mol olarak hesaplamışlardır.

5.1.2.2. HCl deneyleri için liç kinetiği

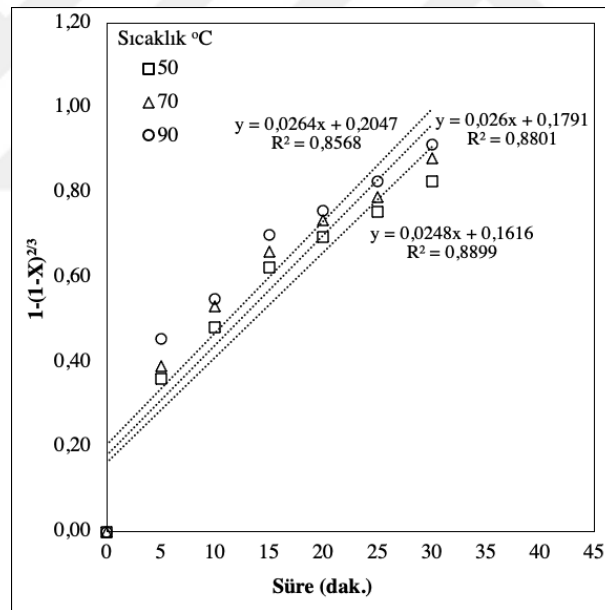
Kinetik analiz çalışmaları kapsamında HCl ortamında farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimlerine kimyasal model, difüzyon modeli ve film difüzyonu modeli uygulanmıştır (Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19).



Şekil 5. 17: HCl ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği



Şekil 5. 18: HCl ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği



Şekil 5. 19: HCl ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği

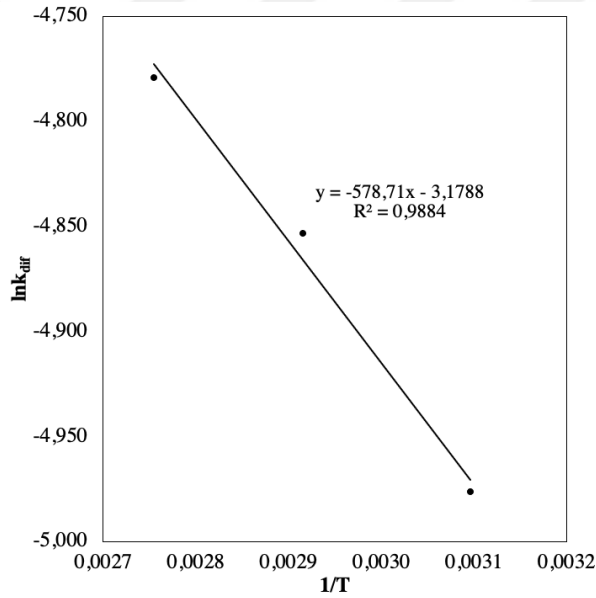
Grafiklerden elde edilen doğruların eğimlerinden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanarak her bir sıcaklık ve her bir çözünme modeli için Tablo 5.5’de verilmiştir.

Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Tablo 5.5 incelendiği zaman 50-90 °C aralığında Zn çözünmesinin Küçülen Çekirdek Modeli’nde difüzyon kontrollü modele uyduğu

görülmektedir. HCl ile Zn liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği Şekil 5.20’de verilmiştir.

Tablo 5. 5: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (HCl liçi-Zn)

Sıcaklık (°C)	Kimyasal Kontrollü Model $1-(1-X)^{1/3}$		Difüzyon Kontrollü Model $1-2/3X-(1-X)^{2/3}$		Film Difüzyon Modeli $1-(1-X)^{2/3}$	
	Görünür hız sabiti (k_s)	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_{dif})	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_d)	Korelasyon katsayısı (R^2)
50	0,0180	0,9548	0,0069	0,9974	0,0248	0,8899
70	0,0198	0,9559	0,0078	0,9951	0,0260	0,8801
90	0,0210	0,9486	0,0084	0,9928	0,0264	0,8568

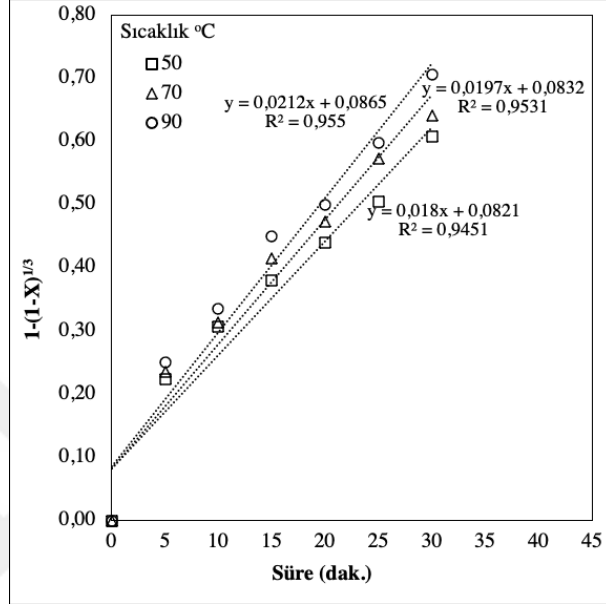


Şekil 5. 20: HCl ile gerçekleştirilen Zn liçi için Arrhenius grafiği

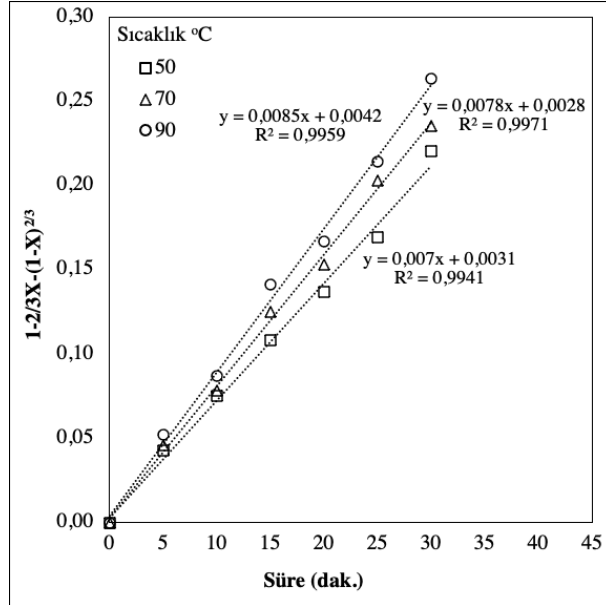
Şekil 5.20’de verilmiş olan Arrhenius grafiğinden elde edilmiş olan doğrunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi 4,811 kJ/mol’dür. Uçar 2009 yılında yapmış olduğu çalışmada aktivasyon enerjisini 41.1 kJ/mol olarak hesaplamış ve prosesin yüzey kimyasal reaksiyon kontrollü olduğunu belirtmiştir. Baba ve Adekola 2010 yılında yapmış oldukları çalışmada aktivasyon enerjisini 39.09 kJ/mol olarak hesaplamış ve prosesin yüzey kimyasal reaksiyon kontrollü olduğunu belirtmişlerdir.

5.1.2.3. HNO_3 deneyleri için liç kinetiği

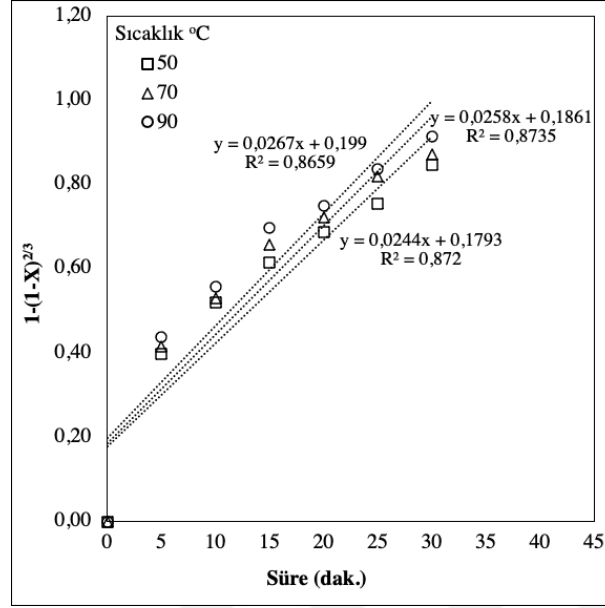
Kinetik analiz çalışmaları kapsamında HNO_3 ortamında farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimlerine kimyasal model, difüzyon modeli ve film difüzyonu modeli uygulanmıştır (Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23).



Şekil 5. 21: HNO_3 ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği



Şekil 5. 22: HNO_3 ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği



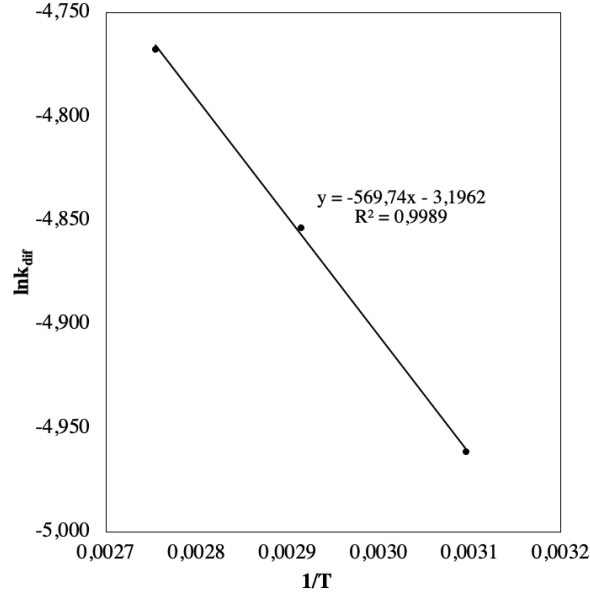
Şekil 5. 23: HNO₃ ile Zn liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği

Grafiklerden elde edilen doğruların eğimlerinden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanarak her bir sıcaklık ve her bir çözünme modeli için Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5. 6: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (HNO₃ liçi-Zn)

Sıcaklık (°C)	Kimyasal Kontrollü Model $1-(1-X)^{1/3}$		Difüzyon Kontrollü Model $1-2/3X-(1-X)^{2/3}$		Film Difüzyon Modeli $1-(1-X)^{2/3}$	
	Görünür hız sabiti (k_s)	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_{dif})	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_d)	Korelasyon katsayısı (R^2)
50	0,0180	0,9548	0,0069	0,9974	0,0248	0,8899
70	0,0198	0,9559	0,0078	0,9951	0,0260	0,8801
90	0,0210	0,9486	0,0084	0,9928	0,0264	0,8568

Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Tablo 5.6 incelendiği zaman 50-90 °C aralığında Zn çözünmesinin Küçülen Çekirdek Modeli'nde difüzyon kontrollü modele uyduğu görülmektedir. HNO₃ ile Zn liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği Şekil 5.24'de verilmiştir.



Şekil 5. 24: HNO₃ ile gerçekleştirilen Zn liçi için Arrhenius grafiği

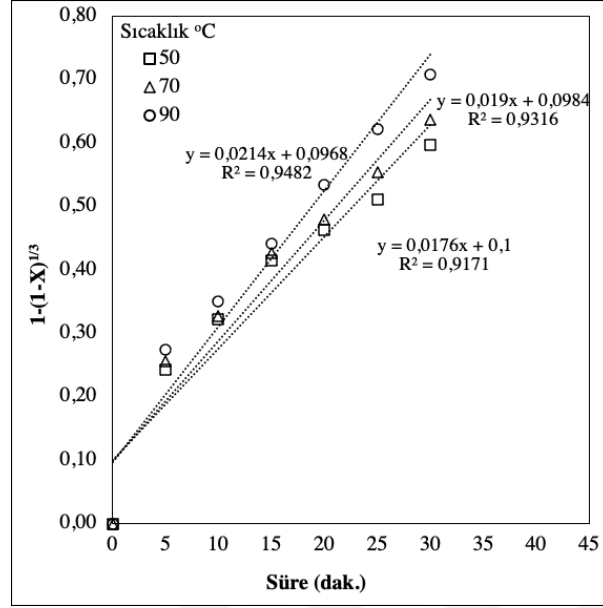
Şekil 5.24’de verilmiş olan Arrhenius grafiğinden elde edilmiş olan doğrunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi 4,736 kJ/mol’dür. Peng ve ark. 2005 yılında yapmış oldukları çalışmalarında prosesin kimyasal kontrollü olduğunu belirtmişlerdir. Adebayo ve ark. 2006 yılında yapmış oldukları çalışmalarında aktivasyon enerjisini 28.7 kJ/mol olarak hesaplamış ve prosesin yüzey kimyasal kontrollü olduğunu belirtmişlerdir.

H₂SO₄, HCl ve HNO₃ ile yapılan Zn liç deneylerinin kinetik analizleri incelendiğinde, her üç kinetik analiz çalışması sonucu belirlenmiş olan kinetik modellerle, Arrhenius grafiklerinden elde edilmiş olan verilerle hesaplanan aktivasyon enerjilerinin değer aralıkları birbirlerini doğrulamaktadır. Difüzyon kontrollü model için her üç deney için de tüm sıcaklık değerleri için nispeten iyi oranda değerler elde edilmiş olup, tüm çizgiler orijinden ya da orijine yakın bir yerden geçmektedir. Bu da reaksiyonun incelenen tüm sıcaklık aralıklarında difüzyon kontrollü olduğunu göstermektedir. Arrhenius grafiğinde belirgin bir kırılmanın olmaması da incelenen tüm sıcaklık aralıkları boyunca tek bir kinetik kontrol sürecinin etkin olduğunu göstermektedir.

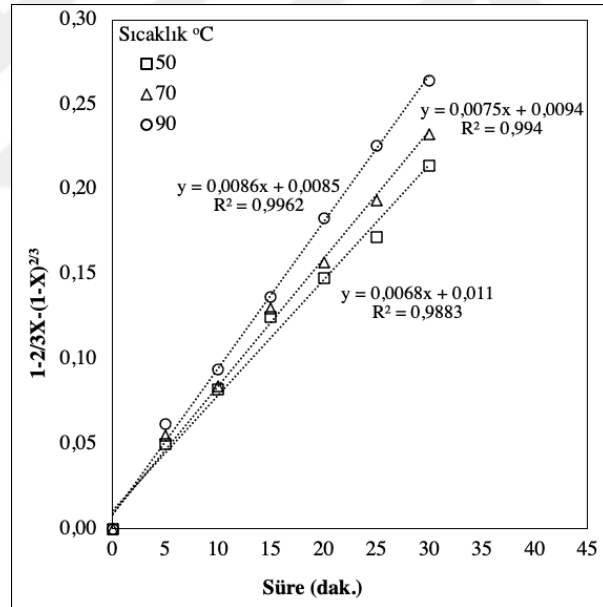
5.1.3. Cu liç deneylerinin kinetik analizi

5.1.3.1. H₂SO₄ deneyleri için liç kinetiği

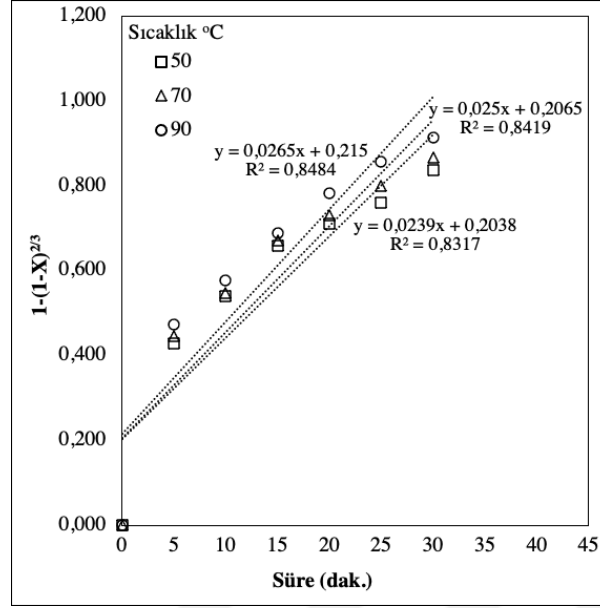
Kinetik analiz çalışmaları kapsamında H₂SO₄ ortamında farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimlerine kimyasal model, difüzyon modeli ve film difüzyonu modeli uygulanmıştır (Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27).



Şekil 5. 25: H₂SO₄ ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği



Şekil 5. 26: H₂SO₄ ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği



Şekil 5.27: H₂SO₄ ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği

Grafiklerden elde edilen doğruların eğimlerinden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanarak her bir sıcaklık ve her bir çözünme modeli için Tablo 5.7’de verilmiştir.

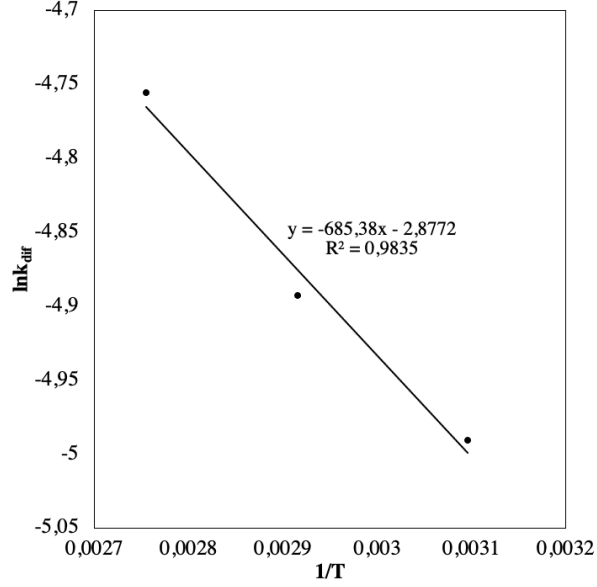
Tablo 5.7: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (H₂SO₄ liçi-Cu)

Sıcaklık (°C)	Kimyasal Kontrollü Model $1-(1-X)^{1/3}$		Difüzyon Kontrollü Model $1-2/3X-(1-X)^{2/3}$		Film Difüzyon Modeli $1-(1-X)^{2/3}$	
	Görünür hız sabiti (k _s)	Korelasyon katsayısı (R ²)	Görünür hız sabiti (k _{dif})	Korelasyon katsayısı (R ²)	Görünür hız sabiti (k _d)	Korelasyon katsayısı (R ²)
50	0,0176	0,9171	0,0068	0,9883	0,0239	0,8317
70	0,0190	0,9316	0,0075	0,9940	0,0250	0,8419
90	0,0214	0,9482	0,0086	0,9962	0,0265	0,8484

Şekil 5.25, Şekil 5.26, Şekil 5.27 ve Tablo 5.7 incelendiği zaman 50-90 °C aralığında Cu çözünmesinin Küçülen Çekirdek Modeli’nde difüzyon kontrollü modele uyduğu görülmektedir. H₂SO₄ ile Cu liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği Şekil 5.28’de verilmiştir.

Şekil 5.28’de verilmiş olan Arrhenius grafiğinden elde edilmiş olan doğrunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi 5,698 kJ/mol’dür. Sokic ve ark. 2019 yılında yapmış oldukları

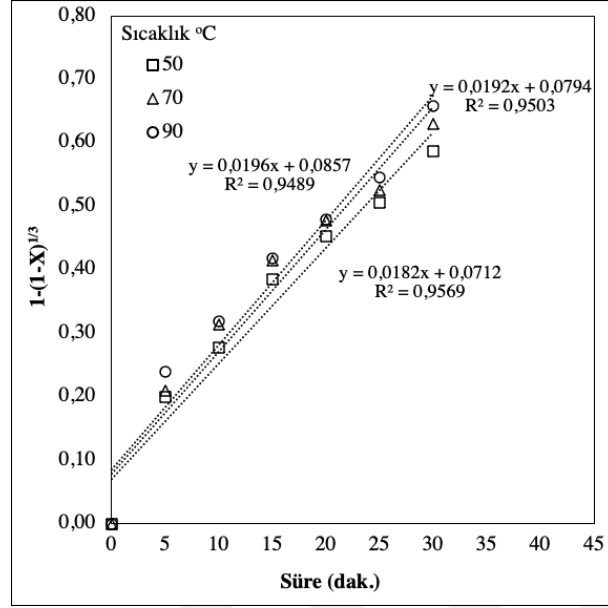
çalışmada aktivasyon enerjisini 80 kJ/mol olarak hesaplamış ve prosesin difüzyon kontrollü olduğunu belirtmişlerdir. Apua ve Madiba 2021 yılında yapmış oldukları çalışmada aktivasyon enerjisini 24.0 kJ/mol olarak hesaplamışlardır.



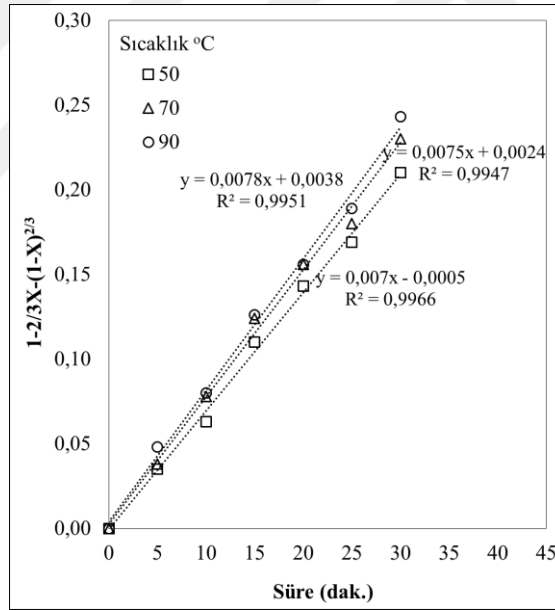
Şekil 5. 28: H_2SO_4 ile gerçekleştirilen Cu liçi için Arrhenius grafiği

5.1.3.2. HCl deneyleri için liç kinetiği

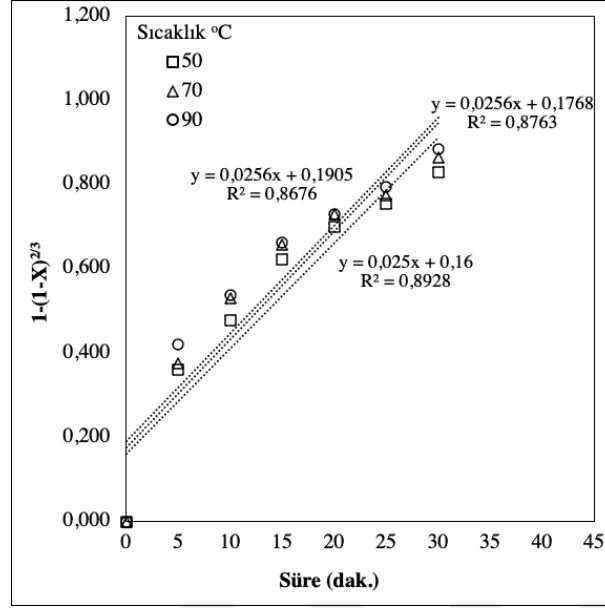
Kinetik analiz çalışmaları kapsamında HCl ortamında farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimlerine kimyasal model, difüzyon modeli ve film difüzyonu modeli uygulanmıştır (Şekil 5.29, Şekil 5.30 ve Şekil 5.31).



Şekil 5. 29: HCl ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği



Şekil 5. 30: HCl ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği



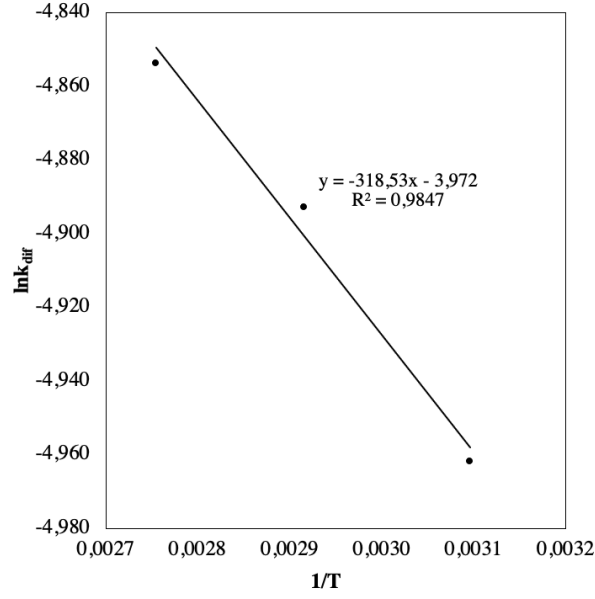
Şekil 5. 31: HCl ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği

Grafiklerden elde edilen doğruların eğimlerinden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanarak her bir sıcaklık ve her bir çözünme modeli için Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5. 8: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (HCl liçi-Cu)

Sıcaklık (°C)	Kimyasal Kontrollü Model $1-(1-X)^{1/3}$		Difüzyon Kontrollü Model $1-2/3X-(1-X)^{2/3}$		Film Difüzyon Modeli $1-(1-X)^{2/3}$	
	Görünür hız sabiti (k_s)	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_{dif})	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_d)	Korelasyon katsayısı (R^2)
50	0,0176	0,9171	0,0068	0,9883	0,0239	0,8317
70	0,0190	0,9316	0,0075	0,9940	0,0250	0,8419
90	0,0214	0,9482	0,0086	0,9962	0,0265	0,8484

Şekil 5.29, Şekil 5.30, Şekil 5.31 ve Tablo 5.8 incelendiği zaman 50-90 °C aralığında Cu çözünmesinin Küçülen Çekirdek Modeli’nde difüzyon kontrollü modele uyduğu görülmektedir. HCl ile Cu liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği Şekil 5.32’de verilmiştir.

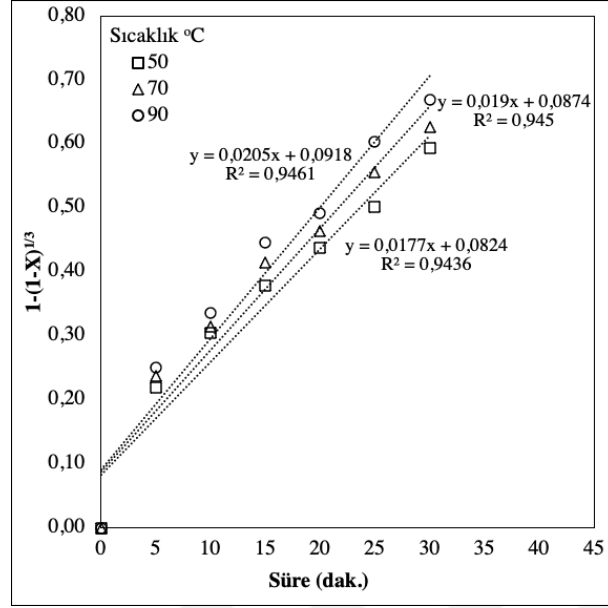


Şekil 5. 32: HCl ile gerçekleştirilen Cu liçi için Arrhenius grafiği

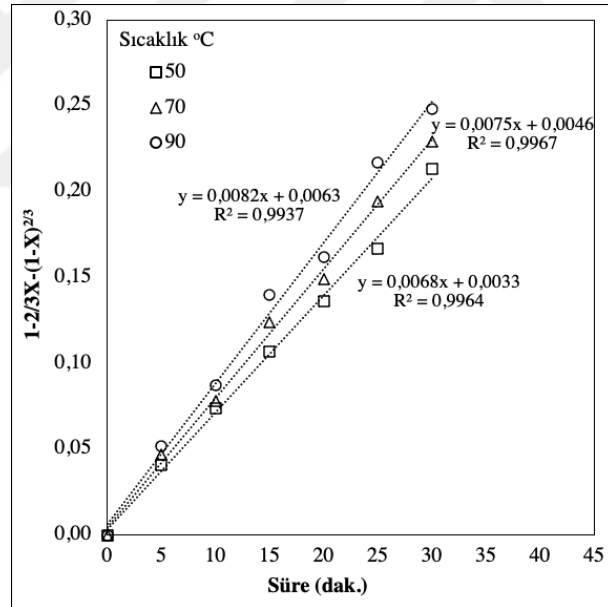
Şekil 5.32’de verilmiş olan Arrhenius grafiğinden elde edilmiş olan doğrunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi 2,648 kJ/mol’dür. Petrovic ve ark. 2018 yılında yapmış oldukları çalışmada aktivasyon enerjisini 19.6 kJ/mol olarak hesaplamış ve prosesin difüzyon kontrollü olduğunu belirtmişlerdir.

5.1.3.3. *HNO₃ deneyleri için liç kinetiği*

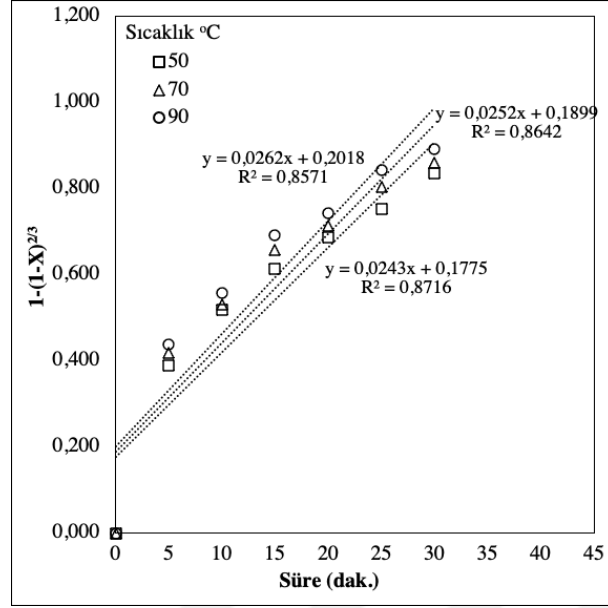
Kinetik analiz çalışmaları kapsamında HNO₃ ortamında farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimlerine kimyasal model, difüzyon modeli ve film difüzyonu modeli uygulanmıştır (Şekil 5.33, Şekil 5.34 ve Şekil 5.35).



Şekil 5. 33: HNO₃ ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen kimyasal kontrollü model grafiği



Şekil 5. 34: HNO₃ ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen difüzyon kontrollü model grafiği



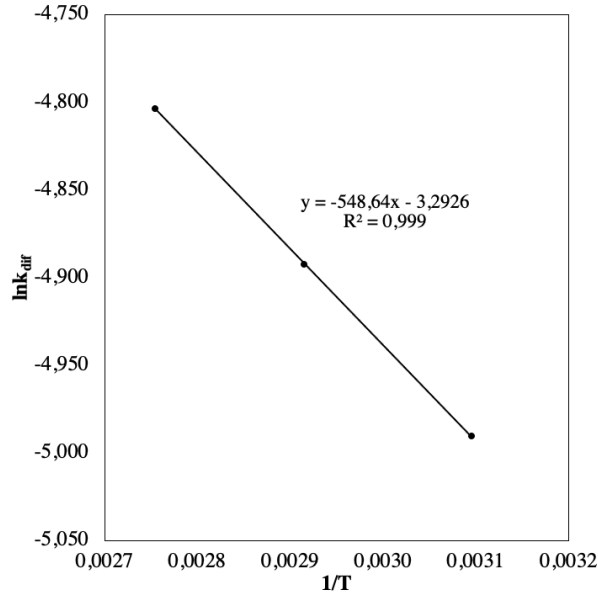
Şekil 5. 35: HNO₃ ile Cu liçi çözünme verimleri için farklı sıcaklıklarda elde edilen film difüzyon modeli grafiği

Grafiklerden elde edilen doğruların eğimlerinden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanarak her bir sıcaklık ve her bir çözünme modeli için Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5. 9: Her bir kinetik modele ait görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları (HNO₃ liçi-Cu)

Sıcaklık (°C)	Kimyasal Kontrollü Model $1-(1-X)^{1/3}$		Difüzyon Kontrollü Model $1-2/3X-(1-X)^{2/3}$		Film Difüzyon Modeli $1-(1-X)^{2/3}$	
	Görünür hız sabiti (k_s)	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_{dif})	Korelasyon katsayısı (R^2)	Görünür hız sabiti (k_d)	Korelasyon katsayısı (R^2)
50	0,0176	0,9171	0,0068	0,9883	0,0239	0,8317
70	0,0190	0,9316	0,0075	0,9940	0,0250	0,8419
90	0,0214	0,9482	0,0086	0,9962	0,0265	0,8484

Şekil 5.33, Şekil 5.34, Şekil 5.35 ve Tablo 5.9 incelendiği zaman 50-90 °C aralığında Cu çözünmesinin Küçülen Çekirdek Modeli'nde difüzyon kontrollü modele uyduğu görülmektedir. HNO₃ ile Cu liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği Şekil 5.36'da verilmiştir.



Şekil 5. 36: HNO₃ ile gerçekleştirilen Cu liçi için Arrhenius grafiği

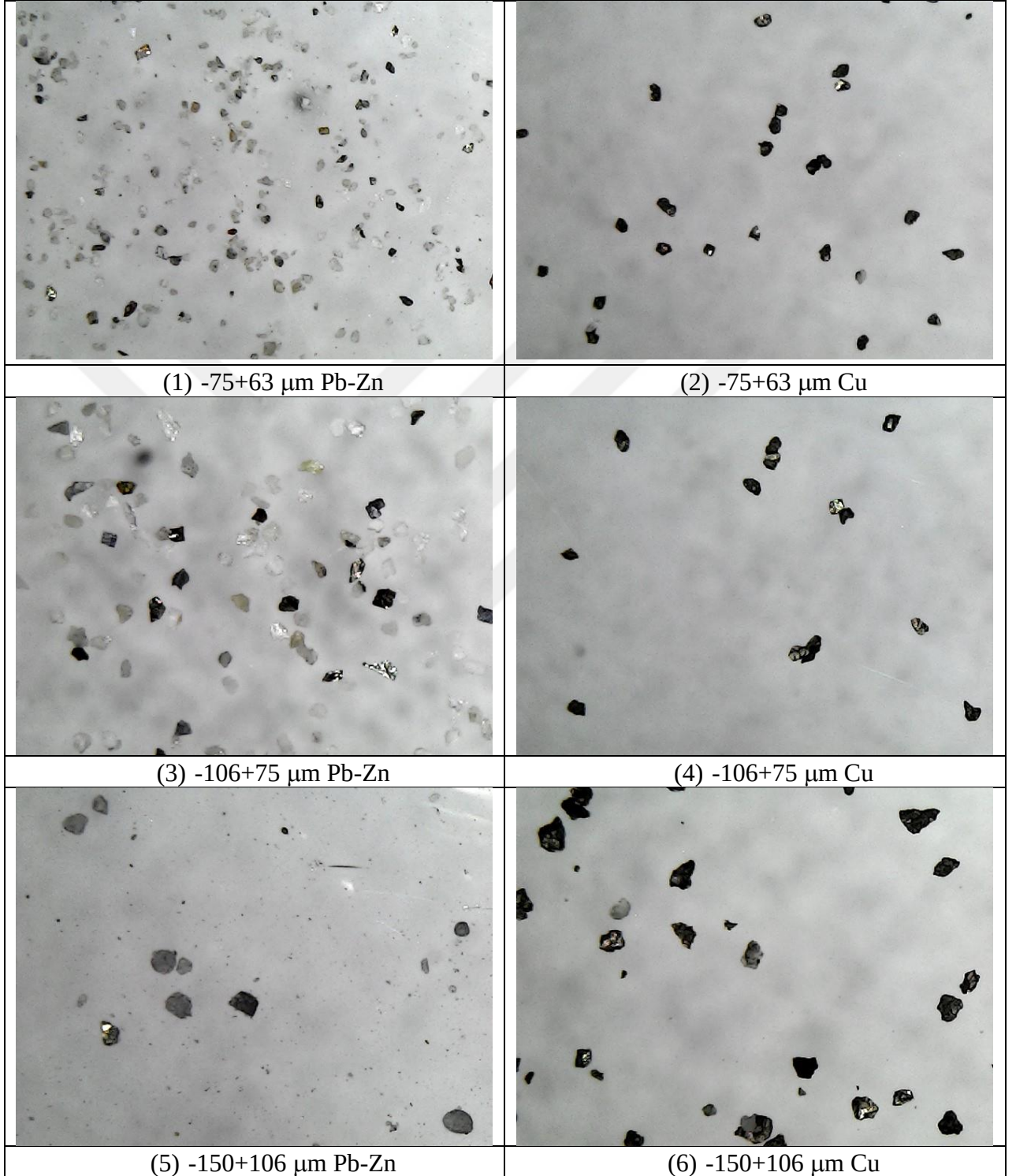
Şekil 5.36’da verilmiş olan Arrhenius grafiğinden elde edilmiş olan doğrunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi 4,561 kJ/mol’dür. Gök ve ark. 2013 yılında yapmış oldukları çalışmada aktivasyon enerjisini 34.06 kJ/mol olarak hesaplamış ve prosesin difüzyon kontrollü olduğunu belirtmişlerdir.

H₂SO₄, HCl ve HNO₃ ile yapılan Cu liç deneylerinin kinetik analizleri incelendiğinde, her üç kinetik analiz çalışması sonucu belirlenmiş olan kinetik modellerle, Arrhenius grafiklerinden elde edilmiş olan verilerle hesaplanan aktivasyon enerjilerinin değer aralıkları birbirlerini doğrulamaktadır. Difüzyon kontrollü model için her üç deney için de tüm sıcaklık değerleri için nispeten iyi oranda değerler elde edilmiş olup, tüm çizgiler orijinden ya da orijine yakın bir yerden geçmektedir. Bu da reaksiyonun incelenen tüm sıcaklık aralıklarında difüzyon kontrollü olduğunu göstermektedir. Arrhenius grafiğinde belirgin bir kırılmanın olmaması da incelenen tüm sıcaklık aralıkları boyunca tek bir kinetik kontrol sürecinin etkin olduğunu göstermektedir.

5.2. TANE MORFOLOJİSİNİN ÇÖZÜNME KİNETİĞİNE ETKİSİ

Tane morfolojisi çalışmaları kapsamında öncelikli olarak -75+63 µm, -106+75 µm ve -150+106 µm tane boyutlarındaki tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerine ait mikroskop fotoğrafları çekilmiş (Şekil 5.37) ve ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılarak her bir numuneye ait dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerlerine ait ortalama tane

şekil faktörü değeri, standart sapma, minimum ve maksimum değerler hesaplanmıştır (Tablo 5.10).



Şekil 5. 37: Tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerine ait örnek mikroskop fotoğrafları

Daha sonra Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin irdelendiği liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı deneylerine ait optimum değerlerin elde edildiği liç numuneleri fotoğraflanarak

ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılmış, her bir numunenin dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerlerine ait ortalama tane şekil faktörü değeri, standart sapma, minimum ve maksimum değerler hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular tüvenan numunelere ait verilerle karşılaştırılarak tane morfolojisinin çözünme kinetiğine olan etkileri ortaya konmaya çalışılmıştır. Tablo 5.11’de tane morfolojisi çalışmaları kapsamında her bir deney için numunelere atanan kodlar verilmiştir.

Tablo 5. 10: Tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerine ait ImageJ analizi sonuçları

	Dairesellik				Yuvarlaklık				Sertlik			
	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max
Pb-Zn (1)	0,633	0,211	0,161	0,998	0,650	0,164	0,162	0,989	0,808	0,101	0,448	0,974
Pb-Zn (3)	0,525	0,228	0,086	0,917	0,649	0,171	0,170	0,969	0,776	0,138	0,366	0,952
Pb-Zn (5)	0,641	0,229	0,092	0,943	0,676	0,184	0,061	0,981	0,835	0,125	0,326	0,963
Cu (2)	0,656	0,188	0,148	0,919	0,652	0,158	0,195	0,956	0,844	0,090	0,532	0,964
Cu (4)	0,687	0,177	0,184	0,939	0,681	0,150	0,223	0,967	0,859	0,084	0,492	0,955
Cu (6)	0,663	0,180	0,131	0,981	0,663	0,187	0,075	0,949	0,860	0,080	0,535	0,954

OD: ortalama değer

SS: standart sapma

Min: minimum değer

Mak: maksimum değer

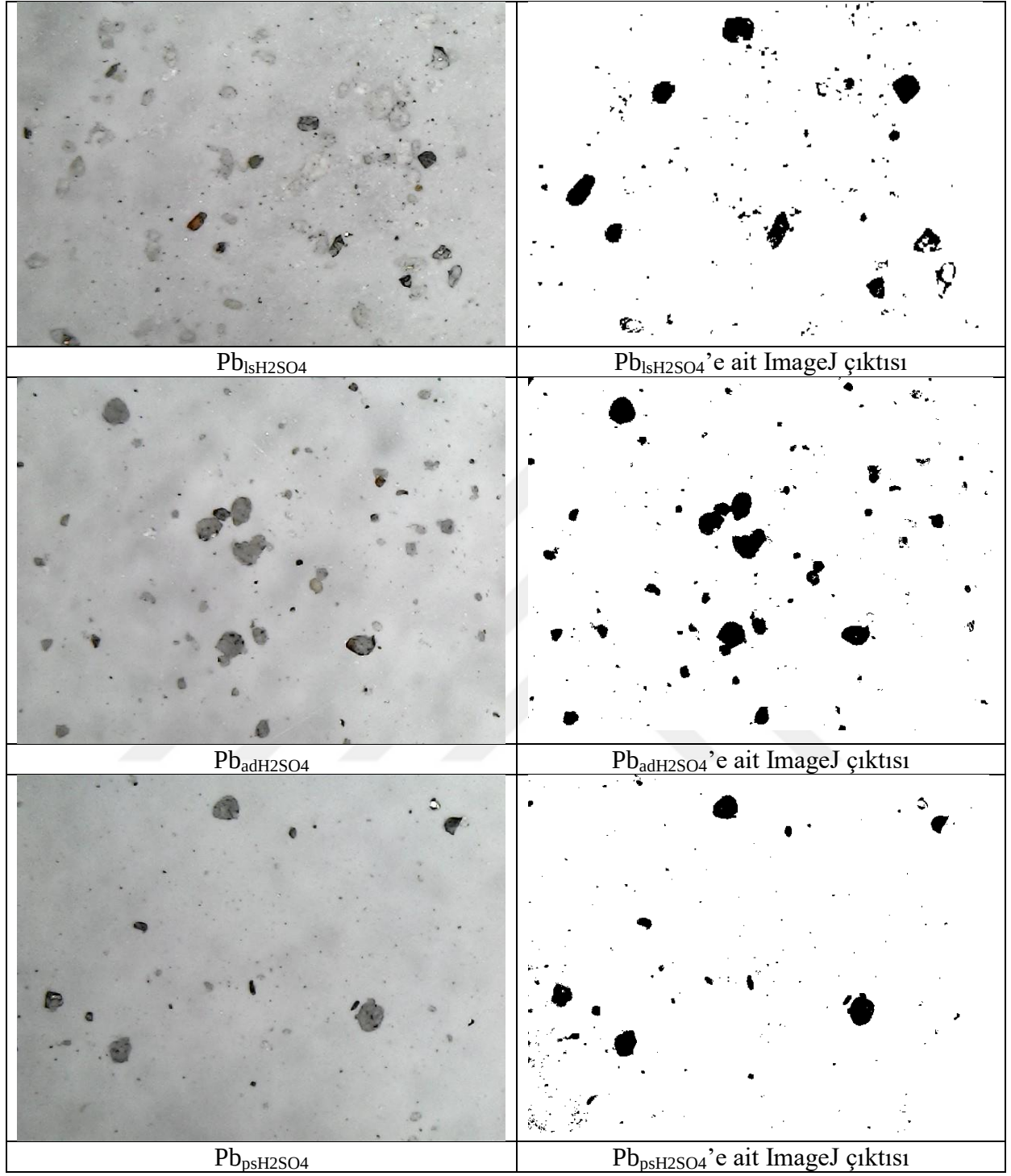
Tablo 5. 11: Tane morfolojisi çalışmaları kapsamında her bir deney için numunelere atanan kodlar

Numune kodu	Numune kodu	Numune kodu	Deney
Pb _{ls} H ₂ SO ₄	Zn _{ls} H ₂ SO ₄	Cu _{ls} H ₂ SO ₄	Liç süresi (H ₂ SO ₄)
Pb _{ad} H ₂ SO ₄	Zn _{ad} H ₂ SO ₄	Cu _{ad} H ₂ SO ₄	Asit dozajı (H ₂ SO ₄)
Pb _{ps} H ₂ SO ₄	Zn _{ps} H ₂ SO ₄	Cu _{ps} H ₂ SO ₄	Pülp sıcaklığı (H ₂ SO ₄)
Pb _{ls} HCl	Zn _{ls} HCl	Cu _{ls} HCl	Liç süresi (HCl)
Pb _{ad} HCl	Zn _{ad} HCl	Cu _{ad} HCl	Asit dozajı (HCl)
Pb _{ps} HCl	Zn _{ps} HCl	Cu _{ps} HCl	Pülp sıcaklığı (HCl)
Pb _{ls} HNO ₃	Zn _{ls} HNO ₃	Cu _{ls} HNO ₃	Liç süresi (HNO ₃)
Pb _{ad} HNO ₃	Zn _{ad} HNO ₃	Cu _{ad} HNO ₃	Asit dozajı (HNO ₃)
Pb _{ps} HNO ₃	Zn _{ps} HNO ₃	Cu _{ps} HNO ₃	Pülp sıcaklığı (HNO ₃)

5.2.1. Pb liç numuneleri tane morfolojisi çalışmaları

5.2.1.1. H₂SO₄ liç deney numunelerinin incelenmesi

H₂SO₄ ile gerçekleştirilen; liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametreleri için çeşitli değer aralıklarında yapılan deneyler sonucu elde edilmiş olan optimum değerlere ait liç numunelerinin fotoğrafları (Şekil 5.38) ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılarak elde edilmiş olan sonuçlar Tablo 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5. 38: H₂SO₄ liçi Pb optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları

Tablo 5. 12: H₂SO₄ liçi Pb optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları

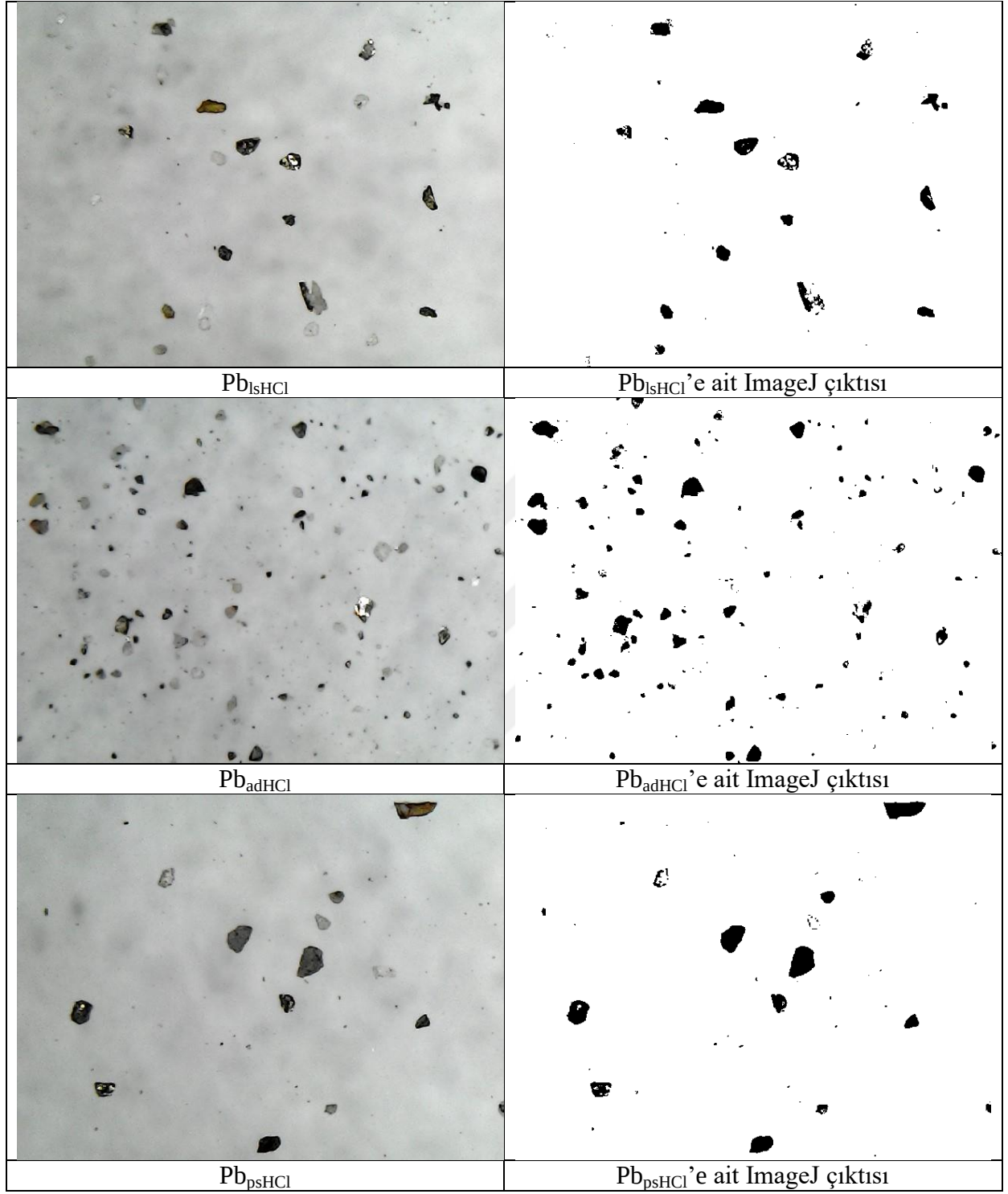
	Dairesellik				Yuvarlaklık				Sertlik			
	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max
Pb _{lsH2SO4}	0,546	0,219	0,181	0,903	0,665	0,163	0,163	0,993	0,769	0,124	0,425	0,935
Pb _{adH2SO4}	0,599	0,229	0,104	0,997	0,664	0,166	0,085	0,992	0,801	0,117	0,402	0,956
Pb _{psH2SO4}	0,645	0,215	0,076	0,966	0,681	0,163	0,221	0,983	0,828	0,106	0,413	0,962

Tane şekil faktörü çalışmaları kapsamında ImageJ analizine tabi tutulan $Pb_{lsH_2SO_4}$, $Pb_{adH_2SO_4}$ ve $Pb_{psH_2SO_4}$ numunelerinin tane boyut aralıkları $-106+75 \mu m$ 'dir. Dolayısıyla tüvenan değerler ile H_2SO_4 liçi Pb optimum numuneleri Pb-Zn (3) ile karşılaştırılmıştır. Buna göre H_2SO_4 liç işlemi sonucu her üç numunenin de dairesellik ve yuvarlaklık değerleri artmış, $Pb_{lsH_2SO_4}$ 'ün sertlik değerleri azalırken, $Pb_{adH_2SO_4}$ ve $Pb_{psH_2SO_4}$ 'ün sertlik değerinde artış görülmüştür. Tablo 2.7'de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, $Pb_{lsH_2SO_4}$ ve $Pb_{adH_2SO_4}$ numunelerinin “düşük dairesellik”, $Pb_{psH_2SO_4}$ numunesinin de “orta dairesellik” sınıf limitleri aralığında olduğu görülmüştür. Tablo 2.5'de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, $Pb_{lsH_2SO_4}$, $Pb_{adH_2SO_4}$ ve $Pb_{psH_2SO_4}$ numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmektedir.

5.2.1.2. HCl liçi deney numunelerinin incelenmesi

HCl ile gerçekleştirilen; liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametreleri için çeşitli değer aralıklarında yapılan deneyler sonucu elde edilmiş olan optimum değerlere ait liç numunelerinin fotoğraflanıp (Şekil 5.39) ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılarak elde edilmiş olan sonuçlar Tablo 5.13'de verilmiştir.

Tane şekil faktörü çalışmaları kapsamında ImageJ analizine tabi tutulan Pb_{lsHCl} , Pb_{adHCl} ve Pb_{psHCl} numunelerinin tane boyut aralıkları $-106+75 \mu m$ 'dir. Dolayısıyla tüvenan değerler ile HCl liçi Pb optimum numuneleri Pb-Zn (3) ile karşılaştırılmıştır. Buna göre HCl liç işlemi sonucu her üç numunenin de dairesellik değerinin artmış olduğu görülmektedir. Yuvarlaklık değeri Pb_{lsHCl} için sabit kalırken, Pb_{adHCl} ve Pb_{psHCl} için artmıştır. Sertlik değerinin ise her üç numune için arttığı görülmüştür. Tablo 2.7'de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre Pb_{lsHCl} ve Pb_{psHCl} numunelerinin “düşük dairesellik”, Pb_{adHCl} numunesinin de “orta dairesellik” sınıf limitleri aralığında olduğu görülmüştür. Tablo 2.5'de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, Pb_{lsHCl} , Pb_{adHCl} ve Pb_{psHCl} numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmektedir.



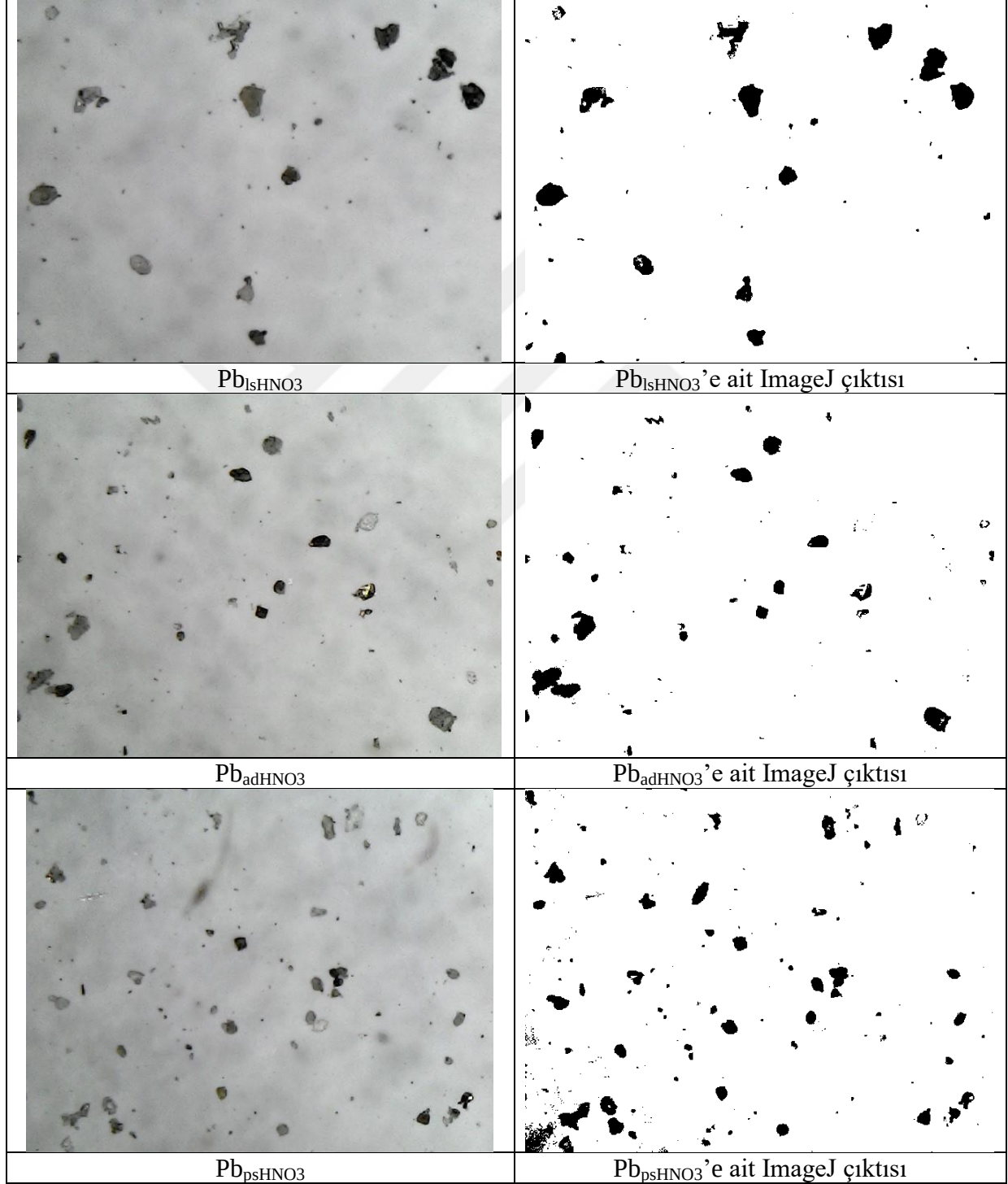
Şekil 5. 39: HCl liçi Pb optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları

Tablo 5. 13: HCl liçi Pb optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları

	Dairesellik				Yuvarlaklık				Sertlik			
	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max
Pb_{IsHCl}	0,621	0,216	0,131	0,972	0,649	0,164	0,182	0,968	0,813	0,112	0,401	0,968
Pb_{adHCl}	0,642	0,220	0,115	0,997	0,657	0,160	0,241	0,977	0,812	0,113	0,356	0,968
Pb_{psHCl}	0,615	0,222	0,121	0,940	0,663	0,149	0,296	0,981	0,806	0,119	0,336	0,957

5.2.1.3. HNO_3 liçi deney numunelerinin incelenmesi

HNO_3 ile gerçekleştirilen; liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametreleri için çeşitli değer aralıklarında yapılan deneyler sonucu elde edilmiş olan optimum değerlere ait liç numunelerinin fotoğraflanıp (Şekil 5.40) ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılarak elde edilmiş olan sonuçlar Tablo 5.14’de verilmiştir.



Şekil 5. 40: HNO_3 liçi Pb optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları

Tablo 5. 14: HNO₃ liçi Pb optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları

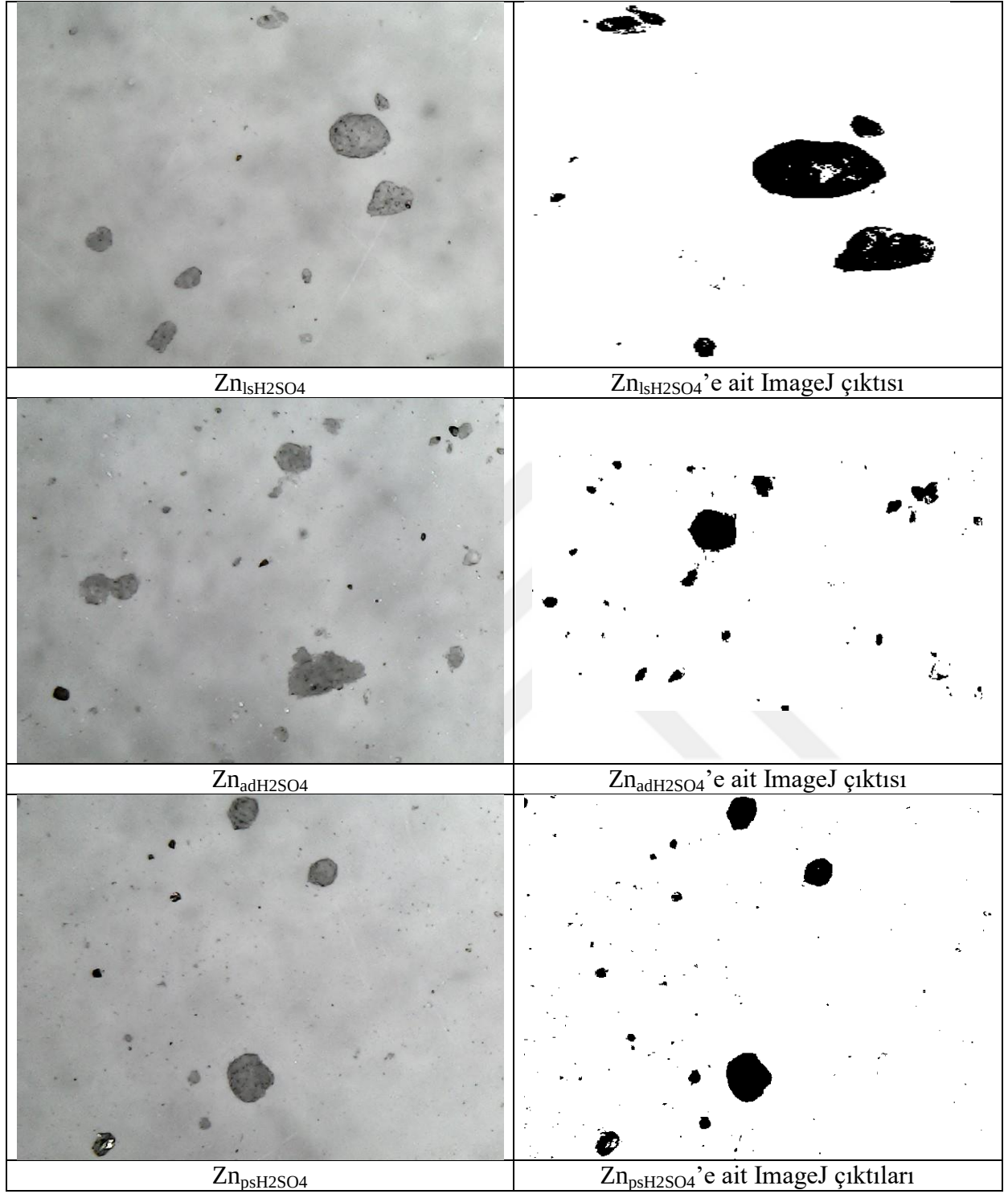
	Dairesellik				Yuvarlaklık				Sertlik			
	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max
Pb _{lsHNO3}	0,611	0,197	0,115	0,992	0,638	0,159	0,237	0,995	0,809	0,102	0,471	0,977
Pb _{adHNO3}	0,629	0,232	0,094	0,997	0,660	0,160	0,193	0,995	0,798	0,117	0,347	0,979
Pb _{psHNO3}	0,635	0,221	0,096	0,981	0,659	0,151	0,258	0,973	0,804	0,108	0,393	0,968

Tane şekil faktörü çalışmaları kapsamında ImageJ analizine tabi tutulan Pb_{lsHNO3}, Pb_{adHNO3} ve Pb_{psHNO3} numunelerinin tane boyut aralıkları -75+63 µm'dir. Dolayısıyla tüvenan değerler ile HNO₃ liçi Pb optimum numuneleri Pb-Zn (1) ile karşılaştırılmıştır. Buna göre HNO₃ liçi işlemi sonucu, Pb_{lsHNO3} ve Pb_{adHNO3} numunelerinin dairesellik değerleri azalırken Pb_{psHNO3} numunesinin dairesellik değerinin arttığı; Pb_{lsHNO3} numunesinin yuvarlaklık değeri azalırken, Pb_{adHNO3} ve Pb_{psHNO3} numunelerinin yuvarlaklık değerlerinin arttığı görülmüştür. Sertlik değerleri incelendiğinde, Pb_{lsHNO3}'ün sertlik değerinin arttığı, Pb_{adHNO3} ve Pb_{psHNO3}'ün sertlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. Tablo 2.7'de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, Pb_{lsHNO3} ve Pb_{adHNO3} “düşük dairesellik”, Pb_{psHNO3} numunesinin de “orta dairesellik” sınıf limitleri aralığında olduğu görülmüştür. Tablo 2.5'de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, Pb_{lsHNO3}, Pb_{adHNO3} ve Pb_{psHNO3} numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmektedir.

5.2.2. Zn liçi numuneleri tane morfolojisi çalışmaları

5.2.2.1. H₂SO₄ liçi deney numunelerinin incelenmesi

H₂SO₄ ile gerçekleştirilen; liçi süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametreleri için çeşitli değer aralıklarında yapılan deneyler sonucu elde edilmiş olan optimum değerlere ait liçi numunelerinin fotoğraflanıp (Şekil 5.41) ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılarak elde edilmiş olan sonuçlar Tablo 5.15'de verilmiştir.



Şekil 5. 41: H₂SO₄ liçi Zn optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları

Tablo 5. 15: H₂SO₄ liçi Zn optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları

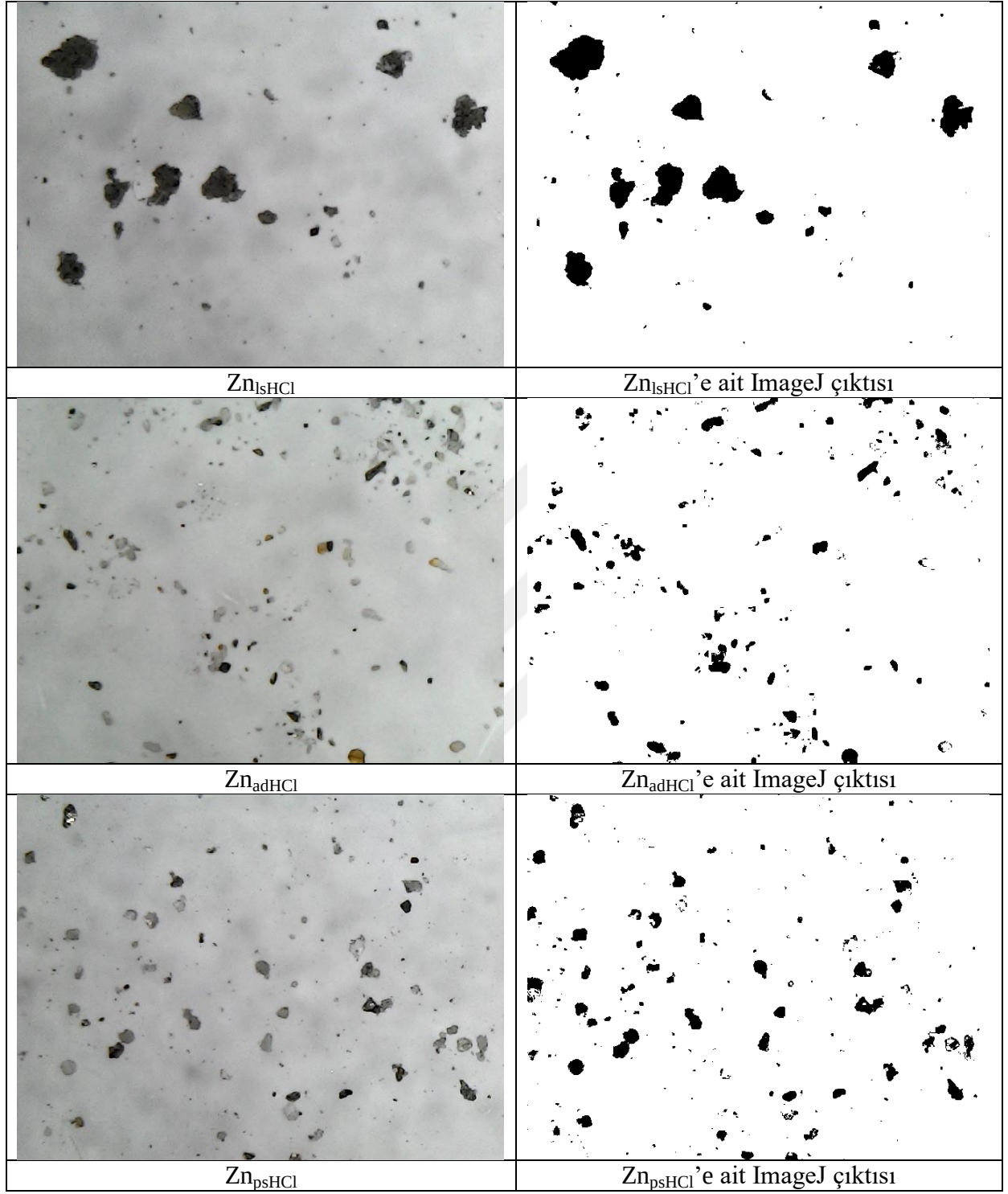
	Dairesellik				Yuvarlaklık				Sertlik			
	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max
Zn _{Is} H ₂ SO ₄	0,613	0,193	0,134	0,914	0,709	0,151	0,286	0,949	0,848	0,083	0,579	0,943
Zn _{Ad} H ₂ SO ₄	0,621	0,199	0,168	0,926	0,694	0,151	0,288	0,974	0,821	0,098	0,557	0,953
Zn _{Ps} H ₂ SO ₄	0,619	0,222	0,072	0,976	0,687	0,150	0,279	0,981	0,816	0,128	0,321	0,950

Tane şekil faktörü çalışmaları kapsamında ImageJ analizine tabi tutulan $Zn_{lsH_2SO_4}$, $Zn_{adH_2SO_4}$ ve $Zn_{psH_2SO_4}$ numunelerinin tane boyut aralıkları $-75+63 \mu m$ 'dir. Dolayısıyla tüvenan değerler ile H_2SO_4 liçi Zn optimum numuneleri Pb-Zn (1) ile karşılaştırılmıştır. Buna göre H_2SO_4 liç işlemi sonucu her üç numunenin de dairesellik değerleri azalırken, yuvarlaklık ve sertlik değerleri artmıştır. Tablo 2.7'de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, her üç numunenin de "düşük dairesellik" sınıf limiti aralığında olduğu görülmüştür. Tablo 2.5'de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, $Zn_{lsH_2SO_4}$ numunesinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Pettijohn (1949)'a göre "pürüzsüz" sınıf limitine, Blott&Pye (2008)'a göre "yuvarlak" sınıf limitine dahil olduğu görülmektedir. $Zn_{adH_2SO_4}$ ve $Zn_{psH_2SO_4}$ numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre "yuvarlak" sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise "pürüzsüz" sınıf limitine dahil olduğu görülmektedir.

5.2.2.2. HCl liçi deney numunelerinin incelenmesi

HCl ile gerçekleştirilen; liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametreleri için çeşitli değer aralıklarında yapılan deneyler sonucu elde edilmiş olan optimum değerlere ait liç numunelerinin fotoğraflanıp (Şekil 5.42) ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılarak elde edilmiş olan sonuçlar Tablo 5.16'da verilmiştir.

Tane şekil faktörü çalışmaları kapsamında ImageJ analizine tabi tutulan Zn_{lsHCl} , Zn_{adHCl} ve Zn_{psHCl} numunelerinin tane boyut aralıkları $-106+75 \mu m$ 'dir. Dolayısıyla tüvenan değerler ile HCl liçi Zn optimum numuneleri Pb-Zn (3) ile karşılaştırılmıştır. Buna göre HCl liç işlemi sonucu her üç numunenin de dairesellik değerlerinin arttığı görülmektedir. Zn_{lsHCl} 'in yuvarlaklık değeri artarken, Zn_{adHCl} ve Zn_{psHCl} 'in yuvarlaklık değerlerinin azaldığı görülmektedir. Sertlik değerleri incelendiği zaman, her üç numunenin sertlik değerinde artış olduğu görülmüştür. Tablo 2.7'de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, Zn_{lsHCl} numunesinin "orta dairesellik" sınıf limiti, Zn_{adHCl} ve Zn_{psHCl} numunelerinin ise "düşük dairesellik" sınıf limitleri aralığında olduğu görülmektedir. Tablo 2.5'de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, Zn_{lsHCl} , Zn_{adHCl} ve Zn_{psHCl} numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre "yuvarlak" sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise "pürüzsüz" sınıf limitine dahil olduğu görülmektedir.



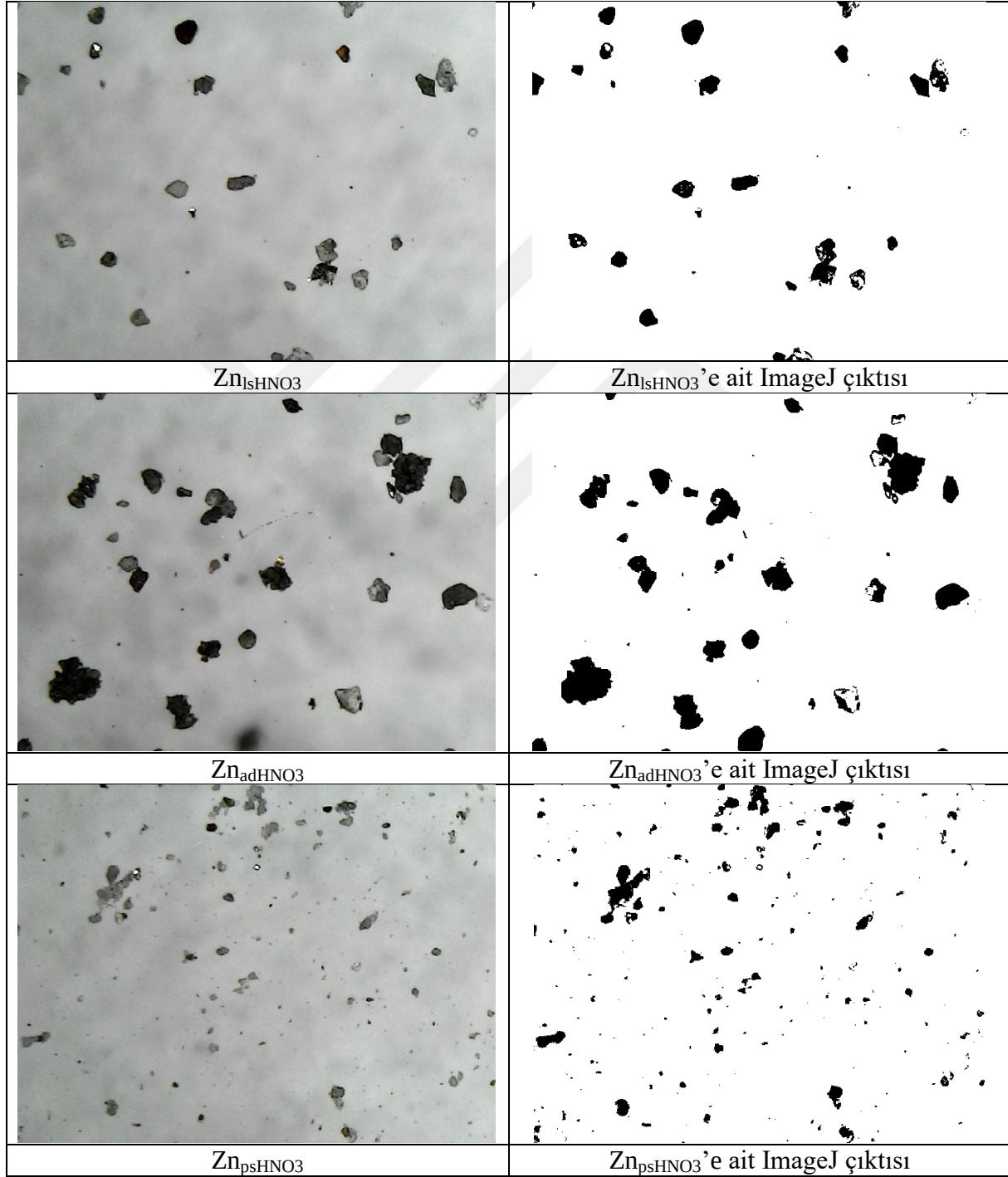
Şekil 5. 42: HCl liçi Zn optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları

Tablo 5. 16: HCl liçi Zn optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları

	Dairesellik				Yuvarlaklık				Sertlik			
	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max
Zn _{lsHCl}	0,678	0,180	0,129	0,996	0,671	0,165	0,216	0,995	0,832	0,083	0,330	0,950
Zn _{adHCl}	0,622	0,219	0,126	0,985	0,639	0,173	0,173	0,977	0,805	0,110	0,439	0,971
Zn _{psHCl}	0,605	0,226	0,121	0,988	0,648	0,170	0,059	0,989	0,790	0,123	0,363	0,967

5.2.2.3. HNO_3 liçi deney numunelerinin incelenmesi

HNO_3 ile gerçekleştirilen; liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametreleri için çeşitli değer aralıklarında yapılan deneyler sonucu elde edilmiş olan optimum değerlere ait liç numunelerinin fotoğraflanıp (Şekil 5.43) ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılarak elde edilmiş olan sonuçlar Tablo 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5. 43: HNO_3 liçi Zn optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları

Tablo 5. 17: HNO₃ liçi Zn optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları

	Dairesellik				Yuvarlaklık				Sertlik			
	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max
Zn _{ls} HNO ₃	0,607	0,219	0,139	0,976	0,662	0,160	0,168	0,977	0,808	0,119	0,407	0,947
Zn _{ad} HNO ₃	0,669	0,213	0,107	0,990	0,674	0,167	0,191	0,978	0,834	0,110	0,341	0,968
Zn _{ps} HNO ₃	0,620	0,212	0,142	0,994	0,649	0,162	0,200	0,984	0,795	0,103	0,327	0,952

Tane şekil faktörü çalışmaları kapsamında ImageJ analizine tabi tutulan Zn_{ls}HNO₃, Zn_{ad}HNO₃ ve Zn_{ps}HNO₃ numunelerinin tane boyut aralıkları -75+63 µm'dir. Dolayısıyla tüvenan değerler ile HNO₃ liçi Zn optimum numuneleri Pb-Zn (1) ile karşılaştırılmıştır. Buna göre HNO₃ liçi işlemi sonucu Zn_{ls}HNO₃ ve Zn_{ps}HNO₃ numunelerinin dairesellik değerleri azalırken, Zn_{ad}HNO₃ numunesinin dairesellik değeri artmıştır. Zn_{ls}HNO₃ ve Zn_{ad}HNO₃ numunelerinin yuvarlaklık değerleri artmış, Zn_{ps}HNO₃ numunesinin yuvarlaklık değeri azalmıştır. Zn_{ls}HNO₃ numunesinin sertlik değeri sabit kalırken, Zn_{ad}HNO₃ numunesinin sertlik değeri artmış, Zn_{ps}HNO₃'ünki azalmıştır. Tablo 2.7'de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, Zn_{ls}HNO₃ ve Zn_{ps}HNO₃ numunelerinin “düşük dairesellik” sınıf limitleri, Zn_{ad}HNO₃ numunesinin ise “orta dairesellik” sınıf limiti aralığında olduğu görülmektedir. Tablo 2.5'de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, Zn_{ls}HNO₃, Zn_{ad}HNO₃ ve Zn_{ps}HNO₃ numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmektedir.

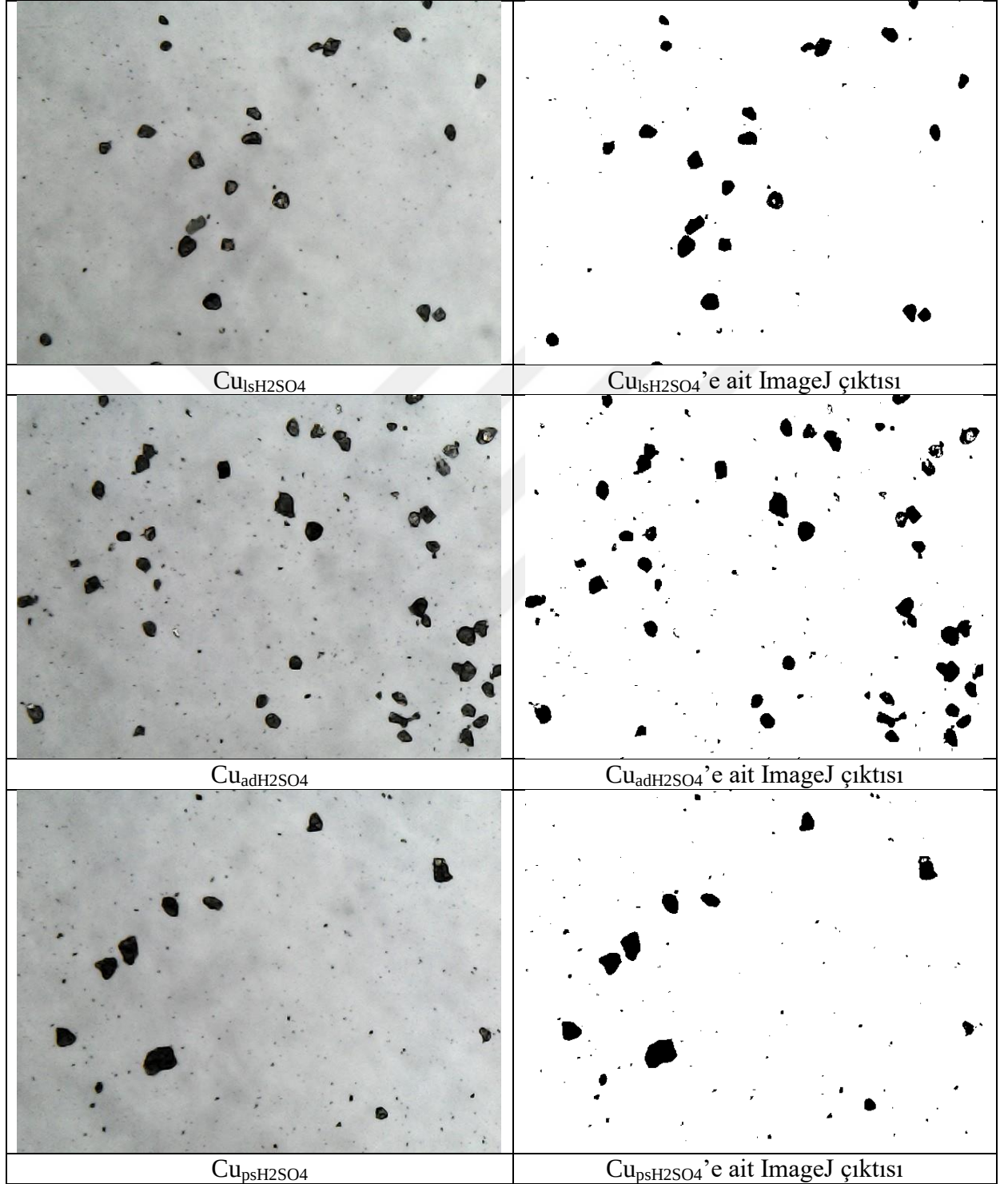
5.2.3. Cu liçi numuneleri tane morfolojisi çalışmaları

5.2.3.1. H₂SO₄ liçi deney numunelerinin incelenmesi

H₂SO₄ ile gerçekleştirilen; liçi süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametreleri için çeşitli değer aralıklarında yapılan deneyler sonucu elde edilmiş olan optimum değerlere ait liçi numunelerinin fotoğraflanıp (Şekil 5.44) ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılarak elde edilmiş olan sonuçlar Tablo 5.18'de verilmiştir.

Tane şekil faktörü çalışmaları kapsamında ImageJ analizine tabi tutulan Cu_{ls}H₂SO₄, Cu_{ad}H₂SO₄ ve Cu_{ps}H₂SO₄ numunelerinin tane boyut aralıkları -75+63 µm'dir. Dolayısıyla tüvenan değerler ile H₂SO₄ liçi Cu optimum numuneleri Cu (2) ile karşılaştırılmıştır. Buna göre H₂SO₄ liçi işlemi sonucu her üç numunenin de dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Tablo 2.7'de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, her üç numunenin de “orta dairesellik” sınıf limiti aralığında olduğu görülmektedir. Tablo 2.5'de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, Cu_{ls}H₂SO₄, Cu_{ad}H₂SO₄ ve Cu_{ps}H₂SO₄ numunelerinin Russel&Taylor

(1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 44: H₂SO₄ liçi Cu optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları

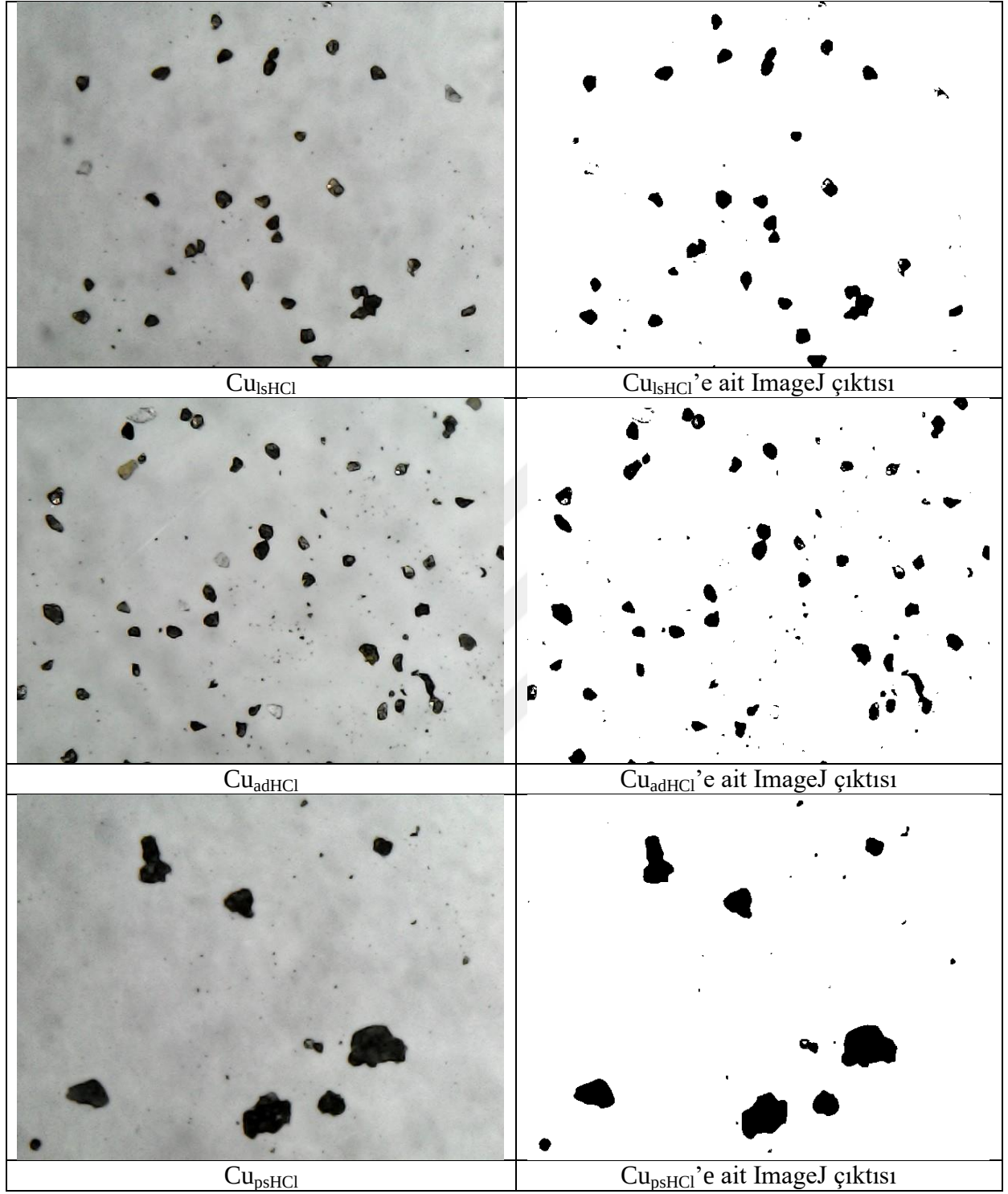
Tablo 5. 18: H₂SO₄ liçi Cu optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları

	Dairesellik				Yuvarlaklık				Sertlik			
	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max
Cu _{ls} H ₂ SO ₄	0,729	0,189	0,139	0,994	0,694	0,157	0,240	0,978	0,870	0,087	0,410	0,991
Cu _{ad} H ₂ SO ₄	0,734	0,163	0,182	0,982	0,683	0,148	0,254	0,977	0,868	0,082	0,553	0,962
Cu _{ps} H ₂ SO ₄	0,766	0,156	0,263	0,994	0,684	0,158	0,279	0,957	0,874	0,072	0,636	0,967

5.2.3.2. HCl liçi deney numunelerinin incelenmesi

HCl ile gerçekleştirilen; liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametreleri için çeşitli değer aralıklarında yapılan deneyler sonucu elde edilmiş olan optimum değerlere ait liç numunelerinin fotoğrafları (Şekil 5.45) ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılarak elde edilmiş olan sonuçlar Tablo 5.19’da verilmiştir.

Tane şekil faktörü çalışmaları kapsamında ImageJ analizine tabi tutulan Cu_{ls}HCl, Cu_{ad}HCl ve Cu_{ps}HCl numunelerinin tane boyut aralıkları -75+63 µm’dir. Dolayısıyla tüvenan değerler ile HCl liçi Cu optimum numuneleri Cu (2) ile karşılaştırılmıştır. Buna göre HCl liç işlemi sonucu her üç numunenin de dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Tablo 2.7’de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, her üç numunenin de “orta dairesellik” sınıf limiti aralığında olduğu görülmektedir. Tablo 2.5’de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, Cu_{ls}HCl ve Cu_{ps}HCl numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)’a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)’a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmektedir. Cu_{ad}HCl numunesinin Blott&Pye (2008)’a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Pettijohn (1949)’a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmektedir.



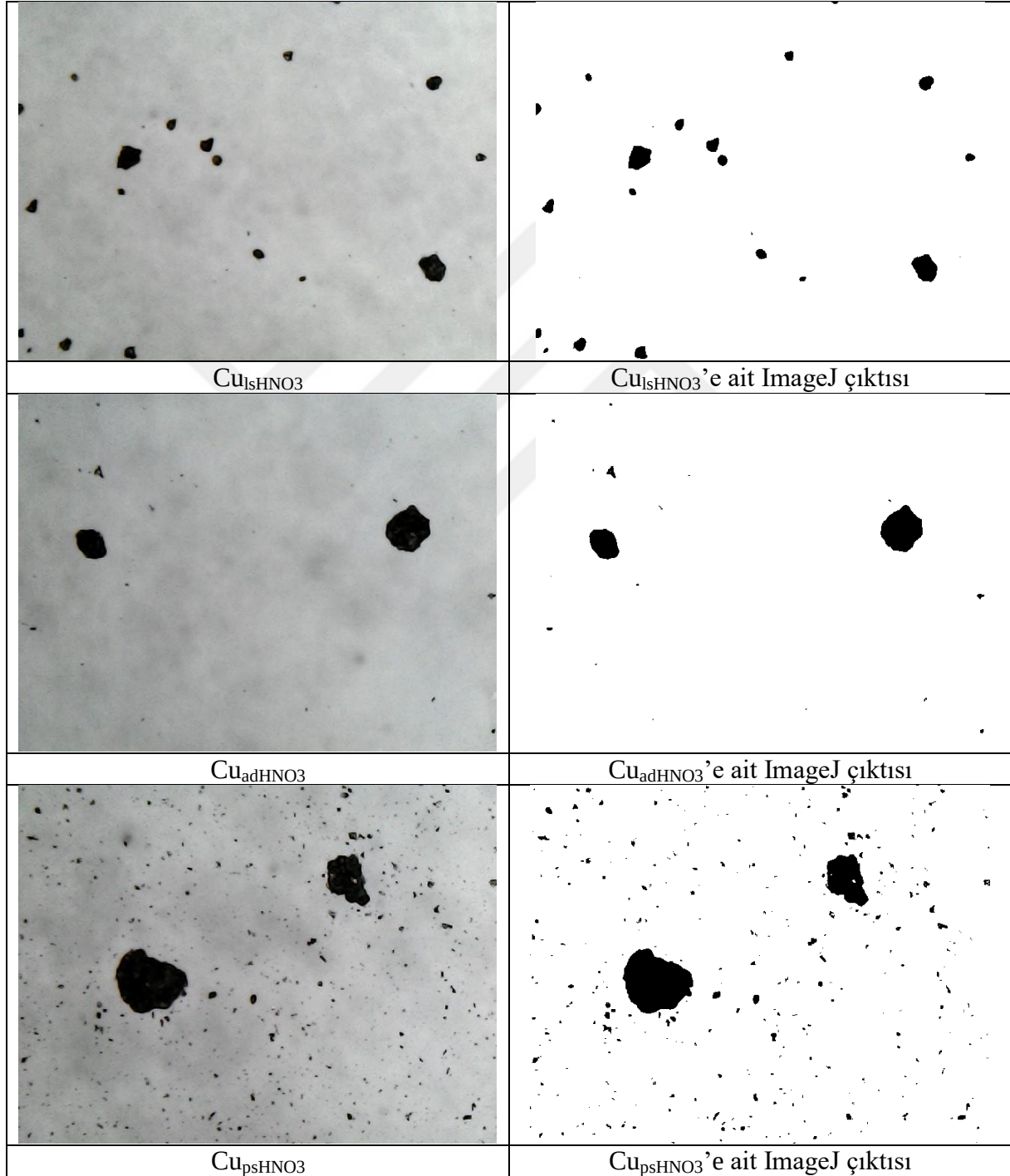
Şekil 5. 45: HCl liçi Cu optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları

Tablo 5. 19: HCl liçi Cu optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları

	Dairesellik				Yuvarlaklık				Sertlik			
	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max
Cu_{lsHCl}	0,739	0,170	0,151	0,988	0,693	0,142	0,290	0,990	0,871	0,077	0,489	0,979
Cu_{adHCl}	0,766	0,168	0,147	0,969	0,709	0,150	0,154	0,981	0,883	0,077	0,444	0,962
Cu_{psHCl}	0,750	0,152	0,291	0,974	0,657	0,159	0,219	0,956	0,862	0,075	0,561	0,953

5.2.3.3. HNO_3 liçi deney numunelerinin incelenmesi

HNO_3 ile gerçekleştirilen; liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı parametreleri için çeşitli değer aralıklarında yapılan deneyler sonucu elde edilmiş olan optimum değerlere ait liç numunelerinin fotoğraflanıp (Şekil 5.46) ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılarak elde edilmiş olan sonuçlar Tablo 5.20’de verilmiştir.



Şekil 5. 46: HNO_3 liçi Cu optimum numunelerine ait örnek optik mikroskop fotoğrafları ve ImageJ çıktıları

Tablo 5. 20: HNO₃ liçi Cu optimum numunelerine ait ImageJ analiz sonuçları

	Dairesellik				Yuvarlaklık				Sertlik			
	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max	OD	SS	Min	Max
Cu _{lsHNO3}	0,817	0,124	0,323	0,990	0,745	0,129	0,384	0,994	0,894	0,064	0,520	0,960
Cu _{adHNO3}	0,797	0,132	0,232	0,996	0,696	0,138	0,363	0,986	0,885	0,060	0,569	0,975
Cu _{psHNO3}	0,702	0,172	0,277	0,996	0,611	0,167	0,178	0,987	0,831	0,087	0,520	0,976

Tane şekil faktörü çalışmaları kapsamında ImageJ analizine tabi tutulan Cu_{lsHNO3}, Cu_{adHNO3} ve Cu_{psHNO3} numunelerinin tane boyut aralıkları -75+63 µm'dir. Dolayısıyla tüvenan değerler ile HNO₃ liçi Cu optimum numuneleri Cu (2) ile karşılaştırılmıştır. Buna göre HNO₃ liç işlemi sonucu her üç numunenin de dairesellik değerlerinin arttığı görülmektedir. Cu_{lsHNO3} ve Cu_{adHNO3}'ün yuvarlaklık ve sertlik değerleri artarken, Cu_{psHNO3}'ün yuvarlaklık ve sertlik değeri azalmıştır. Tablo 2.7'de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, Cu_{lsHNO3} ve Cu_{adHNO3} numunelerinin “yüksek dairesellik” sınıf limitleri, Cu_{psHNO3} numunesinin ise “orta dairesellik” sınıf limiti aralığında olduğu görülmektedir. Tablo 2.5'de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, Cu_{lsHNO3} numunesinin Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmektedir. Cu_{adHNO3} ve Cu_{psHNO3} numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında yapılmış olan literatür çalışması sonucu elde edilmiş olan veriler ışığında karakterizasyon çalışmaları, kimyasal zenginleştirme çalışmaları, kinetik analizler ve tane morfolojisi çalışmaları olarak dört ana başlık olarak planlanmıştır.

İlk başlık olan karakterizasyon çalışmaları kapsamında hem Pb-Zn hem de Cu numunelerinin fiziksel, kimsayal, mineralojik ve elektrokinetik özellikleri ortaya konarak birbirleriyle olan ilişkileri irdelenmiştir.

Balıkesir Balya bölgesi kurşun-çinko cevheriyle yapılan detaylı karakterizasyon çalışmaları sonucunda; numunenin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlara göre numunenin nem oranı %0,069, yoğunluğu $4,89 \text{ gr/cm}^3$, d_{50} ve d_{80} boyutları da sırasıyla 1,4 mm ve 3,55 mm olarak bulunmuştur. Kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen ICP-OES analizi sonucunda da %1,41 Pb ve %2,14 Zn içerdiği belirlenmiştir. Numunenin mineral kompozisyonunun belirlenmesi için gerçekleştirilen XRD analizi sonucunda Pb- Zn numunesinin kuvars (SiO_2), dolomit ($(\text{Mg}_{0.06}\text{Ca}_{0.94})(\text{CO}_3)$), sfalerit (ZnS), karpit (CaC_2) ve kalderit ($\text{Fe}_2\text{Mn}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}$) içerdiği belirlenmiştir. EDS analizleri sonuçları incelendiğinde, 1. fotoğraf için ortalama %9.95 Pb ve %9.55 Zn, 2. fotoğraf için %7.88 Pb ve %6.64 Zn, 3. fotoğraf için %12.71 Pb ve %13.58 Zn ve 4. fotoğraf için %11.31 Pb ve %8,04 Zn içeriği tespit edilmiştir. Parlak kesit çalışmaları sonucu Pb-Zn numunesinde galen, sfalerit ve çok az miktarda da pirit olduğu gözlenmiştir. Numunenin pH profili incelendiğinde pH 3, pH 5 ve pH 7 deneylerinde numunenin pH değerinin belirli bir süre sonra (pH 8 civarında) bazik bölgede tampon bir pH değerine ulaşma eğilimi göstermeye başladığı görülmüştür.

Kastamonu Küre bölgesi bakır cevheriyle yapılan detaylı karakterizasyon çalışmaları sonucunda; numunenin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlara göre numunenin nem oranı %0,0086, yoğunluğu $4,96 \text{ gr/cm}^3$, d_{50} ve d_{80} boyutları da sırasıyla 2,32 mm ve 4,48 mm olarak bulunmuştur. Kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen ICP-OES analizi sonucunda da %4,24 Cu içerdiği belirlenmiştir. Numunenin mineral kompozisyonunun belirlenmesi için gerçekleştirilen XRD analizi sonucunda numunenin kuvars (SiO_2), amesit ($\text{Al}_{1.849}\text{H}_4\text{Mg}_{2.076}\text{O}_9\text{Si}_{1.075}$), pirit (FeS_2) ve kalkopirit (CuFeS_2) içerdiği görülmüştür. EDS analizleri sonuçları incelendiğinde, 1. fotoğraf için ortalama %6.95, 2. fotoğraf için %5.36, 3. fotoğraf için %7.35 ve 4. fotoğraf için %11.76

Cu içeriği tespit edilmiştir. Parlak kesit çalışmaları sonucu bakırın kalkopirit minerali formunda, psedömorf, rölyefli, çok yüksek, ince kristalen halinde ve küp sistemi kristalize olmuş şekilde olduğu görülmüştür. Numunenin pH profili incelendiğinde pH 4,5, pH 8,5, pH 9,5 ve pH 10,5 deneylerinde numunenin pH değerinin belirli bir süre sonra (pH 8 civarında) bazik bölgede tampon bir pH değerine ulaşma eğilimi göstermeye başladığı görülmüştür.

İkinci ana başlık olan kimyasal zenginleştirme çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen kimyasal çözündürme deneylerinde numunelerin Pb, Zn ve Cu içeriklerinin yüksek verimle çözeltiye alınması hedeflenmiştir. Sülfürik asit (H_2SO_4) ile gerçekleştirilen kimyasal çözündürme deneylerinde; 75-106-150 μm tane boyutu, %5-10-15-20-25 katı oranı, 30-60-120-180-240 dak liç süresi, 0,25-0,5-1-2-5 M asit dozajı ve 30-40-50-60-70 °C pülp sıcaklığı parametreleri denenmiştir. Pb için optimum sonuçlar 106 μm tane boyutu, %20 katı oranı, 120 dak liç süresi, 0,5 M asit dozajı ve 50 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Zn için optimum sonuçlar 75 μm tane boyutu, %15 katı oranı, 120 dak liç süresi, 0,5 M asit dozajı ve 50 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Cu için optimum sonuçlar 75 μm tane boyutu, %25 katı oranı, 60 dak liç süresi, 1 M asit dozajı ve 70 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Belirtilmiş olan bu optimum koşullarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda %97,48 Pb, %97,32 Zn ve %95,04 Cu çözünme verimleri elde edilmiştir.

Hidroklorik asit (HCl) ile gerçekleştirilen kimyasal çözündürme deneylerinde; 75-106-150 μm tane boyutu, %5-10-15-20-25 katı oranı, 30-60-120-180-240 dak liç süresi, 0,25-0,5-1-2-5 M asit dozajı ve 30-40-50-60-70 °C pülp sıcaklığı parametreleri denenmiştir. Pb için optimum sonuçlar 106 μm tane boyutu, %20 katı oranı, 120 dak liç süresi, 0,25 M asit dozajı ve 60 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Zn için optimum sonuçlar 106 μm tane boyutu, %25 katı oranı, 60 dak liç süresi, 0,5 M asit dozajı ve 70 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Cu için optimum sonuçlar 75 μm tane boyutu, %15 katı oranı, 120 dak liç süresi, 0,5 M asit dozajı ve 70 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Belirtilmiş olan bu optimum koşullarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda %95,44 Pb, %96,38 Zn ve %94,80 Cu çözünme verimleri elde edilmiştir.

Nitrik asit (HNO_3) ile gerçekleştirilen kimyasal çözündürme deneylerinde; 75-106-150 μm tane boyutu, %5-10-15-20-25 katı oranı, 30-60-120-180-240 dak liç süresi, 0,25-0,5-1-2-5 M asit dozajı ve 30-40-50-60-70 °C pülp sıcaklığı parametreleri denenmiştir. Pb için optimum sonuçlar 75 μm tane boyutu, %20 katı oranı, 30 dak liç süresi, 0,5 M asit dozajı ve 60 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Zn için optimum sonuçlar 75 μm tane boyutu, %20 katı

oranı, 60 dak liç süresi, 1 M asit dozajı ve 50 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Cu için optimum sonuçlar 75 µm tane boyutu, %15 katı oranı, 120 dak liç süresi, 0,25 M asit dozajı ve 40 °C pülp sıcaklığı şartlarında elde edilmiştir. Belirtilmiş olan bu optimum koşullarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda %94,87 Pb, %96,06 Zn ve %95,71 Cu çözünme verimleri elde edilmiştir.

Üçüncü ana başlık olan kinetik analiz çalışmaları kapsamında Pb, Zn ve Cu için H₂SO₄, HCl ve HNO₃ deneylerinden elde edilmiş olan sonuçlara kimyasal model, difüzyon modeli ve film difüzyonu modeli uygulanarak çözünme hızının sıcaklığa bağlı olarak değişimi ortaya konmaya çalışılmıştır. Her numune ve her asit için -106+75 µm tane boyutu, 1 M asit dozajı, %20 katı oranı, 0-30 dak liç süresi, 50-90 °C pülp sıcaklığı, 250 dev/dak karıştırma hızı koşullarında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Pb liç deneylerinin kinetik analiz çalışmaları kapsamında H₂SO₄, HCl ve HNO₃ deneyleri için liç kinetiği incelendiğinde farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimleri grafiklendirilerek elde edilen doğruların eğiminden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanmış ve bu değerler incelendiği zaman Pb çözünmesinin her üç asit ortamında da Küçülen Çekirdek Modeli'nde difüzyon kontrollü modele uyduğu görülmüştür. Pb liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği doğrusunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi H₂SO₄ için 5,902 kJ/mol, HCl için 6,204 kJ/mol ve HNO₃ için de 3,151 kJ/mol'dür. H₂SO₄, HCl ve HNO₃ ile yapılan Pb liç deneylerinin kinetik analizleri incelendiğinde, her üç kinetik analiz çalışması sonucu belirlenmiş olan kinetik modellerle, Arrhenius grafiklerinden elde edilmiş olan verilerle hesaplanan aktivasyon enerjilerinin değer aralıklarının birbirlerini doğruladığı görülmüştür. Difüzyon kontrollü model için her üç deney için de tüm sıcaklık değerlerinde nispeten iyi oranda değerlerin elde edildiği, tüm çizgilerin orijinden ya da orijine yakın bir yerden geçtiği görülmüştür. Bu da reaksiyonun incelenen tüm sıcaklık aralıklarında difüzyon kontrollü olduğunu göstermiştir. Arrhenius grafiğinde belirgin bir kırılmanın olmaması da incelenen tüm sıcaklık aralıkları boyunca tek bir kinetik kontrol sürecinin etkin olduğunu göstermiştir.

Zn liç deneylerinin kinetik analiz çalışmaları kapsamında H₂SO₄, HCl ve HNO₃ deneyleri için liç kinetiği incelendiğinde farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimleri grafiklendirilerek elde edilen doğruların eğiminden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanmış ve bu değerler incelendiği zaman Zn çözünmesinin her üç asit ortamında da Küçülen Çekirdek Modeli'nde difüzyon kontrollü modele uyduğu görülmüştür.

Zn liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği doğrusunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi H_2SO_4 için 3,615 kJ/mol, HCl için 4,811 kJ/mol ve HNO_3 için de 4,736 kJ/mol'dür. H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 ile yapılan Zn liçi deneylerinin kinetik analizleri incelendiğinde, her üç kinetik analiz çalışması sonucu belirlenmiş olan kinetik modellerle, Arrhenius grafiklerinden elde edilmiş olan verilerle hesaplanan aktivasyon enerjilerinin değer aralıklarının birbirlerini doğruladığı görülmüştür. Difüzyon kontrollü model için her üç deney için de tüm sıcaklık değerlerinde nispeten iyi oranda değerlerin elde edildiği, tüm çizgilerin orijinden ya da orijine yakın bir yerden geçtiği görülmüştür. Bu da reaksiyonun incelenen tüm sıcaklık aralıklarında difüzyon kontrollü olduğunu göstermiştir. Arrhenius grafiğinde belirgin bir kırılmanın olmaması da incelenen tüm sıcaklık aralıkları boyunca tek bir kinetik kontrol sürecinin etkin olduğunu göstermiştir.

Cu liçi deneylerinin kinetik analiz çalışmaları kapsamında H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 deneyleri için liçi kinetiği incelendiğinde farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan çözünme verimleri grafiklendirilerek elde edilen doğruların eğiminden görünür hız sabitleri ve korelasyon katsayıları hesaplanmış ve bu değerler incelendiği zaman Cu çözünmesinin her üç asit ortamında da Küçülen Çekirdek Modeli'nde difüzyon kontrollü modele uyduğu görülmüştür. Cu liçi çözünme verimlerinde farklı sıcaklıklar için elde edilen Arrhenius grafiği doğrusunun eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi H_2SO_4 için 5,698 kJ/mol, HCl için 2,648 kJ/mol ve HNO_3 için de 4,561 kJ/mol'dür. H_2SO_4 , HCl ve HNO_3 ile yapılan Cu liçi deneylerinin kinetik analizleri incelendiğinde, her üç kinetik analiz çalışması sonucu belirlenmiş olan kinetik modellerle, Arrhenius grafiklerinden elde edilmiş olan verilerle hesaplanan aktivasyon enerjilerinin değer aralıklarının birbirlerini doğruladığı görülmüştür. Difüzyon kontrollü model için her üç deney için de tüm sıcaklık değerlerinde nispeten iyi oranda değerlerin elde edildiği, tüm çizgilerin orijinden ya da orijine yakın bir yerden geçtiği görülmüştür. Bu da reaksiyonun incelenen tüm sıcaklık aralıklarında difüzyon kontrollü olduğunu göstermiştir. Arrhenius grafiğinde belirgin bir kırılmanın olmaması da incelenen tüm sıcaklık aralıkları boyunca tek bir kinetik kontrol sürecinin etkin olduğunu göstermiştir.

Dördüncü ana başlık olan tane morfolojisinin etkisinin irdelendiği kısımda öncelikli olarak -75+63 μm , -106+75 μm ve -150+106 μm tane boyutlarındaki tüvenan Pb-Zn ve Cu numunelerine ait mikroskop fotoğrafları çekilmiş ve ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılarak her bir numuneye ait dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerlerine ait ortalama tane şekil faktörü değeri, standart sapma, minimum ve maksimum değerler

hesaplanmıştır. Daha sonra Pb, Zn ve Cu çözünme verimlerinin irdelendiği liç süresi, asit dozajı ve pülp sıcaklığı deneylerine ait optimum değerlerin elde edildiği liç numuneleri fotoğraflanarak ImageJ analiz programında tane şekil faktörü analizi yapılmış, her bir numunenin dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerlerine ait ortalama tane şekil faktörü değeri, standart sapma, minimum ve maksimum değerler hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular tüvenan numunelere ait verilerle karşılaştırılarak tane morfolojisinin çözünme kinetiğine olan etkileri ortaya konmaya çalışılmıştır.

Pb liç numuneleri tane morfolojisi çalışmaları kapsamında H_2SO_4 liç deney numuneleri incelendiğinde, $Pb_{lsH_2SO_4}$, $Pb_{adH_2SO_4}$ ve $Pb_{psH_2SO_4}$ numunelerinin tümünün dairesellik ve yuvarlaklık değerlerinin arttığı görülmüştür. $Pb_{lsH_2SO_4}$ 'ün sertlik değerleri azalırken, $Pb_{adH_2SO_4}$ ve $Pb_{psH_2SO_4}$ 'ün sertlik değerinde artış görülmüştür. Tablo 2.7'de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, $Pb_{lsH_2SO_4}$ ve $Pb_{adH_2SO_4}$ numunelerinin “düşük dairesellik”, $Pb_{psH_2SO_4}$ numunesinin de “orta dairesellik” sınıf limitleri aralığında olduğu görülmüştür. Tablo 2.5'de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, $Pb_{lsH_2SO_4}$, $Pb_{adH_2SO_4}$ ve $Pb_{psH_2SO_4}$ numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmüştür. HCl liç deney numuneleri incelendiğinde, yuvarlaklık değeri Pb_{lsHCl} için sabit kalırken, Pb_{adHCl} ve Pb_{psHCl} için arttığı görülmüştür. Sertlik değerinin ise her üç numune için arttığı görülmüştür. Tablo 2.7'de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre Pb_{lsHCl} ve Pb_{psHCl} numunelerinin “düşük dairesellik”, Pb_{adHCl} numunesinin de “orta dairesellik” sınıf limitleri aralığında olduğu görülmüştür. Tablo 2.5'de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, Pb_{lsHCl} , Pb_{adHCl} ve Pb_{psHCl} numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmüştür. HNO_3 liç deney numuneleri incelendiğinde, Pb_{lsHNO_3} ve Pb_{adHNO_3} numunelerinin dairesellik değerleri azalırken Pb_{psHNO_3} numunesinin dairesellik değerinin arttığı; Pb_{lsHNO_3} numunesinin yuvarlaklık değeri azalırken, Pb_{adHNO_3} ve Pb_{psHNO_3} numunelerinin yuvarlaklık değerlerinin arttığı görülmüştür. Sertlik değerleri incelendiğinde, Pb_{lsHNO_3} 'ün sertlik değerinin arttığı, Pb_{adHNO_3} ve Pb_{psHNO_3} 'ün sertlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. Tablo 2.7'de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, Pb_{lsHNO_3} ve Pb_{adHNO_3} “düşük dairesellik”, Pb_{psHNO_3} numunesinin de “orta dairesellik” sınıf limitleri aralığında olduğu görülmüştür. Tablo 2.5'de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, Pb_{lsHNO_3} , Pb_{adHNO_3} ve Pb_{psHNO_3} numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmüştür.

Zn liç numuneleri tane morfolojisi çalışmaları kapsamında H_2SO_4 liç deney numuneleri incelendiğinde, her üç numunenin de dairesellik değerleri azalırken, yuvarlaklık ve sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Tablo 2.7’de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, her üç numunenin de “düşük dairesellik” sınıf limiti aralığında olduğu görülmüştür. Tablo 2.5’de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, $Zn_{lsH_2SO_4}$ numunesinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Pettijohn (1949)’a göre “pürüzsüz” sınıf limitine, Blott&Pye (2008)’a göre “yuvarlak” sınıf limitine dahil olduğu görülmektedir. $Zn_{adH_2SO_4}$ ve $Zn_{psH_2SO_4}$ numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)’a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)’a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmüştür. HCl liç deney numuneleri incelendiğinde, üç numunenin de dairesellik değerlerinin arttığı görülmüştür. Zn_{lsHCl} ’in yuvarlaklık değeri artarken, Zn_{adHCl} ve Zn_{psHCl} ’in yuvarlaklık değerlerinin azaldığı görülmüştür. Sertlik değerleri incelendiği zaman, her üç numunenin sertlik değerinde artış olduğu görülmüştür. Tablo 2.7’de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, Zn_{lsHCl} numunesinin “orta dairesellik” sınıf limiti, Zn_{adHCl} ve Zn_{psHCl} numunelerinin ise “düşük dairesellik” sınıf limitleri aralığında olduğu görülmüştür. Tablo 2.5’de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, Zn_{lsHCl} , Zn_{adHCl} ve Zn_{psHCl} numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)’a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)’a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmüştür. HNO_3 liç deney numuneleri incelendiğinde, Zn_{lsHNO_3} ve Zn_{psHNO_3} numunelerinin dairesellik değerleri azalırken, Zn_{adHNO_3} numunesinin dairesellik değerinin arttığı görülmüştür. Zn_{lsHNO_3} ve Zn_{adHNO_3} numunelerinin yuvarlaklık değerleri artmış, Zn_{psHNO_3} numunesinin yuvarlaklık değeri azalmıştır. Zn_{lsHNO_3} numunesinin sertlik değeri sabit kalırken, Zn_{adHNO_3} numunesinin sertlik değeri artmış, Zn_{psHNO_3} ’ünki azalmıştır. Tablo 2.7’de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, Zn_{lsHNO_3} ve Zn_{psHNO_3} numunelerinin “düşük dairesellik” sınıf limitleri, Zn_{adHNO_3} numunesinin ise “orta dairesellik” sınıf limiti aralığında olduğu görülmüştür. Tablo 2.5’de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, Zn_{lsHNO_3} , Zn_{adHNO_3} ve Zn_{psHNO_3} numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)’a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)’a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmüştür.

Cu liç numuneleri tane morfolojisi çalışmaları kapsamında H_2SO_4 liç deney numuneleri incelendiğinde, her üç numunenin de dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Tablo 2.7’de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, her üç numunenin de “orta dairesellik” sınıf limiti aralığında olduğu görülmüştür. Tablo 2.5’de verilmiş olan

yuvarlaklık değerlerine göre, $\text{Cu}_{\text{IsH}_2\text{SO}_4}$, $\text{Cu}_{\text{adH}_2\text{SO}_4}$ ve $\text{Cu}_{\text{psH}_2\text{SO}_4}$ numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmüştür. HCl liçi deney numuneleri incelendiğinde, her üç numunenin de dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Tablo 2.7’de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, her üç numunenin de “orta dairesellik” sınıf limiti aralığında olduğu görülmüştür. Tablo 2.5’de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, Cu_{IsHCl} ve Cu_{psHCl} numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmüştür. Cu_{adHCl} numunesinin Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmüştür. HNO_3 liçi deney numuneleri incelendiğinde, her üç numunenin de dairesellik değerlerinin arttığı görülmüştür. $\text{Cu}_{\text{IsHNO}_3}$ ve $\text{Cu}_{\text{adHNO}_3}$ ’ün yuvarlaklık ve sertlik değerleri artarken, $\text{Cu}_{\text{psHNO}_3}$ ’ün yuvarlaklık ve sertlik değeri azalmıştır. Tablo 2.7’de verilmiş olan dairesellik değerlerine göre, $\text{Cu}_{\text{IsHNO}_3}$ ve $\text{Cu}_{\text{adHNO}_3}$ numunelerinin “yüksek dairesellik” sınıf limitleri, $\text{Cu}_{\text{psHNO}_3}$ numunesinin ise “orta dairesellik” sınıf limiti aralığında olduğu görülmüştür. Tablo 2.5’de verilmiş olan yuvarlaklık değerlerine göre, $\text{Cu}_{\text{IsHNO}_3}$ numunesinin Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmüştür. $\text{Cu}_{\text{adHNO}_3}$ ve $\text{Cu}_{\text{psHNO}_3}$ numunelerinin Russel&Taylor (1937), Powers (1953) ve Blott&Pye (2008)'a göre “yuvarlak” sınıf limitine, Pettijohn (1949)'a göre ise “pürüzsüz” sınıf limitine dahil olduğu görülmüştür.

Tane morfolojisi kimyasal çözündürme işleminin başarısını ve taneler arası etkileşimleri değerlendirmek için halen daha yeterince anlaşılamayan konulardan biri olduğundan, kimyasal çözündürme deneyleri ve çözünme kinetiği analizleriyle birlikte çeşitli ölçümler yoluyla belirlenmesi, modellenmesi ve çözünmeye etki eden mekanizmaların tespit edilmesi gereklidir. Çok çeşitli şekil faktörleri olmasına rağmen bu tez kapsamında dairesellik, yuvarlaklık ve sertlik değerlerinin önceliklendirilmesindeki temel amaç bu değerlerdeki değişimlerin göz önünde bulundurularak tane morfolojisinin kimyasal çözündürme işlemlerinde ne denli etki ediyor olduğunun araştırılmasıdır. Elde edilmiş olan sonuçlar irdelendiğinde, tane morfolojisindeki değişimlerin Pb, Zn ve Cu liç deneylerinde bir kontrol faktörü olabileceği görülmüştür. Ancak, tane morfolojisi halen daha tesis uygulamaları için araştırılması ve geliştirilmesi gereken bir prosestir.

KAYNAKLAR

Adebayo, A.O., Olasehinde, E.F., 2015, Leaching kinetics of lead from galena with acidified hydrogen peroxide and sodium chloride solution, *Mineral processing and extractive metallurgy*, 124 (3), 137-142.

Adebayo, A.O., Ipinmoroti, K.O., Ajayi, O.O., 2006, Leaching of sphalerite with hydrogen peroxide and nitric acid solutions, *Journal of Minerals&Materials Characterization&Engineering*, 5 (2), 167-177.

Allen, J.R.L., 1985, *Principles of physical sedimentology*, Chapman & Hall, London.

Altun, Y., Yılmaz, H., Şiner, İ., Yazar, F., 2015, Okyanus ortası sırtlarda oluşan masif sülfid yataklarının sırları ve Küre- Mağaradoruk bakır yatağı, *Maden Tetkik ve Arama dergisi*, 150, 51-65.

Apua M.C., Madiba M.S., 2021, Leaching kinetics and predictive models for elements extraction from copper oxide ore in sulphuric acid, *Journal of the Taiwan institute of chemical engineers*, 121, 313-320.

Aschenbrenner, B.C., 1956, A new method of expressing particle sphericity, *Journal of sedimentary research*, 26 (1), 15–31.

Avin, Ö., 2011, *Balıkesir ili imar planındaki mahallelerin zemin-jeoteknik değerlerinin Arcgis programı kullanılarak haritalandırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir.

Aydoğan S., 2006, Dissolution kinetics of sphalerite with hydrogen peroxide in sulphuric acid medium, *Chemical engineering journal*, 123 (3), 65-70.

Aydoğan S., Erdemoğlu M., Uçar G., Aras A., 2007, Kinetics of galena dissolution in nitric acid solutions with hydrogen peroxide, *Hydrometallurgy*, 88 (1-4), 52-57.

Aydoğan, S., Aras, A., Canbazoglu, M., 2005, Oxidative ammonia leaching of sphalerite concentrate, *Journal of the engineering and architecture faculty of Selcuk University*, 20 (2), 55-62.

Aydoğan, S., Erdemoğlu, M., Aras, A., Uçar, G., Özkan, A., 2006, Dissolution kinetics of celestite (SrSO₄) in HCl solution with BaCl₂, *Hydrometallurgy*, 84, 239-246.

Aykaç Y., 2006, *Oksit sülfür karışumlu kurşun-çinko cevherlerinin flotasyon artıklarından hidrometalurjik yöntemlerle çinko kazanılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik

Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Cevher&Kömür Hazırlama ve Değerlendirme Programı, İstanbul.

Azizi A., Ghasemi S.M.S., 2017, A comparative analysis of the dissolution kinetics of lead from low grade oxide ores in HCl, H₂SO₄, HNO₃ and citric acid solutions, *Metallurgical research Technology*, 114 (4), 12.

Baba A.A., Adekola F.A., 2010, Hydrometallurgical processing of a Nigerian sphalerite in hydrochloric acid: Characterization and dissolution kinetics, *Hydrometallurgy*, 101 (1-2), 69-75.

Baba, A., Adekola, F., 2012, A study of dissolution kinetics of a Nigerian galena ore in hydrochloric acid, *Journal of Saudi chemical society*, 16 (4), 377-386.

Baba, A.A., Adekola, F.A., 2011, Comparative analysis of the dissolution kinetics of galena in binary solutions of HCl/FeCl₃ and HCl/H₂O₂, *International journal of minerals, metallurgy and materials*, 18, 9-17.

Bardakçı K., Bardakçı A., 2021, Arkeolojik buluntular ışığında Konya-Manavgat-Mersin ortabatı Toros üçgeni prehistorik dönem bakır madenciliğinin gelişim süreci, *MT bilimsel*, 10 (20), 41-51.

Barrett, P.J., 1980, The shape of rock particles, a critical review, *Sedimentology*, 27, 291–303.

Başıyigit, C., Kılınçarslan, Ş, Çomak, B., 2012, Görüntü işleme tekniği ile beton basınç dayanımının tahmin edilmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16 (1), 82-88.

Benn, D.I., Ballantyne, C.K., 1993, The description and representation of particle shape, *Earth Surface Processes and Landforms*, 18 (7), 665–672.

Benn, D.I., Ballantyne, C.K., 1994, Reconstructing the transport history of glaciogenic sediments: a new approach based on the co-variance of clast form indices, *Sedimentary Geology*, 91 (1-4), 215–227.

Blott, S. J., Pye, K., 2008, Particle shape: a review and new methods of characterization and classification, *Sedimentology*, 55, 31-63.

Bowman, E. T., Soga, K., Drummond, T. W., 2001, Particle shape characterisation using Fourier Analysis, *Géotechnique*, 1-20.

Bozan, S., Demirela, G., Kuşçu, İ., 2017, Balya (Balıkesir) Pb-Zn Yatağı'nın jeolojisi ve alterasyon özellikleri, *70. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara.

Briggs, L.I., McCulloch, D.S., Moser, F., 1962, Hydraulic shape of sand particles, *Journal of sedimentary research*, 32 (4), 645–656.

Brouwers, H. J. H., Van Eijk, J. R., 2002, Fly ash reactivity: Extension and application of a shrinking core model and thermodynamic approach, *Journal of materials science* 37, 2129 – 2141.

Bulut G., 1991, *Balıkesir Balya yöresi kurşun-çinko tesis artıklarının değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Burger, W., Burge, M. J., 2016, *Digital image processing an algorithmic introduction using Java*, Second Edition, Springer-Verlag London.

Cailleux, A., 1945, Distinction des galets marins et fluviatiles, *Bulletin de la Société Géologique de France*, 15 (7-8), 375–404.

Cailleux, A., 1947, L'indice d'e'mousse' des grains de sable et gre'ss., *Rev. Ge'omorph. Dyn.*, 3, 78–87.

Carrillo-Pedroza, F. R., Soria-Aguilar, M. J., Salinas-Rodríguez, E., Martínez-Luevanos, A., Pecina-Treviño, T. E., Dávalos-Sánchez, A., 2012, *Oxidative hydrometallurgy of sulphide minerals*, Recent researches in metallurgical engineering - from extraction to forming, In: Nusheh M., Ahuett-Garza H., Arrambide A. (ed.), Chapter 2, Intechopen, ISBN 978-953-51-0356-1.

Chulalongkorn University (CU), 2018, *Particle morphology*, http://www.geo.sc.chula.ac.th/courses/2307223/2307223_02-particle_morphology.pdf, [Ziyaret Tarihi: 30.01.2018].

Corey, A.T., 1949, *Influence of shape on fall velocity of sand grains*, Unpublished MSc Thesis, Colorado A&M College.

Cox, E.A., 1927, A method for assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains, *Journal of paleontology*, 1 (3), 179–183.

Çalımlı, A., 2007, *Susam yağının süperkritik akışkanlar ile ekstraksiyonu ve matematik modelleme*, Ankara Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri, Bilimsel Araştırma Projesi kesin raporu, Ankara.

Çelik Balcı, N., Gül, S., Kılıç, M. M., Karagüler, N. G., Sarı, E., Sönmez, Ş., 2014, Balya (Balıkesir) Pb-Zn madeni atık sahasının biyojeokimyası ve asidik maden drenajı oluşumuna etkileri, *Türkiye jeoloji bülteni*, 57 (3), 1-24.

Çelik, H.İ., Dülger, L.C., Topalbekiroğlu, M., 2012, Görüntü işleme teknikleri kullanarak kumaş hatalarının belirlenmesi, *Tekstil teknolojileri elektronik dergisi*, 6 (1), 22-39.

Çomak, B., Beycioğlu, A., Başyigit, C., Kılınçarslan, Ş., 2011, Beton teknolojisinde görüntü işleme tekniklerinin kullanımı, *6th International advanced technologies symposium (IATS'11)*, Elazığ, Turkey, 220-227.

Çürük, A., 2006, *Farklı jeolojik ortamlarda oluşan piritlerin jeokimyasal incelemesi*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.

Demir, D., 2012, *Etibakır Küre işletmesi yeni maden sahasının jeolojik ve jeomekanik yer altı modellemesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Uygulamalı Jeoloji Programı, İstanbul.

Dobkins, J.E. Jr, Folk, R.L., 1970, Shape development on Tahiti-Nui, *Journal of sedimentary research*, 40 (4), 1167–1203.

DPT, 2001, *Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu*, Metal madenler alt komisyonu, Kurşun-çinko-kadmiyum çalışma grubu raporu, Ankara.

Dunn, E.J., 1911, Pebbles, Robertson, Melbourne, 122.

Dutrillac, J.E., Chen, T.T., 1994, Reaction of galena in ferric sulphate-sulphuric acid media, *Hydrometallurgy*, 125-138.

Ehsani A., Yazıcı E. Y., 2016, Anadolu'da bakır madenciliği ve kullanımının kısa tarihçesi, *MT bilimsel*, 5 (9), 43-48.

Engin A., 2002, *Zamanti yöresi oksit kurşun-çinko cevherlerinin zenginleştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Cevher Hazırlama Programı, İstanbul.

Espiari, S., Rashchi, F., Sadrnezhad, S. K., 2006, Hydrometallurgical treatment of tailings with high zinc content, *Hydrometallurgy*, 82, 54-62.

Evans, D. J. A., Benn, D. I., 2004, *A practical guide to the study of glacial sediments*, Edward Arnold, London, ISBN 0–340–75959–3.

Fidan E., 2016, Tarih öncesi dönemlerde Anadolu'da kullanılmış olan maden yatakları, *MT bilimsel*, 5 (9), 49-59.

Flemming, N.C., 1965, Form and function of sedimentary particles, *Journal of sedimentary research*, 35, 381–390.

Folk, R.L., 1955, Student operator error in determination of roundness, sphericity and grain size, *Journal of sedimentary research*, 25, 297–301.

Gök Ö., Anderson C.G., Çiçekli G., Cöcen E.İ., 2013, Leaching kinetics of copper from chalcopyrite concentrate in nitric-sulfuric acid, *Physicochemical problems of mineral processing*, 50 (1), 399-413.

Gül, S., 2014, *Balıkesir/Balya Pb-Zn maden atık sahasının biyojeokimyası ve asidik maden drenajı oluşumuna etkilerinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik

Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Uygulamalı Jeoloji Programı, İstanbul.

Hasani, M., Koleini S.M.J., Khodadadi A., 2016, Kinetics of sphalerite leaching by sodium nitrate in sulfuric acid, *Journal of mining and environment*, 7 (1), 1-12.

Helvacıoğlu M.M., 2016, *Bakır cevher zenginleştirilmesi işletmesinde iş sağlığı ve güvenliğinin değerlendirmesi*, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Ankara.

Hofmann, H.J., 1994, Grain-shape indices and isometric graphs, *Journal of sedimentary research*, 64 (4a), 916–920.

Hsu, W. L., Lin, M. J., Hsu, J. P., 2009, Dissolution of solid particles in liquids: A shrinking core model, *International journal of chemical and molecular engineering*, 3 (5), 256-261.

Illenberger, W.K., 1991, Pebble shape (and size!), *Journal of sedimentary research*, 61, 756–767.

Illenberger, W.K., 1992, Pebble shape (and size!) – reply, *Journal of sedimentary research*, 62, 1151–1155.

ImageJ, 2018, *ImageJ*, <https://imagej.net/ImageJ>, [Ziyaret Tarihi: 07.02.2018].

Janke, N.C., 1966, Effect of shape upon the settling velocity of regular convex geometric particles, *Journal of sedimentary research*, 36, 370–376.

Janoo, V.C., 1998, Quantification of shape, angularity and surface texture of base course materials, *US army corps of engineers cold regions research and engineering laboratory*, Hanover, NH, Special Report 98-1, 22.

Karadeniz, M., 2011, *Balıkesir-Balya- kurşun-çinko madeni flotasyon artıklarının asit maden drenajı oluşum potansiyelinin derinlikle değişiminin araştırılması*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.

Krumbein, W.C., 1941, Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles, *Journal of sedimentary research*, 11, 64–72.

Krumbein, W.C., Pettijohn, F.J., 1938, *Manual of sedimentary petrography*, D. Appleton-Century Company, Inc., New York, 549.

Kuenen, P.H., 1956, Experimental abrasion of pebbles: 2. Rolling by currents, *The journal of geology*, 64 (4), 336–368.

Kwan, A.K.H., Mora, C.F., Chan, H.C., 1999, Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing, *Cement and concrete research*, 29, 1403-1410.

Lan, S., Zondag, H. A., Rindt, C. C. M., 2015, Shrinking core model for the reaction-diffusion problem in thermo-chemical heat storage, *13th International Conference on Energy Storage*, 19-21 May 2015, Beijing, China.

Lees, G., 1964a, A new method for determining the angularity of particles, *Sedimentology*, 3, 2–21.

Lees, G., 1964b, *The measurement of particle shape and its influence in engineering materials*, J. British granite whinstone federation, 4, 1–22.

Lu, Z., Hu, X., Lu, Y., 2017, Particle morphology analysis of biomass material based on improved image processing method, *International journal of analytical chemistry*, 2017 (Special issue), Article ID 5840690, 9 pages.

Mackie, W., 1897, On the laws that govern the rounding of particles of sand, *Transactions of Edinburgh geological society*, 7, 298–311.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA-1), 2019, *Balıkesir ili maden ve enerji kaynakları*, http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/Balikesir_Madenler.pdf , [Ziyaret Tarihi: 11.03.2019].

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA-2), 2019, *Kastamonu ili maden ve enerji kaynakları*, http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/kastamonu_madenler.pdf, [Ziyaret Tarihi: 11.03.2019].

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA-3), 2021, *Kurşun*, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/kursun>, [Ziyaret Tarihi: 10.06.2021].

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA-4), 2021, *Çinko*, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/cinko>, [Ziyaret Tarihi: 10.06.2021].

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA-5), 2021, *Bakır*, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/bakir>, [Ziyaret Tarihi: 10.06.2021].

Majima, H., Awakura, Y., Hirato, T., Tanaka, T., 2013, The leaching of chalcopryrite in ferric chloride and ferric sulfate solutions, *Canadian metallurgical quarterly*, 24 (4), 283-291.

Markovich, T.I., Ptitsyn, A.B., 1998, Specifics of the sulfuric-acid processing of galena concentrates in the presence of nitrous acid, *Journal of mining science*, 34, 325-332.

Nasymov G., Gaibullaeva Z., Ay N., Smirnova A., 2019, Chemical, morphological, and kinetic study of lead extraction from the Koni Mansur polymetallic deposit, *Hydrometallurgy*, 183, 159-165.

Nazari, G., Asselin, E., 2009, Morphology of chalcopryrite leaching in acidic ferric sulfate media, *Hydrometallurgy*, 96, 183–188.

Nnanwube, I.A., Onukwuli, O.D., 2018, Hydrometallurgical processing of a Nigerian galena ore in nitric acid: Characterization and dissolution kinetics, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 6, 271-293.

Nunez, C., Espiell, F., García-Zayas, J., 1990, Kinetics of galena leaching in hydrochloric acid-chloride solutions, *Metallurgical and materials transactions B*, 21, 11-17.

Oakey, R.J., Green, M., Carling, P.A., Lee, M.W.E., Sear, D.A., Warburton, J., 2005, Grain-shape analysis – a new method for determining representative particle shapes for populations of natural grains, *Journal of sedimentary research*, 75 (6), 1065–1073.

Okay, V., 2013, Cevher zenginleştirmede liç yöntemi, *Madencilik Türkiye dergisi*, 35, 96-104.

Othusitse, N., Muzenda, E., 2015, Predictive models of leaching processes: A critical review, *7th International conference on latest trends in engineering & technology (ICLTET'2015)*, Nov. 26-27, Irene, Pretoria (South Africa).

Pecina, T., Franco, T., Castillo, P., Orrantia, E., 2008, Leaching of a zinc concentrate in H_2SO_4 solutions containing H_2O_2 and complexing agents, *Minerals engineering*, 21 (1), 23-30.

Peng, P., Xie, H., Lu, L., 2005, Leaching of sphalerite concentrate with H_2SO_4 - HNO_3 solutions in the presence of C_2Cl_4 , *Hydrometallurgy*, 80, 265-271.

Pentland, A., 1927, A method of measuring the angularity of sands, *Transaction of the royal society of Canada*, 21, Ser.3:xciii.

Petrovic, S.J., Bogdanovic, G.D., Antonijevic, M.M., 2018, Leaching of chalcopryrite with hydrogen peroxide in hydrochloric acid solution, *Transactions of nonferrous metals society of China*, 28 (7), 1444-1455.

Pettijohn, F.J., 1949, Sedimentary rocks. *Harper and Brothers*, New York, 526.

Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R., 1972, Sand and sandstone, *Springer-Verlag*, Berlin, 618.

Powers, M.C., 1953, A new roundness scale for sedimentary particles, *Journal of sedimentary research*, 23, 117–119.

Pryor, W.A., 1971, *Grain shape*, Procedures in sedimentary petrology, In: Carver R.E. (ed.), Wiley, New York, 131-150.

Pye, W., Pye, M., 1943, Sphericity determination of pebbles and sand grains, *Journal of sedimentary research*, 13, 28–34.

Riley, N.A., 1941, Projection sphericity, *Journal of sedimentary research*, 11, 94–97.

- Rittenhouse, G., 1943, A visual method of estimating twodimensional sphericity, *Journal of sedimentary research*, 13, 79–81.
- Russell, R.D., Taylor, R.E., 1937, Roundness and shape of Mississippi River sands, *The journal of geology*, 45 (3), 225–267.
- Safari, V., Arzpeyma, G., Rashchi, F., Mostoufi, N., 2009, A shrinking particle-shrinking core model for leaching of a zinc ore containing silica, *International journal of mineral processing*, 93 (1), 79-83.
- Sneed, E.D., Folk, R.L., 1958, Pebbles in the lower Colorado River, Texas: a study in particle morphogenesis, *The journal of geology*, 66 (2), 114–150.
- Sokić M., Marković B., Matković V., Živković D., Štrbac N., Stojanović J., 2012, Kinetics and mechanism of sphalerite leaching by sodium nitrate in sulphuric acid solution, *Journal of mining and metallurgy, Section B: metallurgy*, 48 (2), 185-195.
- Sokić, M., Marković, B., Stanković, S., Kamberović, Ž., Štrbac, N., Manojlović, V., Petronijević, N., 2019, Kinetics of chalcopyrite leaching by hydrogen peroxide in sulfuric acid, *Metals*, 9 (11), 1173, 1-13.
- Song, S., Rao, F., Zhang, X., 2013, Effect of morphology on sulphuric acid leaching of malachite ores, *Mineral processing and extractive metallurgy*, 120 (2), 85-89.
- Souza, A. D., Pina, P. S., Leao, V. A., Silva, C. A., Siqueira, P. F., 2007, The leaching kinetics of a zinc sulphide concentrate in acid ferric sulphate, *Hydrometallurgy*, 89 (1-2), 72-81.
- Takashimizu, Y., Iiyoshi, M., 2016, New parameter of roundness R: circularity corrected by aspect ratio, *Progress in Earth and Planetary Science*, 3(2), 1-16.
- Tegoni M., Valensin D., Toso L., Remelli M., 2014, Copper chelators: Chemical properties and bio-medical applications, *Current medicinal chemistry*, 21 (33), 3785-3818.
- Teller, J.T., 1976, Equantcy versus sphericity, *Sedimentology*, 23, 427–428.
- Tickell, F.G., 1931, *The examination of fragmental rocks*, Stanford University Press, Stanford.
- Uçar G., 2009, Kinetics of sphalerite dissolution by sodium chlorate in hydrochloric acid, *Hydrometallurgy*, 95 (1-2), 39-43.
- United States Geological Survey (USGS-1), 2021, *Lead statistics and information*, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lead-statistics-and-information>, [Ziyaret Tarihi: 10.06.2021].

United States Geological Survey (USGS-2), 2021, *Zinc statistics and information*, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/zinc-statistics-and-information>, [Ziyaret Tarihi: 10.06.2021].

United States Geological Survey (USGS-3), 2021, *Copper statistics and information*, <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/copper-statistics-and-information>, [Ziyaret Tarihi: 10.06.2021].

United States Geological Survey (USGS-4), 2021, *Copper-A metal for the ages*, <https://pubs.usgs.gov/fs/2009/3031/FS2009-3031.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 10.06.2021].

University of Michigan (UM), 2018, *The shrinking core model*, http://umich.edu/~elements/5e/14chap/expanded_ch14_A.pdf, [Ziyaret Tarihi: 02.02.2018].

Upstate Medical University (UMU), 2018, *Particle morphology*, http://www.upstate.edu/pathenvi/basics/particle_morphology.php, [Ziyaret Tarihi: 30.01.2018].

Uzuntaş M., 2007, *Kırıcı tipinin tane şekli üzerine etkisinin görüntü analiz yöntemiyle incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Cevher Hazırlama Bilim Dalı, Eskişehir.

Vanderbilt University (VU), 2018, *Leaching process*, <https://www.vanderbilt.edu/leaching/leaching-process/>, [Ziyaret Tarihi: 01.02.2018].

Velardo, A., Giona, M., Adrover, A., Pagnanelli, F., Toro, L., 2002, Two-layer shrinking-core model: parameter estimation for the reaction order in leaching processes, *Chemical engineering Journal*, 90, 231-240.

Wadell, H., 1932, Volume, shape, and roundness of rock particles, *The journal of geology*, 40 (5), 443-451.

Wadell, H., 1933, Sphericity and roundness of rock particles, *The journal of geology*, 41, 310-331.

Wadell, H., 1935, Volume, shape, and roundness of quartz particles, *The journal of geology*, 43, 250-280.

Wang, X., McDonald, R. G., Hart, R. D., Li, J., Van Riessen, A., 2013, Acid resistance of goethite in nickel laterite ore from Western Australia. Part I. The relationship between goethite morphologies and acid leaching performance, *Hydrometallurgy* 140, 48-58.

Wentworth, C.K., 1919, A laboratory and field study of cobble abrasion, *The journal of geology*, 27, 507-521.

Wentworth, C.K., 1922a, The shapes of beach pebbles, *United States Geological Survey Professional Papers*, 131 (C), 75-83.

- Wentworth, C.K., 1922b, *A method of measuring and plotting the shapes of pebbles*, The Shapes of Pebbles, United States Geological Survey Bulletin, 730 (C), 91-102.
- Wentworth, C.K., 1922c, *A field study of the shapes of river pebbles*, The Shapes of Pebbles, United States Geological Survey Bulletin, 730 (C), 103-114.
- Wentworth, C.K., 1933, The shapes of rock particles: a discussion, *The journal of geology*, 41, 306-309.
- Williams, E.M., 1965, A method of indicating pebble shape with one parameter, *Journal of sedimentary petrology*, 35 (4), 993-996.
- Wu, A., Yin, S., Qin, W., Liu, J., Qui, G., 2009, The effect of preferential flow on extraction and surface morphology of copper sulphides during heap leaching, *Hydrometallurgy*, 95 (1-2), 76-81.
- Yagi, S., Kunii, D., 1955, Studies on combustion of carbon particles in flames and fluidized beds, *Symposium (International) on combustion*, 5 (1), 231-244.
- Yagi, S., Kunii, D., 1961, Fluidized-solids reactors with continuous solids feed: Residence time of particles in fluidized beds, *Chemical engineering science*, 16 (34), 364-371.
- Yalçın Ü., 2016, Anadolu madencilik tarihine toplu bir bakış, *MT bilimsel*, 5 (9), 3-13.
- Yudhbir, Abedinzadeh, R., 1991, Quantification of particle shape and angularity using the image analyzer, *Geotechnical testing journal*, 14 (3), 296-308.
- Zingg, T., 1935, *Beitrag zur schotteranalyse*, Doktora tezi, Schweiz, Mineral. Petrogr. Mitt.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

DOKTORA TEZİ-TUĞBA DENİZ TOMBAL

ORJİNALLİK RAPORU

%16

BENZERLİK ENDEKSİ

%16

İNTERNET KAYNAKLARI

%4

YAYINLAR

%2

ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%2
2	nek.istanbul.edu.tr:4444 İnternet Kaynağı	%2
3	www.fenimining.com İnternet Kaynağı	%2
4	jcharacterization.org İnternet Kaynağı	%1
5	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%1
6	docplayer.biz.tr İnternet Kaynağı	%1
7	acikerisim.sakarya.edu.tr İnternet Kaynağı	%1
8	acikerisimarsiv.selcuk.edu.tr:8080 İnternet Kaynağı	%1
9	polen.itu.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1