



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



DOKTORA TEZİ

**FLOTASYONDA SU KALİTESİNİN KÖPÜK STABİLİTESİ VE KABARCIK-
TANE ETKİLEŞİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Saleban MOHAMED MUSE

**DANIŞMAN
Prof. Dr. İlgin KURŞUN**

**II. DANIŞMAN
Prof. Dr. Orhan ÖZDEMİR**

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği, Doktora Programı

Şubat, 2024

TEZ KABUL VE ONAYI

Saleban MOHAMED MUSE tarafından, **Prof. Dr. İlgin KURŞUN** danışmanlığında hazırlanan "**Flotasyonda Su Kalitesinin Köpük Stabilitesi ve Kabarcık-Tane Etkileşimi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **22/02/2024** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. İlgin KURŞUN	☒
	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. Mehmet Faruk ESKİBALCI	☒
	İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa	Kabul
	Maden Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Can GÜNGÖREN	☒
	İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa	Kabul
	Maden Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Hüseyin BAŞTÜRKÜ	☒
	İstanbul Teknik Üniversitesi	Kabul
	Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret



Aileme ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

FLOTASYONDA SU KALİTESİNİN KÖPÜK STABİLİTESİ VE KABARCIK-TANE ETKİLEŞİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK)
221M709 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmaların gerçekleştirilmesinde bana yol göstermiş, yönlendirmiş, fikir ve desteklerini esirgemeyerek her anlamda yanımda olan kıymetli danışmanlarım Prof. Dr. İlgin KURŞUN'a ve İTÜ Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Orhan ÖZDEMİR'e çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım esnasında benim için yeni ufuklar açan Tez İzleme Jüri Üyelerim İTÜ Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Birgül BENLİ'ye ve Doç. Dr. Mehmet FARUK ESKİBALCI'ya teşekkür ederim.

Tez çalışmaların boyunca desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Can GÜNGÖREN'e, Doç. Dr. Mert TERZİ'ye, Doç. Dr. Serkan TÜYLÜ'ye ve Araş. Gör. Dr. İsmail DEMİR'e sonsuz teşekkür ederim.

Bu tezin gerçekleşmesi için maddi destek sağlayan Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı (YTB) nezdinde Türkiye Cumhuriyeti Devleti'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu proje kapsamında kullanılan numunelerin temini ve çalışmalardan elde edilen sonuçların kimyasal analizlerinde yardımcı olan Eczacıbaşı Esan Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş. AR-GE Merkezi Danışmanı Sayın Doç. Dr. Salih ERSAYIN'a ve İTÜ Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Hüseyin BAŞTÜRKÇÜ'ye teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımda yardımlarını eksik etmeyen çalışma arkadaşım Maden Mühendisi Sercan ERBAŞ'a teşekkür ederim.

Beni her zaman destekleyen babam Mohamed MUSE ve annem Habiba ALİ'ye teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan, bana her zaman sabır ve anlayış gösteren eşim Hamda ADEN'e teşekkür ederim.

Şubat 2024

Saleban MOHAMED MUSE

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI.....	ii
BÜTÇE DESTEKLERİ	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ.....	xii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1. KURŞUN CEVHERİ VE GENEL ÖZELLİKLERİ	3
2.2. KURŞUN CEVHERLERİNİN ZENGİNLEŞTİRİLMESİ.....	3
2.3. DİNAMİK YÜZEY GERİLİM ÖLÇÜMLERİ.....	4
2.4. DİNAMİK KÖPÜK STABİLİTESİ.....	4
2.5. ZETA POTANSİYEL	6
2.6. TEMAS AÇISI ÖLÇÜMLERİ.....	7
2.7. KABARCIK SAUTER ORTALAMA ÇAPI VE KABARCIK BOYUT DAĞILIMI ÖLÇÜMLERİ.....	8
2.8. KABARCIK-KABARCIK BİRLEŞMESİ	9
2.9. KABARCIK-TANE YAPIŞMASI	10
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	11
3.1. MALZEME	11
3.2. pH PROFİLİ DENEYLERİ.....	16
3.3. DİNAMİK YÜZEY GERİLİM ÖLÇÜMLERİ.....	16
3.4. ZETA POTANSİYEL	17
3.5. TEMAS AÇISI ÖLÇÜMLERİ.....	18

3.6.	KABARCIK SAUTER ORTALAMA ÇAPI VE KABARCIK BOYUT DAĞILIMI ÖLÇÜMLERİ.....	19
3.7.	KABARCIK BİRLEŞME SÜRESİ ÖLÇÜMLERİ	20
3.8.	KABARCIK-TANE YAPIŞMA SÜRESİ ÖLÇÜMLERİ.....	22
3.9.	DİNAMİK KÖPÜK STABİLİTESİ ÖLÇÜMLERİ	22
3.10.	MİKRO-FLOTASYON DENEYLERİ	24
3.11.	KLASİK FLOTASYON DENEYLERİ	24
4.	BULGULAR.....	26
4.1.	PH PROFİLİ.....	26
4.2.	DİNAMİK YÜZEY GERİLİM ÖLÇÜMLERİ.....	27
4.3.	ZETA POTANSİYEL	34
4.4.	TEMAS AÇISI ÖLÇÜMLERİ.....	38
4.5.	KABARCIK SAUTER ORTALAMA ÇAPI (SMD) VE KABARCIK BOYUT DAĞILIMI ÖLÇÜMLERİ	42
4.6.	KABARCIK BİRLEŞME SÜRESİ ÖLÇÜMLERİ	48
4.7.	KABARCIK-TANE YAPIŞMA SÜRESİ ÖLÇÜMLERİ.....	50
4.8.	DİNAMİK KÖPÜK STABİLİTESİ ÖLÇÜMLERİ	53
4.9.	MİKRO-FLOTASYON DENEYLERİ	61
4.10.	KLASİK FLOTASYON DENEYLERİ	63
5.	TARTIŞMA.....	68
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	70
	KAYNAKLAR.....	72
	İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2. 1: EÇT oluşumu ve zeta potansiyelin şematik gösterimi.	7
Şekil 2. 2: Temas açısı oluşumunun şematik gösterimi.....	8
Şekil 3. 1: Numunenin tane boyutu dağılımı.....	11
Şekil 3. 2: (a) Sarsıntılı masa zenginleştirmesi (b) triyaj ile zenginleştirme sonrası elde edilen yüksek saflıktaki galen taneleri.	12
Şekil 3. 3: Tüvenan cevher XRD grafiği.	13
Şekil 3. 4: Triyaj konsantresinin XRD grafiği.....	13
Şekil 3. 5: Deneysel çalışmaların akım şeması.	15
Şekil 3. 6: pH profili deney düzeneği.	16
Şekil 3. 7: (a) Yüzey gerilim ölçüm cihazı (b) yüzey gerilim ölçüm düzeneği.....	17
Şekil 3. 8: Brookhaven Zetaplus Zetametre.	18
Şekil 3. 9: (a) Temas ölçüm cihazı ve (b) deney düzeneği.....	19
Şekil 3. 10: (a) Kabarcık boyut ölçümü cihazı ve (b) deney düzeneği.....	20
Şekil 3. 11: (a) CCC'nin belirlemede kullanılan ölçüm cihazı ve (b) deney düzeneği.	20
Şekil 3. 12: (a) Kabarcık birleşme süresi ölçüm cihazı ve (b) deney düzeneği.....	21
Şekil 3. 13: Kabarcık birleşme süresi ölçümlerinde meydana gelen işlemlerin sıralaması....	21
Şekil 3. 14: (a) Kabarcık-tane yapışma süresi ölçüm cihazı ve (b) deney düzeneği.	22
Şekil 3. 15: (a) Krüss DFA-100 dinamik köpük analiz cihazı ve (b) dinamik köpük stabilitesi ölçüm prensibi (Oetjen vd., 2014'ten uyarlanmıştır).	23
Şekil 3. 16: Deneylerde kullanılan (a) flotasyon hücresi (b) mikro-flotasyon deney düzeneği.	24
Şekil 3. 17: (a) Klasik flotasyon deney cihazı (b) deney düzeneği.	25

Şekil 4. 1: Tüvenan galen cevheri süspansiyonunun pH profili doğal pH ı değiştir.	26
Şekil 4. 2: YTS varlığında tüvenan galen cevheri süspansiyonunun pH profili.	27
Şekil 4. 3: Faklı konsantrasyonlarındaki BG çözeltilerinin dinamik yüzey gerilimi ölçüm sonuçları.	28
Şekil 4.4: BG konsantrasyonuna bağlı denge durumundaki yüzey gerilim değerleri (180. sn).	28
Şekil 4. 5: Çeşitli KEX konsantrasyonlarında dinamik yüzey gerilimi ölçümü sonuçları.	30
Şekil 4. 6: KEX konsantrasyonuna göre 180 sn’de denge yüzey gerilimi değerleri.	30
Şekil 4. 7: Çeşitli YTS konsantrasyonlarında dinamik yüzey gerilimi ölçümü sonuçları.....	31
Şekil 4. 8: YTS konsantrasyonuna göre 180 sn’de denge yüzey gerilimi değerleri.....	32
Şekil 4. 9: YTS ve BG varlığında dinamik yüzey gerilimi sonuçları.....	33
Şekil 4. 10: YTS ve BG varlığında denge yüzey gerilimi değerleri (180 sn) 16 ppm.	34
Şekil 4. 11: Galenin pH’a bağlı zeta potansiyeli.	35
Şekil 4. 12: Farklı çalışmalarda elde edilen galen zeta potansiyel değerleri.	35
Şekil 4. 13: Galenin KEX dozajına bağlı zeta potansiyeli (pH 6,70).	36
Şekil 4.14: YTS konsantrasyonuna bağlı galenin zeta potansiyeli (pH 6,8).	37
Şekil 4.15: Galenin KEX (50 gr/ton) varlığında YTS konsantrasyonuna bağlı zeta potansiyel değerleri.	38
Şekil 4. 16: Galen mineralinin farklı KEX konsantrasyonlarında dinamik temas açısı.	39
Şekil 4. 17: Galen mineralinin farklı YTS konsantrasyonlarında dinamik temas açısı.....	40
Şekil 4. 18: Galen mineralinin KEX (50 gr/ton) varlığında farklı YTS konsantrasyonlarında dinamik temas açısı.	41
Şekil 4. 19: Galen mineralinin KEX konsantrasyonuna bağlı denge temas açısı.....	42
Şekil 4.20: Farklı YTS konsantrasyonlarında kabarcıkların N_2 akış hızına bağlı Sauter ortalama çapı değerleri.	43
Şekil 4. 21: Farklı YTS konsantrasyonlarında kabarcık boyut dağılımı ($50 \text{ cm}^3/\text{dk } N_2$).	44
Şekil 4. 22: BG Konsantrasyonuna bağlı ışık şiddeti ve kabarcık birleşme yüzdesi değerleri ($50 \text{ cm}^3/\text{dk } N_2$).	45
Şekil 4. 23: Farklı YTS konsantrasyonlarında kabarcıkların frit açıklığına bağlı SMD değerleri (frit gözenek çapı (a) 10-16 μm , (b) 16-40 μm , (c) 40-100 μm).	46

Şekil 4.24: BG konsantrasyonuna bağlı Sauter ortalama çapı değerleri (50 cm ³ /dk N ₂).	47
Şekil 4.25: YTS Konsantrasyonunun BG yokluğunda ve 16 ppm (CCC) BG varlığında Sauter ortalama çapına etkisi (50 cm ³ /dk N ₂).	47
Şekil 4.26: 16 ppm (CCC) BG ve farklı YTS konsantrasyonlarında kabarcık boyut dağılımı (50 cm ³ /dk N ₂).	48
Şekil 4. 27: 1, 10, 100 ve 1000 ms temas sürelerinde BG konsantrasyonuna bağlı kabarcık birleşme yüzdesi değerleri.	49
Şekil 4. 28: -125+106 µm tane boyutu için temas süresine bağlı kabarcık-tane yapışma yüzdesi.	50
Şekil 4. 29: -106+75 µm tane boyutu için temas süresine bağlı kabarcık-tane yapışma yüzdesi.	51
Şekil 4. 30: -75+38 µm tane boyutu için temas süresine bağlı kabarcık-tane yapışma yüzdesi.	52
Şekil 4. 31: KEX (25 gr/ton) varlığında YTS konsantrasyonun kabarcık-tane yapışma yüzdesine etkisi.	52
Şekil 4.32: BG konsantrasyonun köpük yüksekliğine (a) köpük üretim, (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi ve (c) BG konsantrasyonuna bağlı maksimum köpük yükseklikleri.	54
Şekil 4.33: Hava akış hızının köpük yüksekliğine (a) köpük üretim, (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi ve (c) hava akış hızına bağlı maksimum köpük yükseklikleri.	55
Şekil 4. 34: YTS konsantrasyonun köpük yüksekliğine (a) köpük üretim, (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi ve (c) YTS konsantrasyonuna bağlı maksimum köpük yükseklikleri. ..	56
Şekil 4. 35: BG (16 ppm) varlığında YTS konsantrasyonunun (a) köpük üretim ve (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi ve (c) maksimum köpük yükseklikleri.	57
Şekil 4. 36: KEX (50 gr/ton) ve BG (16 ppm) varlığında YTS konsantrasyonunu (a) köpük üretim (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi ve (c) YTS konsantrasyonuna bağlı maksimum köpük yükseklikleri.	58
Şekil 4.37: PbS varlığında YTS konsantrasyonun (a) köpük üretim (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi ve (c) maksimum köpük yükseklikleri.	59
Şekil 4. 38: PbS, BG ve KEX varlığında YTS'nin (a) köpük üretim ve (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi.	60
Şekil 4. 39: BG (16 ppm) varlığında KEX konsantrasyonunun farklı tane boyutlarında galen mikro-flotasyon verimine etkisi.	62
Şekil 4. 40: Optimum konsantrasyonlarda KEX ve BG'nin YTS konsantrasyonuna bağlı olarak mikro-flotasyon verimine etkisi.	63

Şekil 4.41: Farklı tane boyutunda (-125, -106, -75 μm) galen ile gerçekleştirilen klasik flotasyon deney sonuçları (16 ppm BG, 40 gr/ton KEX, 1500 gr/ton ZnSO_4 , 600 gr/ton FeSO_4 , 10 L/dk N_2 akış hızı, Süre: 5 dk).....	64
Şekil 4. 42: Farklı hava akış hızlarında (5, 10, 15 dm^3/dk) galen ile gerçekleştirilen klasik flotasyon deney sonuçları (16 ppm BG, 40 gr/ton KEX, 1500 gr/ton ZnSO_4 , 600 gr/ton FeSO_4 , -75 μm tane boyutu, Süre: 5 dk).....	65
Şekil 4. 43: Klasik flotasyonda KEX dozajının etkisi (16 ppm BG, 1500 gr/ton ZnSO_4 , 600 gr/ton FeSO_4 , -75 μm tane boyutu, Süre: 5 dk).	65
Şekil 4.44: Klasik flotasyonunda PKO'nın etkisi (KEX 100 gr/ton, 16 ppm BG, 1500 gr/ton ZnSO_4 , 600 gr/ton FeSO_4 , -75 μm tane boyutu, Süre: 5 dk).	66
Şekil 4. 45: Klasik flotasyonunda YTS konsantrasyonunun etkisi (KEX 100 gr/ton, 16 ppm BG, 1500 gr/ton ZnSO_4 , 600 gr/ton FeSO_4 , -75 μm tane boyutu, Süre: 5 dk).....	67

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2. 1: Bazı anyon ve katyonların kabarcık birleşimine etkisi (Craig, 2004).....	10
Tablo 3. 1: Cevherin kimyasal analizi	12
Tablo 3.2: YTS’lerde kullanılan iyon türleri ve konsantrasyonları (TDS: Toplam Çözünmüş Katı, I: İyonik güç).	14
Tablo 3. 3: Deneysel çalışmalarda kullanılan kimyasallar	15
Tablo 3. 4: Klasik flotasyon deney koşulları	25
Tablo 4. 1: KEX konsantrasyonun dinamik yüzey gerilimi ölçüm sonuçları.	29
Tablo 4. 2: BG ve KEX varlığında ve yokluğunda farklı YTS konsantrasyonlarında kabarcık birleşme sonuçları.....	50

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
gr	: Gram
γ	: Yüzey gerilimi
d₈₀	: Cevherin %80'inin elek altına geçtiği tane boyutu
d₅₀	: Cevherin %50'sinin elek altına geçtiği tane boyutu
γ	: Yüzey enerjisi
I	: İyonik güç
ζ	: Zeta potansiyeli
μ	: Dinamik viskozite

Kisaltmalar	Açıklama
KEÜ	: Kümülatif elek üstü
KEA	: Kümülatif elek altı
XRF	: X ışını floresansı
XRD	: X ışını difraksiyonu
YTS	: Yapay Tesis Suyu
TDS	: Toplam çözünmüş katı
KEX	: Potasyum etil ksantat
BG	: Butil glikol
CCC	: Kritik birleşme konsantrasyonu
PKO	: Pülpte katı oranı
SYN	: Sıfır yük noktası
SMD	: Sauter Ortalama Çapı (Sauter Mean Diameter)
MTA	: Maden Tetkik ve Arama

ÖZET

[DOKTORA TEZİ]

FLOTASYONDA SU KALİTESİNİN KÖPÜK STABİLİTESİ VE KABARCIK-TANE ETKİLEŞİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

[Saleban MOHAMED MUSE]

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği, Doktora Programı

[Danışman : Prof. Dr. İlgin KURŞUN]

II. Danışman : Prof. Dr. Orhan ÖZDEMİR

[Bu tezin çalışma amacı galen mineralinin flotasyonunda yeniden kullanılan tesis sularında sıklıkla bulunan iyonların flotasyon verim ve seçiciliğine etkisinin ortaya konulmasıdır. Bu kapsamda Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Pb^{+2} , Zn^{+2} , Cu^{+2} , Fe^{+3} , SO_4^{-2} , Cl^- , CO_3^{-2} ve NO_3^- iyonlarının galen mineralinin flotasyonunda hava-su ve mineral-su arayüzeylerine, kabarcık-kabarcık ve kabarcık-mineral etkileşimleri üzerindeki etkileri; yüzey gerilimi, kabarcık birleşme süresi, kabarcık boyut dağılımı, dinamik köpük stabilitesi, temas açısı, kabarcık-tane yapışma süresi, mikro-flotasyon ve klasik flotasyon deneyleriyle iyon konsantrasyonu, mineral tane boyutu ve hava akış hızı parametrelerine bağlı olarak ortaya konulmuştur.

Deneysel çalışmaların sonucunda köpürtücü olarak kullanılan Butil Glikol (BG) varlığının konsantrasyona bağlı olarak suyun yüzey gerilimini azalttığı, ancak yukarıda belirtilen iyonları içeren Yapay Tesis Suyu (YTS) varlığında konsantrasyona bağlı olarak suyun yüzey geriliminin arttığı saptanmıştır. Saf su ile yapılan deneylerde zeta potansiyel -24,3 mV olarak ölçülürken YTS5 varlığında bu değer -18,7 mV yükselmiştir.

Ortamda az miktarda iyon varlığı (YTS1) KEX yokluğunda galenin temas açısını ciddi oranda arttırmış ve 30. sn'de 38°den 52°ye çıkartmıştır. İyon konsantrasyonunun artması temas açısında bir düşüşe sebep olsa da YTS10'da dahi saf sudakinden yüksek temas açısı değerleri elde edilmiştir.

YTS konsantrasyonu arttıkça daha küçük ve dar bir boyut aralığında kabarcıklar oluşmaktadır. BG yokluğunda YTS kullanıldığında BG ile elde edilen kabarcık boyutuna

yakın boyutta kabarcıklar elde edilebilmektedir. Saf suda 5,70 mm olan SMD (Sauter Mean Diameter), YTS1 varlığında 2,65 mm'ye düşmektedir.

YTS varlığında konsantrasyona bağlı olarak BG yokluğunda dahi kabarcık birleşmesi neredeyse tamamen engellenebilmektedir. YTS kullanımı ile daha stabil bir köpük elde edilebilmektedir. Köpük fazında mineral tanesi varlığı köpük stabilitesini daha da arttırmaktadır.

YTS konsantrasyona bağlı olarak kabarcık-tane yapışma olasılığı artmakta, kabarcık-tane yapışma süresi ise düşürmektedir. Saf suda 25 gr/ton KEX varlığında 1000 ms olan kabarcık-tane yapışma süresi, YTS10'da 550 ms'ye düşmüştür. Buna bağlı olarak da YTS kullanımı ile daha yüksek mikro-flotasyon verimi elde edilmiştir. Fakat konvansiyonel flotasyonda daha düşük verimler elde edilmiştir. Mikro-flotasyon verimi YTS10'da %96, klasik flotasyonda ise %81,7 olarak gerçekleşmiştir.

Bu tez çalışmasında elde edilen deneysel sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde YTS bünyesindeki iyon varlığının galen flotasyonunu olumlu olarak etkilediği sonucuna varılmıştır. |

Şubat 2024 , |95| sayfa.

Anahtar kelimeler: | Flotasyon, Galen, Yapay Tesis Suyu, SMD |

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF WATER QUALITY IN FLOTATION ON FROTH STABILITY AND BUBBLE-PARTICLE INTERACTION

Saleban MOHAMED MUSE

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Mining Engineering

Mining Engineering Programme

Supervisor : Prof. Dr. İlgin KURŞUN

Co-Supervisor: Prof. Dr. Orhan ÖZDEMİR

The aim of this thesis is to reveal the effects of ions, which are frequently found in plant waters reused in the flotation of galena mineral, on air-water and mineral-water interfaces, bubble-bubble and bubble-mineral interactions, and hence on flotation efficiency and selectivity. In this context, the effects of Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Pb^{+2} , Zn^{+2} , Cu^{+2} , Fe^{+3} , SO_4^{-2} , Cl^- , CO_3^{-2} , and NO_3^- ions on air-water and mineral-water interfaces, bubble-bubble and bubble-mineral interactions in the flotation of galena mineral were revealed via surface tension, bubble coalescence time, bubble size distribution, dynamic froth stability, contact angle, bubble-particle attachment time, micro-flotation, and classical flotation experiments, depending on the ion concentration, mineral particle size, and air flow rate parameters.

As a result of experimental studies, it has been determined that the presence of butyl glycol (BG) reduces the surface tension of water depending on concentration, but in the presence of Synthetic Plant Water (SPW) containing the above-mentioned ions, the surface tension of water increases depending on the concentration.

While the zeta potential was measured as -24.3 mV in experiments conducted with pure water, this value increased to -18.7 mV in the presence of SPW5.

The presence of a relatively low amount of ions (SPW1) in the medium significantly increased the contact angle of the galena in the absence of KEX and increased it from 38° to 52° after 30 seconds. Although the increase in the ion concentration causes a decrease in the

contact angle, higher contact angle values than those in pure water were also obtained in SPW10.

As the SPW concentration increases, bubbles form in smaller sizes with a narrower range. When SPW is used in the absence of BG, bubbles close to the bubble size obtained with BG can be obtained. SMD, which is 5.70 mm in pure water, decreases to 2.65 mm in the presence of SPW1.

As the SPW concentration increases, bubbles form in a smaller and narrower size range. When SPW is used in the absence of BG, bubbles close to the bubble size obtained with BG can be obtained. SMD (Sauter Mean Diameter), which is 5.70 mm in pure water, decreases to 2.65 mm in the presence of SPW1.

In the presence of SPW, bubble coalescence can be almost completely prevented, depending on the concentration, even in the absence of BG. Accordingly, a more stable foam can be obtained in the presence of SPW. The presence of mineral particles in the foam phase was also improved the foam stability.

Depending on the SPW concentration, the probability of bubble-particle adhesion increases and the bubble-particle adhesion time decreases. The bubble-particle adhesion time, which was 1000 ms in the presence of 25 gr/ton KEX in pure water, decreased to 550 ms in the presence of SPW10. Accordingly, higher micro-flotation efficiency was achieved with the use of SPW. However, the efficiencies in classical flotation were lower. Micro-flotation efficiency was 96% in SPW10 and 81.7% in classical flotation.

When the experimental results obtained in this thesis study are evaluated together, it can be concluded that the presence of ions in the SPW positively affects galena flotation. |

February 2024, |95| pages.

Keywords: | Flotation, Galena, Synthetic Plant Water, SMD |

1. GİRİŞ

Cevher hazırlama endüstrisinde uygulanan birçok zenginleştirme işlemi su kullanımına ihtiyaç duymaktadır (Biçak vd., 2018). Buna karşın dünyadaki su kaynaklarının azalması ve artan çevresel duyarlılıklar, endüstriyel işlemlerde deniz suyu ve kuyu suyu gibi su kaynaklarının kullanımını arttırmaktadır (Liu vd., 2013; Özdemir vd., 2009a; Yoon, 1982). Bununla beraber, daha çok tercih edilen bir diğer yöntem ise tesiste kullanılan suyun geri dönüştürülerek yeniden kullanılmasıdır (October vd., 2019). Ancak temiz su kaynaklarına kıyasla düşük kaliteli denilebilecek bu tip sularda bulunan çözünmüş iyonlar cevher hazırlama işlemlerini ciddi oranda etkileyebilmektedir. Bu kapsamda fizikokimyasal bir cevher zenginleştirme yöntemi olan flotasyon, kullanılan suyun kalitesinden en çok etkilenen yöntemlerin başında gelmektedir (Biçak vd., 2018; Hancer vd., 2001).

Bugün endüstride kullanılan birçok ürünün gerekli hammaddesini oluşturan yüzden fazla farklı mineral (bakır, kurşun, çinko, nikel, gümüş, mangan, krom, kobalt, titanyum, kuvars, feldspat ve kömür vb.) flotasyon yöntemi kullanılarak zenginleştirilmektedir. Bu sebeple flotasyon cevher hazırlamada kullanılan en önemli ayırma yöntemlerinden biridir.

Flotasyon yöntemi, flotasyon kimyasalı olan köpürtücüler ile uygun boyut ve sayıda ve stabil olarak oluşturulan hava kabarcıklarının, doğal hidrofobik ya da kollektör denilen diğer bir flotasyon reaktifile hidrofobik hale getirilmiş taneleri toplayabilmesine bağlıdır. Mineral taneleri birbirlerinden bir süspansiyon içerisinde oluşturulan, genellikle 0,5-2,5 mm boyutundaki, hava kabarcıkları yardımıyla ayrılırlar. Hava, hidrofobik özellik gösterdiğinden hidrofilik taneler ile çarpıştıklarında aralarında bir etkileşim oluşmaz ve hidrofilik taneler süspansiyon içerisinde kalırlar. Hidrofobik taneler ise oluşan kabarcıklara hidrofobik etki sayesinde yapışırlar. Yoğunluğu süspansiyonun yoğunluğundan daha düşük olan kabarcık-hidrofobik tane kümeleri süspansiyon yüzeyine yükselerek bir köpük tabakası oluşturur. Hidrofobik taneler taşıma/sıyırma işlemleri ile alınan köpükten kazanılırlar. Dolayısıyla flotasyon işleminin verimi önemli ölçüde tanenin boyutu, özgül ağırlığı, hidrofobluğu, ortam viskozitesi ve kabarcık boyutu gibi birçok fiziksel ve fizikokimyasal faktörden etkilenen hava kabarcıklarının hidrofobik mineral tanelerini toplama davranışına bağlıdır. Küçük tanelerin düşük momentuma sahip olmalarından dolayı pülpteki büyük kabarcıklara yapışma olasılığı,

yükselen bir kabarcığın etrafında oluşan sıvı akışının yüksek debisi sebebiyle küçük kabarcıklara kıyasla çok daha düşüktür (King, 2001). Bu nedenle flotasyon sistemindeki kabarcıkların boyutu, yani başka bir deyişle gaz dispersiyonu, flotasyon verimi ve seçimliliği açısından oldukça önemlidir (Ahmed ve Jameson, 1985; Laskowski vd., 2003; Yoon ve Luttrell, 1986, 1989).

Bütün bu bilgiler ışığında, özellikle yeniden kullanılan tesis suyu gibi düşük kaliteli sular varlığında ortamda bulunan iyonlar, tür ve konsantrasyonlarına bağlı olarak flotasyon reaktifleriyle etkileşmekte; hava-su ve mineral-su arayüzeylerinin davranışlarını değiştirmektedir. Dolayısıyla gaz (hava), sıvı (su) ve katı (mineral) fazlarının bir arada bulunduğu bir sistem olan flotasyon işleminin başarısı büyük oranda flotasyonda yer alan bu fazların arayüzeylerindeki etkileşimlerin tam olarak anlaşılmasına ve yönetilmesine bağlıdır.

Bu çalışmada galen mineralinin flotasyonunda yeniden kullanılan tesis sularında sıklıkla bulunan iyonların hava-su ve mineral-su arayüzeylerine, kabarcık-kabarcık ve kabarcık-mineral etkileşimlerine ve dolayısıyla flotasyon verim ve seçimliliğine etkisinin ortaya konulmuştur. Bu çalışmada, Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Pb^{+2} , Zn^{+2} , Cu^{+2} , Fe^{+3} , SO_4^{-2} , Cl^- , CO_3^{-2} ve NO_3^- iyonlarının kabarcık-kabarcık etkileşimlerine etkisi dinamik yüzey gerilimi, kabarcık birleşme süresi, kabarcık boyut dağılımı ve iki fazlı dinamik köpük stabilitesi deneyleriyle; kabarcık-mineral etkileşimlerine etkisi ise üç fazlı dinamik köpük stabilitesi, temas açısı, kabarcık-tane yapışma süresi, mikro-flotasyon ve klasik flotasyon deneyleriyle iyon konsantrasyonu, mineral tane boyutu ve hava akış hızı parametrelerine bağlı olarak ortaya konulmuştur.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. KURŞUN CEVHERİ VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Kurşun (Pb) sanayinin kullandığı önemli minerallerden biri olup, başlıca kullanım alanı akü imalatıdır. Diğer kullanım alanları arasında yeraltı haberleşme kabloları izolasyonu, korozyonu önleyen kurşun oksit boyalar, benzin içindeki oktan ayarlayıcı bileşikler ve radyasyondan korunma ekipmanları sayılabilir. Kurşunun en önemli ticari minerali ise galendir (PbS) (MTA-1).

2.2. KURŞUN CEVHERLERİNİN ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

Madencilik yöntemleri ile çıkarılan kurşun cevherleri genellikle endüstrinin ihtiyaç duyduğu tenör değerlerinde olmadığından zenginleştirme işlemlerine ihtiyaç duyulur. Kurşun mineralleri yüksek özgül ağırlıklarından dolayı serbestleşme tane boyutuna bağlı olarak spiral, jig, ağır ortam ayırıcıları, sarsıntılı masalar ve multi gravite ayırıcısı (MGS) gibi gravite yöntemleri ile zenginleştirilebilir (Yıldız, 2014).

Bununla beraber kompleks yapılı ve ince tane boyutunda serbestleşen kurşun cevherinde gravite zenginleştirilmesi ile ulaşılan metal kazanma verimleri düşük olmakta ve bu yöntemler ekonomikliğini yitirmektedir. Bu tane boyutundaki cevherler için endüstride en yaygın kullanılan zenginleştirme yöntemi flotasyondur (Çilek, 2006).

Flotasyon devreleri mineral fazının nakliyesi ve zenginleştirilmesi aşamalarında büyük miktarlarda su kullanımına ihtiyaç duyar (Di Feo vd., 2020). Su kaynaklarının yönetimi, insan yaşam kalitesi ve çevre ile yakından ilgili olduğu için dünyada giderek daha önemli bir konu haline gelmiştir. Bu nedenle, suyun yeniden kullanımı, tipik olarak su kıtlığıyla ilgili sorunları olduğu düşünülmeyen dünyanın birçok bölgesindeki ülkelerde bile, gelişmekte olan uygulamalardır (Liu vd., 2013). Tüm mineral zenginleştirme uygulamaları arasında fizikokimyasal temellere dayanmasından ötürü proses suyunun kalitesinden en çok etkilenen yöntem flotasyondur (Öztürk ve Ekmekçi, 2020). Sıvı ortamda bulunan iyonların bazıları flotasyon işlemini olumlu yönde etkilerken bazıları da olumsuz yönde etki etmektedir. Flotasyon işlemleri genel olarak temiz su gerektirmez ancak tutarlı ve kontrol edilebilir bir su kalitesine ihtiyaç duyar. Böylece flotasyon reaktifleri tutarlı bir şekilde ayarlanabilir ve uygulanabilir. Proses suyunda safsızlık oluşturan temel bileşenler sülfatlar, klorürler,

kalsiyum, baz metaller ve flotasyon kimyasallarıdır (Bıçak, vd. 2012; Dzingai, vd., 2020; Muzenda, 2010; Öztürk ve Ekmekçi, 2020). Proses suyunun kimyasal bileşenleri, sıvı-gaz arayüzey özellikleri ile flotasyonda köpük yüksekliği ve stabilitesi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir (Levay ve Schumann, 2006). Çözünmüş iyonların çözelti kimyasını ve ara yüzeyleri etkileyerek, kabarcıklar ile taneler arasındaki kolloidal etkileşimleri değiştirmesi sebebiyle minerallerin flotasyonunu etkilediği bilinmektedir (Özdemir vd., 2009a).

2.3. DİNAMİK YÜZEY GERİLİM ÖLÇÜMLERİ

Sıvı molekülleri arasındaki kohezyon kuvvetleri sebebiyle bir sıvının yüzey alanı artırmak için yapılması gereken işe yüzey gerilimi denir. Yüzey aktif maddelerin ve çözünmüş iyonların hava-sıvı arayüzeyine adsorplanmasıyla yüzey gerilimi bir denge kurulana kadar zamanla değişir. Denge durumunda ölçülen yüzey gerilimi statik yüzey gerilimini oluştururken, yüzey geriliminin zamana bağlı olarak ölçülmesine dinamik yüzey gerilimi adı verilir (Comley vd., 2002; Özdemir vd., 2009). Yüzey gerilimi flotasyonda kabarcık büyüklüğü, köpük stabilitesi ve mineral tanelerinin ıslanabilirliği gibi süreçleri doğrudan etkilediğinden büyük öneme sahiptir (Bhattacharya ve Dey, 2008; Pugh vd., 1997).

İnorganik tuzlar genellikle yüzey gerilimini artırma eğilimindeyken köpürtücüler azaltır ve inorganik iyonlar genellikle iki fazlı (su-gaz) sistemlerde köpük (köpük) oluşturmazlar (Quinn vd., 2007).

Köpürtücüler, kabarcık birleşmesinin ve dolayısıyla kabarcık boyutunun kontrol edilmesinde kullanılan başlıca kimyasallar olmalarına karşın, yapılan çalışmalar bazı çözünmüş kation/anyon çiftlerinin de geçiş konsantrasyonu (transition concentration) (Christenson ve Yaminsky, 1995; Bournival vd., 2014) olarak adlandırılan bir konsantrasyon değerinin üzerinde kabarcık birleşmesini engellediğini göstermiştir (Bournival vd., 2012; Castro vd., 2013; Craig vd., 1993; Foulk ve Miller, 1931; Horn vd., 2011; Kurniawan vd., 2011; Özdemir vd., 2009; Özdemir, 2013). Bu durum oldukça ilgi çekicidir. Çünkü köpürtücülerin aksine çoğu iyon saf suyun yüzey gerilimini artırır.

2.4. DİNAMİK KÖPÜK STABİLİTESİ

Flotasyonda hava-su arayüzey gerilimi, dolayısıyla kabarcık birleşmesi ve nihayetinde kabarcık boyutu genellikle köpürtücü adı verilen yüzey aktif maddelerle kontrol edilir

(Ahmed ve Jameson, 1985; Corona-Arroyo vd., 2015; Cho ve Laskowski, 2002a; Laskowski vd., 2003; Yoon ve Luttrell, 1986, 1989). Yüzey aktif bir madde olan köpürtücüler genellikle alkoller veya poliglikol eterler gibi organik heteropolar bileşiklerdir. Molekülün hidrofilik (polar) uç grubu çevresindeki su molekülleriyle kolayca hidrojen bağları oluşturur. Hidrokarbondan oluşan polar olmayan kök kısım ise hidrofobiktir ve kendisini hidrofobik olan gaz (hava) fazına doğru yönlendirme eğilimindedir. Bu heteropolar doğası nedeniyle köpürtücü hava/su arayüzünde adsorbe olur ve sonuç olarak suyun yüzey gerilimini azaltır (Bournival, vd., 2017; Gupta ve Yan 2006). Böylelikle kabarcık-kabarcık birleşmesi azaltılarak oluşan kabarcıkların küçük boyutlarda kararlı olarak kalması sağlanır (Bournival vd., 2012; Sam, A. 1995). Bu sebeple bir köpürtücü çözeltisinin yüzey gerilimi, köpürtücü moleküllerinin yüzey aktifliğinin önemli bir göstergesi olarak kabul edilir (Batjargal vd., 2021).

Flotasyon köpük bölgesinde kabarcık birleşmesi ve patlaması yani köpük stabilitesi (kararlılığı) kontrol altında tutulur. Stabil olmayan bir köpük ile hidrofob tanelerin verimli kazanımı mümkün olmaz. Ancak aşırı stabil bir köpük de hidrofilik tanelerin mekanik taşınımını arttırarak konsantre tenörünün düşmesine sebep olur. Dolayısıyla verim ve tenör açısından her flotasyon hücresi ve koşulu için optimum bir köpük stabilitesi vardır (Farrokhpay, 2011).

Flotasyon verimini ve konsantre tenörünü arttırmak için köpük yapısı ve stabilitesinin anlaşılması şarttır (Farrokhpay, 2011). Köpük stabilitesi köpükteki kabarcıkların patlamaya ve birleşmeye karşı gösterdikleri direnç olarak tanımlanabilir. Daha stabil bir köpük daha küçük kabarcıklardan meydana gelir ve köpükte daha az kabarcık patlaması ve birleşmesi olayı gerçekleşir (Farrokhpay, 2011). Köpük stabilitesi iki fazlı köpük sistemlerinde (foam) yüzey aktif maddeler veya çözünmüş iyonlar tarafından kontrol edilirken, üç fazlı köpük sistemlerinde (froth) katı taneler de etkilidir. Dolayısıyla köpük stabilitesi kullanılan köpürtücünün tür ve konsantrasyonuna bağlı olduğu gibi sistemdeki katı tanelerin doğasına ve konsantrasyonuna da bağlıdır. Tanelerin kabarcıklar etrafında bir tabaka oluşturarak, kabarcıkları ayıran sıvı filmini daha stabil hale getirmesi ve üç boyutlu bir ağ oluşturması köpük stabilitesi için önemli parametrelerdir (Farrokhpay, 2011). Bu nedenle flotasyon köpüğünün incelenmesi katı taneler varlığında da yapılır. Günümüzde köpük stabilitesinin ölçümünde kabul edilen tek bir standart yoktur. Köpük yarılanma ömrü (Zanin vd., 2009), denge durumundaki maksimum köpük yüksekliği (Barbian vd., 2005) gibi parametreler bu

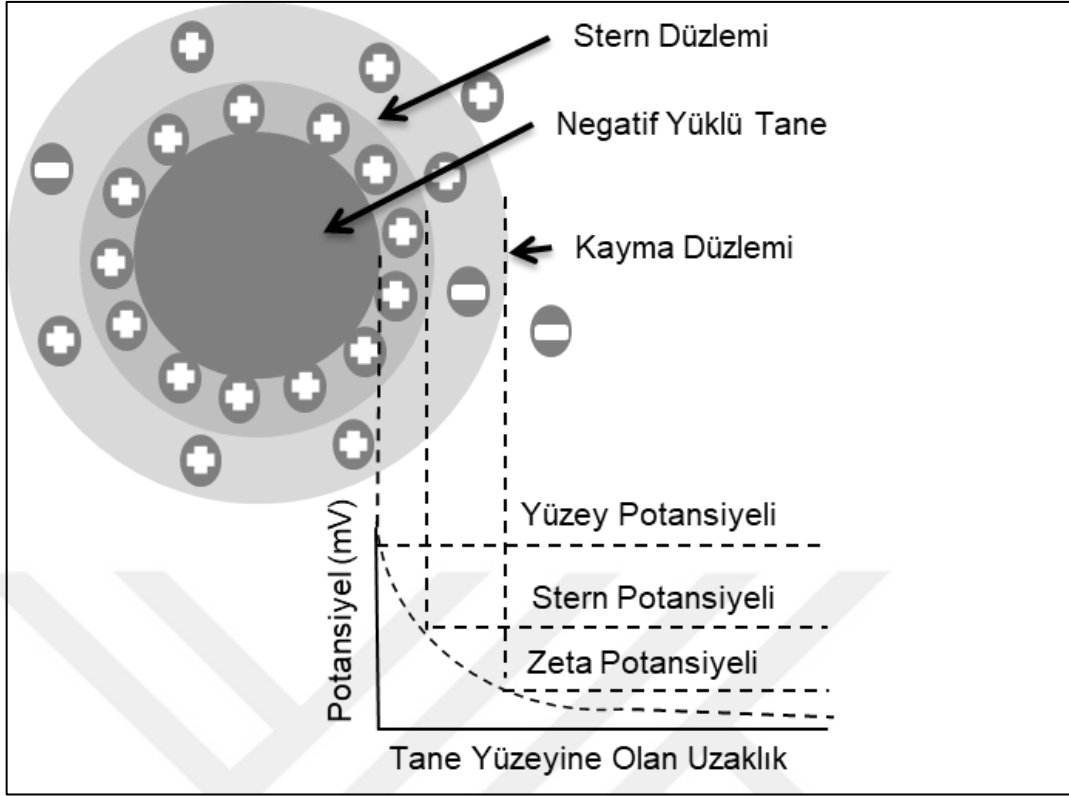
amaç doğrultusunda kullanılabilir. Bu sebeple köpük stabilitesinin ölçülmesi hala ilgi çeken bir araştırma konusudur (Farrokhpay, 2011).

2.5. ZETA POTANSİYEL

Mineral tanesi su içinde bulunduğunda yüzeyinde bulunan bazı iyonlar sıvı faza geçer. Bu nedenle mineral yüzeyi yük kazanır. Bunun sonucunda mineralin yakın çevresindeki su, suyun H^+ ve OH^- iyonları ile katıdan gelen iyonlardan oluşan bir iyon çözeltisi haline gelir. Mineral yüzeyinin işareti ile zıt işaretli olan iyonlar (counter-ions) elektriksel çekim kuvvetleri ile yüzeye çekilir. Öte yandan yüzeye aynı elektrik işaretine sahip iyonlar (co-ions) ise da yüzeyden itilir. Yüzeyin elektrik yükünü belirleyen veya değiştiren iyonlara potansiyeli tayin eden iyonlar denir.

Elektriksel Çift Tabaka (EÇT), tane yüzeyinde adsorbe olan iyonları ve karşı yüklü dispersiyon ortamını içererek taneyi çevreleyen bir tabakadır. EÇT içindeki elektrik potansiyeli tane yüzeyinde maksimum değere sahiptir. Potansiyel, yüzeyden uzaklaştıkça azalır ve EÇT sınırında sıfıra ulaşır (Salopek, vd., 1992).

Katı yüzeyinde oluşan potansiyel yüzey potansiyeli olarak adlandırılırken bu potansiyelin pratikte ölçülmesi oldukça zordur. Bunun yerine genellikle tanenin yüzeyine adsorbe olan iyonlar ile birlikte hareket ettiği kayma düzlemindeki (shear plane) potansiyel ölçülür bu potansiyele zeta potansiyel (ζ) adı verilir. EÇT oluşumu ve zeta potansiyelin şematik görünümünü Şekil 2. 1’de verilmiştir.



Şekil 2. 1: EÇT oluşumu ve zeta potansiyelin şematik gösterimi.

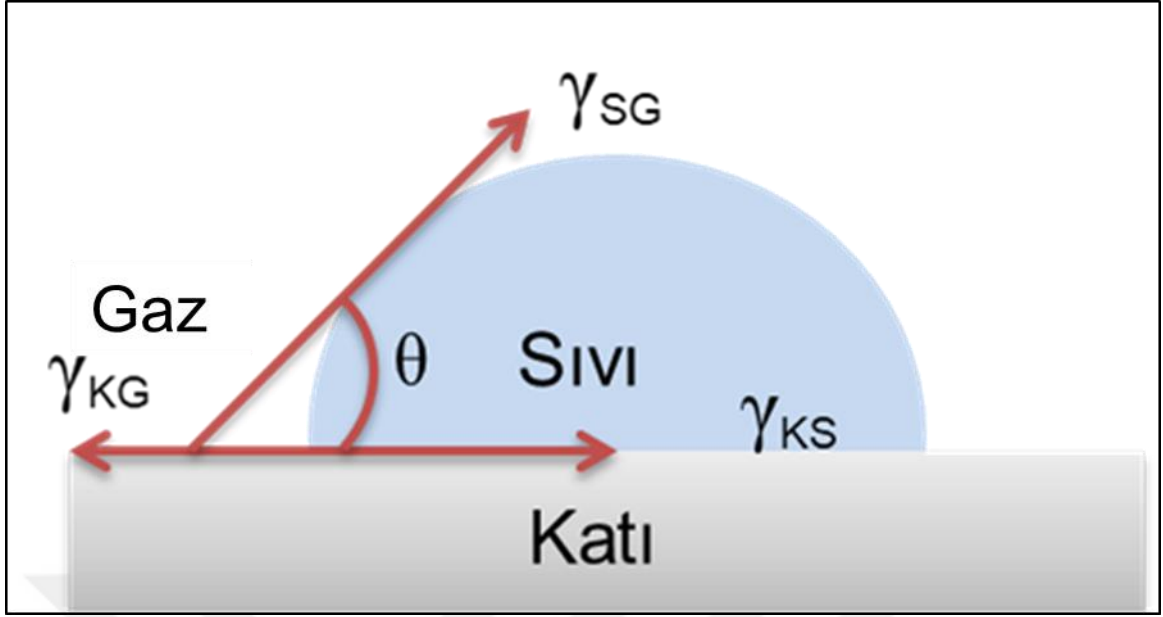
2.6. TEMAS AÇISI ÖLÇÜMLERİ

Temas açısı, bir katının sıvı bir yüzey ile yaptığı açı olarak tanımlanır. Tane bir sıvı yüzey ile temas ettiğinde, katı-sıvı-gaz arayüzündeki kuvvetlerin dengesi temas açısı ile karakterize edilir. Temas açısı katı mineral yüzeylerinin ıslanabilirliğinin önemli göstergelerinden olup, temas açısı ile minerallerin flotasyonla yüzebilirliği arasında yakın bir ilişki vardır (Chau, vd., 2009; Prestidge ve Ralston 1997)

Temas açısı, ara yüzey gerilimleri arasındaki kuvvetlerin dengesi ile ilişkilidir ve Young eşitliği ile ifade edilir. Bu durum Şekil 2. 2’de verilmektedir.

$$\gamma_{KG} - \gamma_{KS} = \gamma_{SG} \cos\theta$$

Burada γ_{KG} katı-gaz arasındaki, γ_{KS} katı-sıvı arasındaki, γ_{SG} sıvı-gaz arasındaki yüzey gerilimi, θ ise temas açısıdır.



Şekil 2. 2: Temas açısı oluşumunun şematik gösterimi (Chau, vd., 2009).

Temas açısı yüzeyin pürüzlülüğü, heterojenliği, tane şekli ve tane boyutu gibi fiziksel ve kimyasal birçok faktöre bağlıdır (Chau, vd., 2009).

2.7. KABARCİK SAUTER ORTALAMA ÇAPI VE KABARCİK BOYUT DAĞILIMI ÖLÇÜMLERİ

Flotasyonda gaz dispersiyonu başka bir deyişle kabarcık boyutu işlem verimi ve seçimliliği üzerinde önemli bir rol oynar (Laskowski vd., 2003). Bir flotasyon sisteminde oluşan hava kabarcıklarının boyutu sisteme verilen havanın debisine ve havayı dağıtan sistemin geometri, gözenek açıklığı gibi özelliklerine bağlıdır. Kabarcıklar sistemde oluştuktan sonra iyon/köpürtücü kullanımı ile kabarcıkların birleşmeleri engellenerek ilk oluştukları boyutta kalmaları sağlanabilir. Gaz dispersiyonunun en önemli göstergelerinden biri Kabarcık Boyut Dağılımıdır (Bubble Size Distribution-BSD). Farklı boyutlara sahip küresel nesnelerden (taneler, damlacıklar ve kabarcıklar gibi) oluşan bir topluluğun çapı, ortalama çap olarak adlandırılan tek bir değerle ifade edilebilir. Ortalama çapın hesabında kullanılan yöntemlerin başında Sauter Ortalama Çapı (Sauter Mean Diameter-SMD, d_{32}) gelmektedir (Drelich, 1997; Kowalczyk ve Drzymala, 2016; Vazirizadeh vd., 2016).

Flotasyonda kabarcık boyutu genellikle köpürtücü reaktifler ile kontrol edilir. Hava kabarcıklarının birleşmesini etkili bir şekilde önleyen minimum köpürtücü konsantrasyonu Kritik Birleşme Konsantrasyonu (CCC) olarak isimlendirilir. Genel olarak bir köpürtücünün

molar kütlesi ne kadar yüksek olursa CCC değerinin de o kadar düşük olduğu gözlemlenir (Szyska, 2018, Cho vd., 2002).

2.8. KABARCIK-KABARCIK BİRLEŞMESİ

Flotasyonda kabarcıklar birbirine doğru ilerledikçe aralarında bulunan sıvı zamanla drene olur. Böylece iki kabarcık arasındaki sıvı filmi giderek inceler ve sonunda yırtılır (Ahmed ve Jameson, 1985; Ata, 2008; Ata ve Jameson, 2005; Orvalho vd., 2015; Tao, 2005). Sonuç olarak iki kabarcık birleşerek daha büyük tek bir kabarcık oluşturur. Bu duruma kabarcık birleşmesi (bubble coalescence) adı verilir. Kabarcık birleşmesi flotasyon verimini kabarcık-tane çarpışmasını/yapışmasını zorlaştırarak (Ata, 2009; Laskowski vd., 2003; Yoon ve Luttrell, 1986; Zhu vd., 2018) ve yüzeye tutunmuş tanelerin ayrılmasına neden olarak (Ang vd., 2013) olumsuz yönde etkiler.

Marucci ve Nicodemo (1967) çözünmüş iyonların kabarcık birleşmesini engelleme yeteneğinin konsantrasyonun yanı sıra iyon değerliğine, iyon çapına ve yüzey gerilimine olan etkisine de bağlı olduğunu bildirmiştir. Craig (2004) ise çeşitli deneysel çalışmalarla iyonları kabarcık birleşmesini engelleme özelliklerine göre α veya β olarak sınıflamıştır. Araştırmacılara göre α - α ve β - β katyon-anyon çifti kabarcık birleşmesini engellerken α - β ve β - α katyon-anyon çiftinin kabarcık birleşmesi üzerine ciddi bir etkisi bulunmaz. Bir iyonu α veya β yapan özelliğin ne olduğu hala tam olarak anlaşılmış değildir (Castro vd., 2013; Craig, 2004) (Tablo 2. 1).

Tablo 2. 1: Bazı anyon ve katyonların kabarcık birleşimine etkisi (Craig, 2004).

Anyon	Katyon	H ⁺	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Cs ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	(CH ₃) ₄ N ⁺	(CH ₃) ₄ NH ⁺	(CH ₃) ₄ NH ₂ ⁺	(CH ₃) ₄ NH ₃ ⁺
	Türü	β	α	α	α	α	α	α	α	β	β	β	β
OH ⁻	α	×		✓	✓								
Cl ⁻	α	×	✓	✓	✓		✓	✓		×	×	×	×
Br ⁻	α	×		✓	✓	✓							
NO ₃ ⁻	α	×	✓	✓	✓			✓					
ClO ₃ ⁻	β			×									
ClO ₄ ⁻	β	✓		×			×		×				
CH ₃ COO ⁻	β	✓		×	×	×	×	×	×				
SO ₄ ²⁻	α	×		✓			✓			✓			
(COO) ₂ ²⁻	α	×			✓								
<i>Birleşme Kuralları:</i>													
<i>aa veya $\beta\beta$ iyonları kabarcık birleşmesini engeller (✓).</i>													
<i>aβ veya $\beta\alpha$ iyonları kabarcık birleşmesini engellemez (×).</i>													

2.9. KABARCİK-TANE YAPIŞMASI

Flotasyon yönteminde, değerli ve gang mineralleri arasındaki ayrım, hidrofobik tanelerin hava kabarcıklarına tutunmasının bir sonucu olarak gerçekleşir (October vd., 2019). Kabarcık-tane yapışma işlemi, hava-su ve katı-su arayüzlerindeki sıvı filmin kritik kalınlığa kadar incilmesiyle başlar. Ardından sıvı filminin kararsız hale gelmesiyle yırtılması, üç fazlı temas hattının kurulmasına ve sonuç olarak kabarcık-tane yapışmasına yol açar (October vd., 2019).

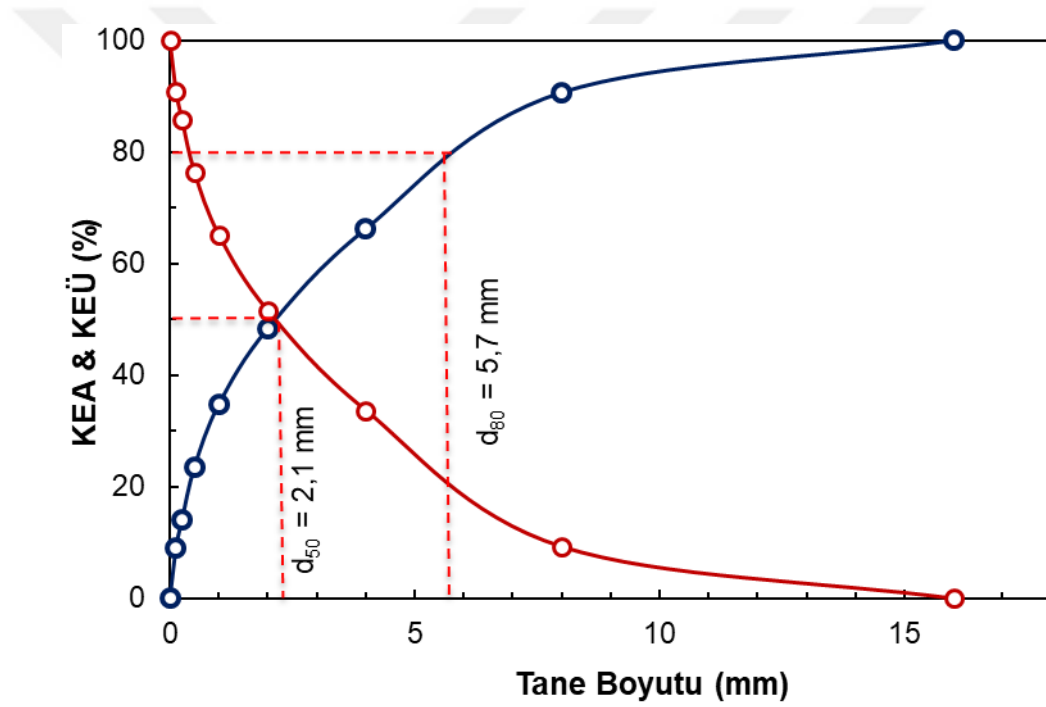
Kabarcık-tane yapışma süresi, kabarcık ve tanenin yapışması için gereken süredir. Bu süre tane ve kabarcığın yüzey kimyası özellikleri tarafından kontrol edilir ve ortamdaki iyonlardan şiddetle etkilenir (Özdemir vd., 2009b). Örneğin ortamda Ca⁺² iyonunun bulunması bitümün hava kabarcığına yapışması için gereken süreyi arttırmaktadır (Gu vd., 2003).

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. MALZEME

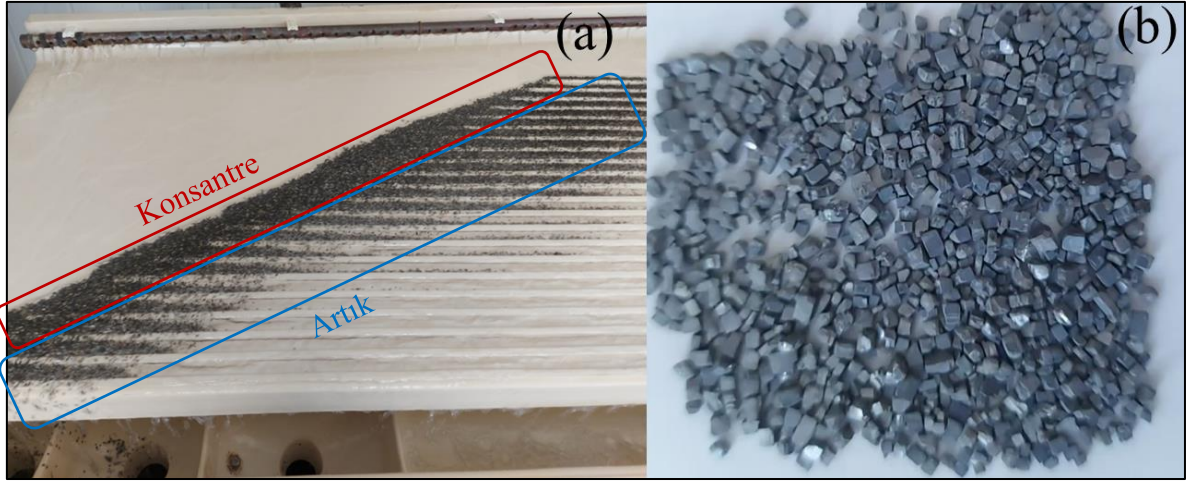
Deneysel çalışmalarda kullanılan numuneler Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A. Ş.- Balya Kurşun-Çinko İşletmesi konik kırıcı çıkışından (-8 mm) temin edilmiştir.

Numunenin tane boyut dağılımı sırasıyla 8 mm,'den başlayarak 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm ve 0,125 mm açıklıklı elekler kullanılarak kuru eleme ile belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 3.1'de verilmiştir. Numunenin Şekil 3.1'deki tane boyut dağılımı incelenerek d_{50} değeri 2,1 mm, d_{80} değeri ise 5,7 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3. 1: Numunenin tane boyutu dağılımı

Çalışma kapsamında yüzey kimyası deneylerinde kullanılacak yüksek saflıkta galen numunesi elde etmek amacıyla -2+1 mm tane boyutunda cevher numunesi sarsıntılı masa (Wilfley, Birleşik Krallık) ile ön zenginleştirmeye tabi tutulmuştur. (Şekil 3. 2). Ön zenginleştirme işlemi sonucu elde edilen galen konsantresi oksitlenmeyi engellemek amacıyla 50°C'de etüvde kurutulmuş ve triyaj işlemi ile galen taneleri ayrılmıştır. Elde edilen numuneler hava almayacak şekilde paketlenerek, buzdolabında (~5°C) saklanmıştır. Sarsıntılı masa zenginleştirmesi ve triyaj ile zenginleştirme sonrası elde edilen yüksek saflıktaki galen taneleri Şekil 3. 2'de gösterilmiştir.



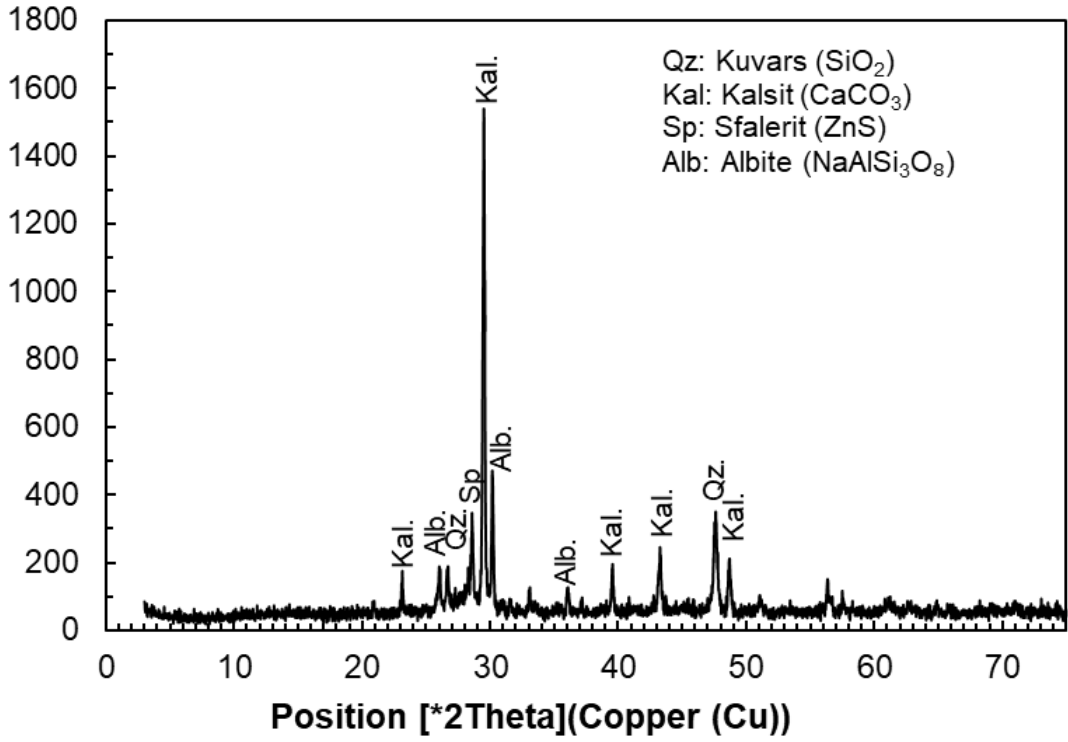
Şekil 3. 2: (a) Sarsıntılı masa zenginleştirme (b) triyaj ile zenginleştirme sonrası elde edilen yüksek saflıktaki galen taneleri.

Tüvenan cevher ve triyaj konsantresinin kimyasal ve mineralojik analizleri sırasıyla X ışını floresans (XRF) ve X ışını kırınımı (XRD) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kimyasal analiz sonuçları Tablo 3. 1’de mineralojik analiz sonuçları ise Şekil 3. 3 ve Şekil 3. 4’te verilmiştir. Tablo 3. 1 görüldüğü üzere tüvenan cevher %4,32 Pb içerirken, sarsıntılı masa ve ardından gerçekleştirilen triyaj işlemi sonucunda elde edilen ön konsantrenin Pb tenörü %69,10’dur.

Tablo 3. 1: Cevherin kimyasal analizi

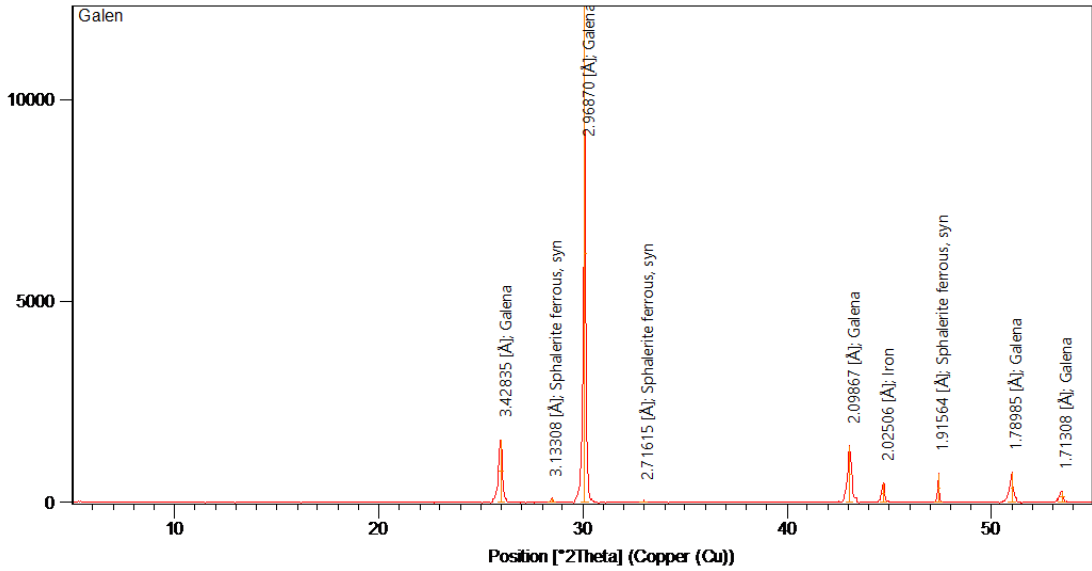
	Pb (%)	Zn (%)	Fe (%)	Si (%)	Al (%)	Ca (%)	Mg (%)	Cu (%)	K (%)	S (%)
Cevher	4,32	7,01	5,65	4,22	1,20	31,43	0,70	0,34	0,69	9,87
Triyaj Konsantresi	69,10	1,57	0,43	0,49	0,15	1,26	0,11	<0,01	<0,01	10,76

Şekil 3. 3’te Tüvenan cevherin kuvars (SiO_2), kalsit (CaCO_3), sfalerit (ZnS), ve albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) içerdiği belirlenmiştir.



Şekil 3. 3: Tüvenan cevher XRD grafiği.

Triyaj konsantresinin Şekil 3.4'teki analiz sonucunda triyaj konsantresinin galen ve az miktarda sfalerit görülmektedir.



Şekil 3. 4: Triyaj konsantresinin XRD grafiği.

Deneyisel çalışmalar için gerekli $-125+106 \mu\text{m}$, $-106+75 \mu\text{m}$ ve $-75+38 \mu\text{m}$ tane boyutlarındaki numuneler elle kırma işleminin ardından, merdaneli kırıcıdan geçirilerek -2 mm 'nin altına indirildikten sonra, çelik çubuklu değirmende (Ünal, Türkiye) Retsch

(Almanya) elek serisi ile kontrollü olarak öğütülerek hazırlanmıştır. Öğütülen temsili numuneler ve şahit numuneler oksidasyonun engellenmesi amacıyla tane boyut ve miktarlarına uygun olarak hava geçirmez poşetlere konularak içlerine azot gazı basılmış hava geçirmez kaplarda, derin dondurucuda, -30°C 'de saklanmıştır (October vd., 2020).

Deneylerde kullanılan cam eşyalar her kullanım öncesinde analitik etanol ($>99\%$) tüm deneysel çalışmalarda kullanılacak olan saf su ($\text{TDS}=0\text{-}3\text{ ppm}$) ile yıkanmış ardından etüvde (105°C) kurutulmuştur (Güven vd., 2020).

Çalışma kapsamında Yapay Tesis Suları (YTS) endüstriyel kullanma sularında sıklıkla bulunan Na^+ , Ca^{+2} ve Mg^{+2} katyonlarını ve kullanılacak cevherin mineralojik bileşimine de uygun olacak şekilde, galen başta olmak üzere sülfürlü minerallerin flotasyonunda sıklıkla bulunan Pb^{+2} , Zn^{+2} , Cu^{+2} ve Fe^{+3} katyonlarını içerecek şekilde hazırlanmıştır. YTS'lerin hazırlanmasında anyon çeşitliliği sağlamak amacıyla bu katyonların analitik kalitedeki farklı tuzları (NaCl , CaCO_3 , MgSO_4 , PbNO_3 , ZnCl_2 , CuCl_2 ve $\text{Fe(NO}_3)_3$) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan minimum iyon konsantrasyonuna sahip Yapay Tesis Suyu, "YTS1" olarak ifade edilmiştir. YTS1'de Na^+ , Ca^{+2} ve Mg^{+2} katyonlarının konsantrasyonları literatürden faydalananarak belirlenmiş (October vd., 2021); Pb^{+2} , Zn^{+2} , Cu^{+2} ve Fe^{+3} katyonlarının konsantrasyonları ise 1 ppm olarak kabul edilmiştir. YTS1'deki konsantrasyonlar 3, 5 ve 10 kat artırılarak sırasıyla YTS3, YTS5 ve YTS10 hazırlanmıştır. Hazırlanan YTS'lerin özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2: YTS'lerde kullanılan iyon türleri ve konsantrasyonları (TDS: Toplam Çözünmüş Katı, I: İyonik güç).

YTS Kodu	Na^+ (ppm)	Ca^{+2} (ppm)	Mg^{+2} (ppm)	Pb^{+2} (ppm)	Zn^{+2} (ppm)	Cu^{+2} (ppm)	Fe^{+3} (ppm)	SO_4^{-2} (ppm)	Cl^- (ppm)	CO_3^{-2} (ppm)	NO_3^- (ppm)	TDS (mg/dm^3)	I (mol/dm^3)	pH
YTS1	153	80	70	1	1	1	1	276,9	238,2	120	3,4	945,5	0,0264	6.72
YTS3	459	240	210	3	3	3	3	830,8	714,6	360	10,1	2836,5	0,0792	6.80
YTS5	765	400	350	5	5	5	5	1384,7	1191	600	16,8	4727,5	0,1319	6.80
YTS10	1530	800	700	10	10	10	10	2769,4	2382	1200	33,0	9454,9	0,2639	7.01

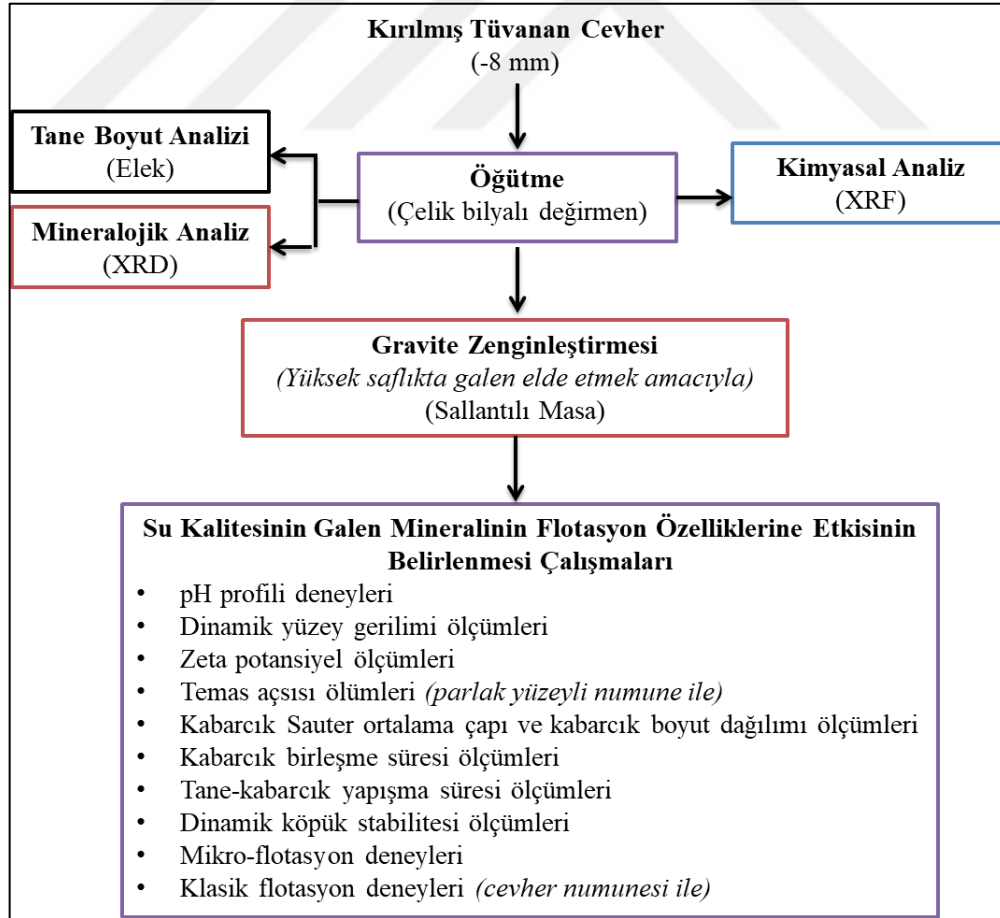
Yüzey kimyası deneylerinde toplayıcı olarak analitik kalite potasyum etil ksantat (KEX), köpürtücü olarak ise analitik butil glikol (BG) kullanılmıştır. Klasik flotasyon deneyleri ise tesisten temin edilen ticari KEX ve butil glikol kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çözeltiler her deneysel çalışmadan önce taze olarak manyetik karıştırıcıda 500 dev/dk karıştırma hızında, 4 dk süre ile oda sıcaklığında ($23\pm 1^{\circ}\text{C}$) dağıtılarak hazırlanmıştır (Batjargal vd., 2021).

Deneysel çalışmalarda kullanılan kimyasallar ve özellikleri Tablo 3. 3'te verilmiştir.

Tablo 3. 3: Deneysel çalışmalarda kullanılan kimyasallar

Kimyasal	Kimyasal Adı	Kimyasal Formül	Safılık (%)	Marka
Köpürtücü	Butil Glikol	C ₄ H ₉ OCH ₂ CH ₂ OH	99,9	Tekkim, Türkiye
Toplayıcı	Potasyum Etil Ksantat	CH ₃ CH ₂ OCS ₂ K	96,0	Sigma-Aldrich, Almanya
Tuzlar	Sodyum Klorür	NaCl	99,5	Tekkim, Türkiye
	Çinko Klorür	ZnCl	98,0	Tekkim, Türkiye
	Kalsiyum Karbonat	CaCO ₃	98,0	Tekkim, Türkiye
	Bakır(II) Klorür	CuCl ₂	98,0	Tekkim, Türkiye
	Magnezyum Sülfat Heptahidrat	MgSO ₄ ·7H ₂ O	98,0	Tekkim, Türkiye
	Kurşun(II) Nitrat	Pb(NO ₃) ₂	98,0	Tekkim, Türkiye
	Demir(III) Nitrat Nonahidrat	Fe(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	99,0	Tekkim, Türkiye

Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmaların akım şeması Şekil 3. 5'de verilmiştir.



Şekil 3. 5: Deneysel çalışmaların akım şeması.

3.2. pH PROFİLİ DENEYLERİ

Pb-Zn cevheri numunesinin pH profili -38 μm tane boyutunda galen numunesinin %1 katı oranındaki süspansiyonları kullanılarak belirlenmiştir. Başlangıç pH'ı 0,1 mol/dm³ HCl ve 0,1 mol/dm³ NaOH çözeltisi kullanılarak ayarlanmıştır. Süspansiyon ~500 dev/dk hızda manyetik karıştırıcı ile karıştırılırken (IKA, Topolino, Almanya) 60 dk süre boyunca pH ölçümü (Thermo Scientific Orion 3 Star, ABD) gerçekleştirilmiştir (Şekil 3. 6).

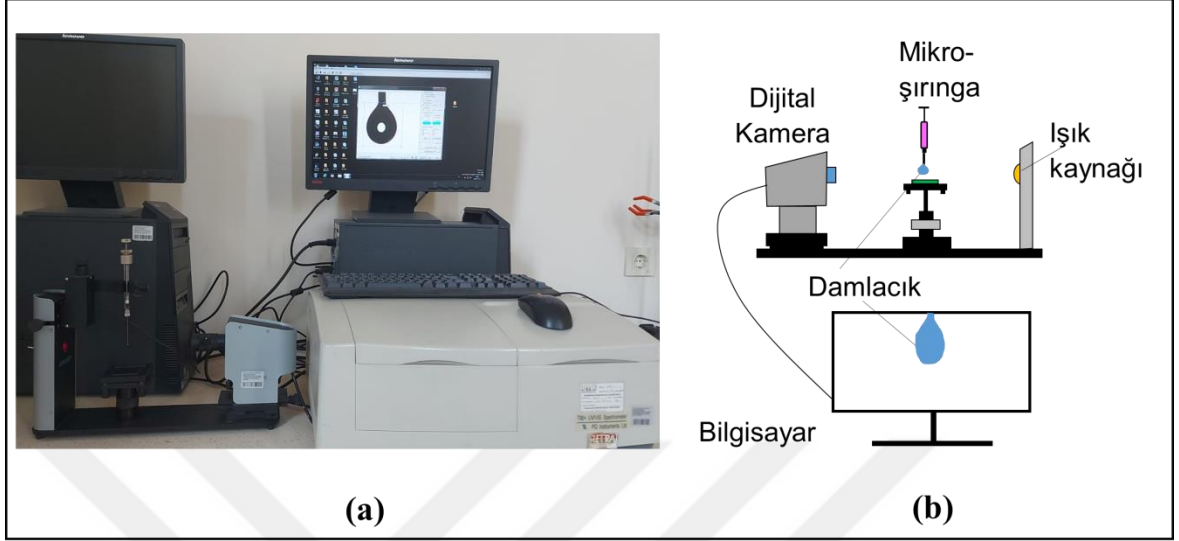


Şekil 3. 6: pH profili deney düzeneği.

3.3. DİNAMİK YÜZEY GERİLİM ÖLÇÜMLERİ

Dinamik yüzey gerilimi ölçümleri Attension Theta Lite (Biolin Scientific, İsveç) yüzey gerilim ölçüm cihazı kullanılarak asılı damla (pendant drop) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3. 7). Bu yöntemde ilgili çözelti içerisinde arkadan aydınlatılmış bir iğnenin ucundaki damlanın şeklinde meydana gelen değişimler belirli bir süre boyunca cihazın dijital kamerası

ile gözlemlenmiş ve cihaz tarafından otomatik olarak belirli sürelerde ölçümler alınarak yüzey gerilimi hesap edilmiştir (Güngören, 2019).



Şekil 3. 7: (a) Yüzey gerilim ölçüm cihazı (b) yüzey gerilim ölçüm düzeneği.

3.4. ZETA POTANSİYEL

Zeta potansiyel ölçümleri elektroforez yöntemi ile çalışan zeta potansiyel ölçüm cihazı (Brookhaven, ZetaPlus, Birleşik Krallık) ile yapılmıştır (Şekil 3. 8). Cihazla ölçüm almak için istenilen numunenin %1 katı oranında süspansiyon hazırlanmış ve ölçüm küveti içerisinde cihaza yerleştirilmiştir. Küvetin içine elektrik alan oluşturacak olan elektrot daldırılmıştır. Elektroforez zeta potansiyel ölçüm yönteminde süspansiyona elektriksel alan uygulandığında katı mineral taneleri yüzey yüklerine göre belli bir yöne, değişik hızlarda hareket etmiştir. Cihaz lazer yardımı ile bu hareketin yönünü ve hızını belirleyerek tanenin zeta potansiyelini Eşitlik 1 uyarınca hesaplamaktadır.

$$\zeta = \frac{4\pi\mu v}{DV} \quad (1)$$

Eşitlikte;

ζ , zeta potansiyeli; μ , sıvının viskozitesini (Pa/sn); v , parçacığın hareket hızını (m/sn); V ise sisteme uygulanan voltajı (V) temsil etmektedir.

Doğal pH'ta (pH 7,88) gerçekleştirilen ölçümlerin ardından süspansiyona 0,1 mol/dm³ HCl ya da 0,1 mol/dm³ NaOH çözeltileri eklenerek ayarlanmıştır. Her ölçümden sonra

kontaminasyonu engellemek adına hücre ve elektrot saf su ve etanol ile yıkanmıştır. Ölçümler, bir seferde 10 ölçüm alınarak iki defa tekrarlanmıştır.

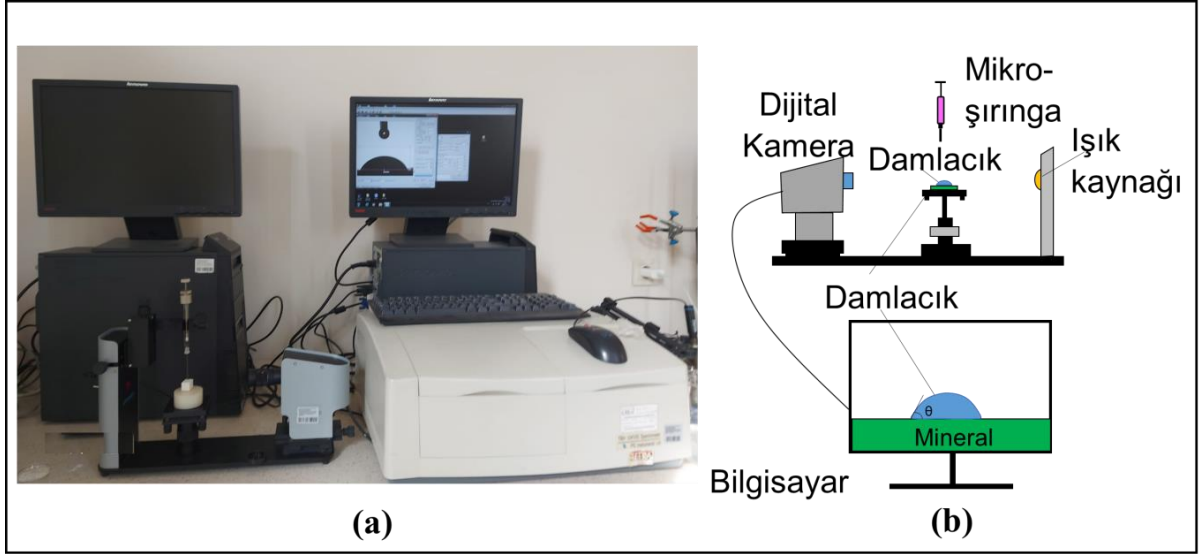


Şekil 3. 8: Brookhaven Zetaplus Zetametre.

3.5. TEMAS AÇISI ÖLÇÜMLERİ

Temas açısı ölçümlerinde kullanılan parlak yüzeyli galen numuneleri elmas testereli kesim cihazında (Vommak, Türkiye) farklı kalınlıklarda kesilmiştir. Kesilen parçalardan, homojenliği ve sertliği uygun görülen kısımlar yine testere yardımı ile heterojen kısımlardan temizlenmiştir. Kesme işleminin ardından, uygun yüzeyler Struers (DAP-3) marka parlatma cihazı ile parlatılmıştır. Parlatma esnasında, cihazın döner tablası ıslatılmış ve silisyum karbür bileşime sahip aşındırma tozları ıslak tabla üzerine dökülerek parlatılacak parçalar yüzeye paralel şekilde bastırılmıştır. 600, 800 ve 1000 meş boyutlu tozlar sırasıyla kullanılarak parlatma işlemi tamamlanmıştır.

Parlatma işleminden sonra numuneler oksitlenmemeleri için hava almayan kaplar içerisinde ve buzdolabında ($\sim 5^{\circ}\text{C}$) saklanmıştır. Temas açısı ölçümleri optik temas açısı ölçüm cihazı (Biolin Scientific, Attension Theta Lite, İsveç) ile durağan damla yöntemi ile oda sıcaklığında ($23 \pm 1^{\circ}\text{C}$) gerçekleştirilmiştir.

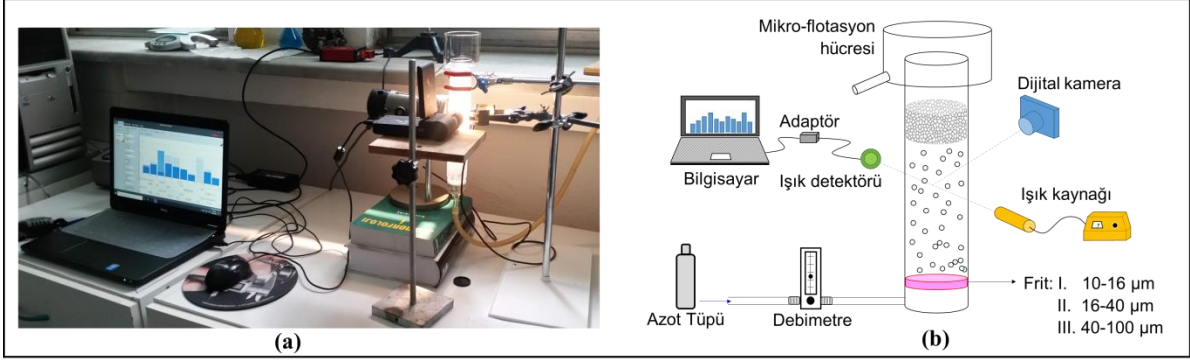


Şekil 3. 9: (a) Temas ölçüm cihazı ve (b) deney düzeneği.

3.6. KABARCİK SAUTER ORTALAMA ÇAPI VE KABARCİK BOYUT DAĞILIMI ÖLÇÜMLERİ

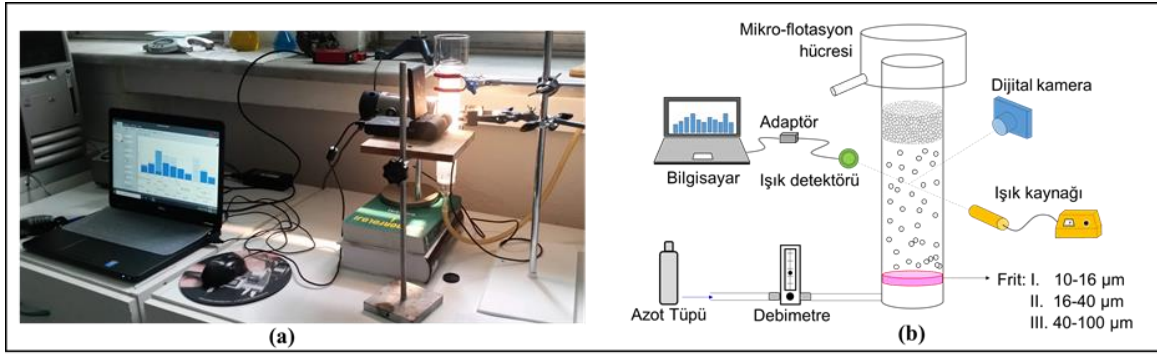
Tez kapsamında iyon konsantrasyonunun kabarcık birleşmesine ve flotasyon sisteminde üretilen farklı boyutlardaki kabarcık boyutu üzerindeki etkisi 3 ayrı frit gözenek açıklığına (10-16, 16-40 ve 40-100 μm), 30 mm çapa, 220 mm uzunluğa ve 155 cm^3 hacme sahip 3 ayrı mikro-flotasyon hücresi kullanılarak (Şekil 3. 10) üç farklı hava akış hızı (30 cm^3/dk , 50 cm^3/dk ve 70 cm^3/dk) araştırılmıştır (Batjargal vd., 2021).

Bu deney sisteminde mikro-flotasyon hücresi uygun yüksekliğe kadar kullanılan kimyasalın sulu çözeltisi ile doldurulmuş ve deneyler sırasında kabarcıkların temsili görüntüleri (fotoğraf ve video) uygun lense sahip dijital bir kamera (Bushman CMOS 8 Led Microscope, Bushman Equipment Inc., Menomonee Falls, WI, ABD) kullanılarak 50 kat büyütme oranında çekilmiştir. Kullanılan her konsantrasyonda aynı konumdan çekilen en az 200 kabarcık görüntüsü incelenmiştir. Kabarcık çapları ImageJ açık kaynaklı görüntü işleme yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Ölçülen çap uzunluklarından yararlanılarak kabarcığın hacim (V_b) ve alanı (A_b) yazılım tarafından otomatik olarak bulunmuştur. Ardından bu değerler ile $d_{32}=6V_b/A_b$ eşitliği kullanılarak kabarcığın Sauter ortalama çapı hesaplanmıştır (Cho ve Laskowski, 2002b). Akabinde ilgili koşullar altında sistemde oluşan kabarcıkların hacmi silindirik hücrede bulunan çözelti hacmi ($V_c=\pi \cdot r^2 \cdot h$) ile oranlanmış ($V_T=V_c/V_b$), böylelikle kabarcık boyut dağılımı ortaya konulmuştur.



Şekil 3. 10: (a) Kabarcık boyut ölçümü cihazı ve (b) deney düzeneği.

Kritik birleşme konsantrasyonu (CCC), flotasyon sırasında hava kabarcıklarının birleşmesini etkili bir şekilde önleyen minimum köpürtücü konsantrasyonudur. Bir köpürtücünün CCC değerinin bilinmesi ile flotasyon sürecini optimize edecek köpürtücü konsantrasyonu seçilebilir (Szyszka, 2018). Bu tez çalışmasında köpürtücü olarak BG kullanılmıştır. Deneylerde bir mikro-flotasyon hücresinin içi BG köpürtücü çözeltisi ile doldurulmuş ve hücre içerisinden bir soğuk ışık kaynağı kullanılarak bir ışık demeti gönderilmiştir. Bu sistemde kolondan geçen ışığın bir kısmı çözelti tarafından absorbe edilirken, köpürtücü varlığında kabarcıkların birleşmesine bağlı olarak kolondan geçen kısmın ışık şiddeti (mW) adaptör ile ölçülmüştür. Böylece belirli bir BG konsantrasyonundaki CCC belirlenmiştir. Deneyin düzeneği Şekil 3. 11’de gösterilmiştir.

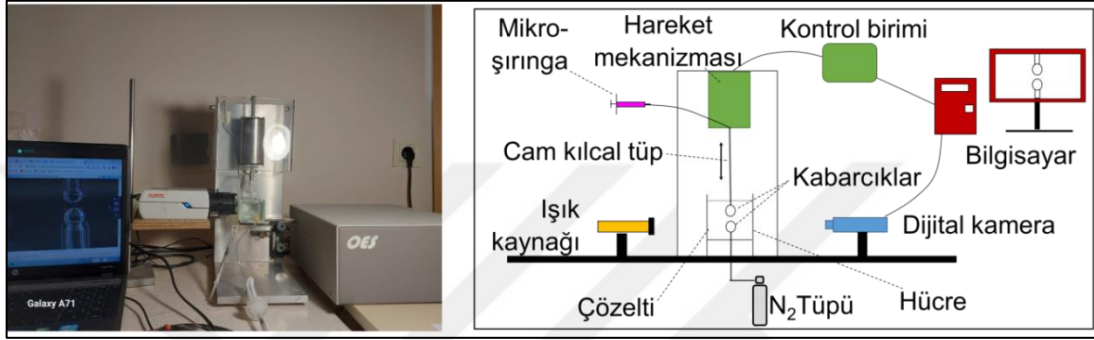


Şekil 3. 11: (a) CCC’nin belirlenmesinde kullanılan ölçüm cihazı ve (b) deney düzeneği.

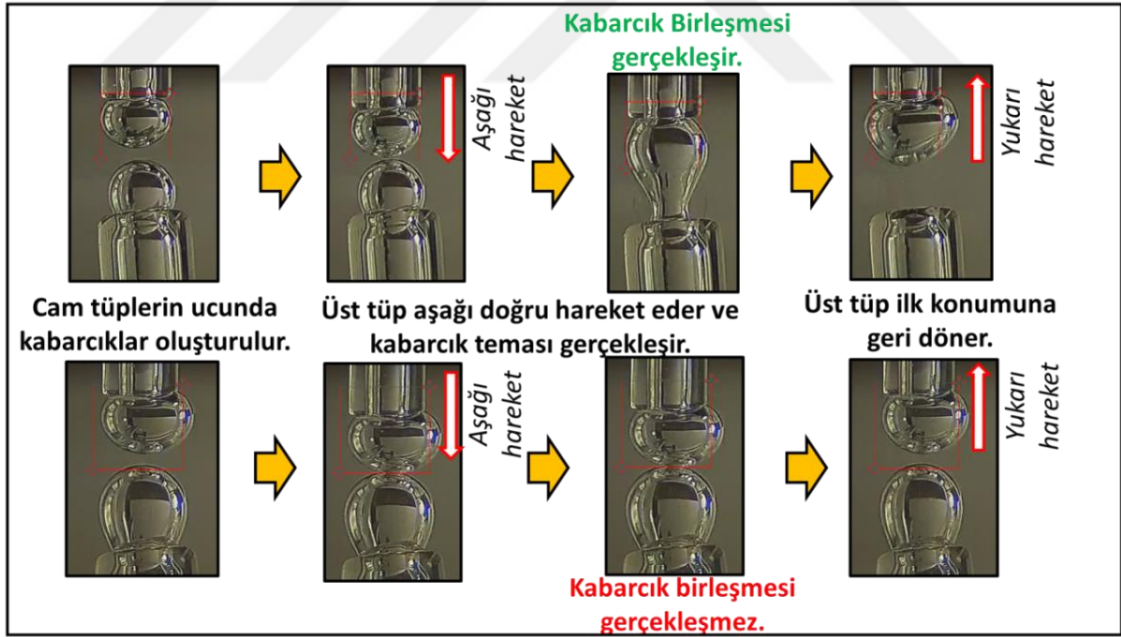
3.7. KABARCİK BİRLEŞME SÜRESİ ÖLÇÜMLERİ

Kabarcık birleşme süresi ölçümleri modifiye edilmiş bir kabarcık-tane yapışma süresi ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Güngören vd., 2018a) (Şekil 3. 10). Deneyisel çalışmalarda kılcal cam boru içeren bir cam kap, cihazın kılcal cam borusu altına yerleştirilmiş ve istenen

çözelti ile doldurulmuştur. Mikro-şırınga vasıtasıyla cam boruların ucunda birbirine yakın boyutlarda (~ 2 mm) iki kabarcık oluşturulmuştur. Bilgisayar yazılımı ile temas süresi milisaniye seviyesinde ayarlanmıştır. Cihaz çalıştırıldığında üstteki kılcal boru aşağı doğru hareket ettirilmiş ve iki kabarcık belirlenen süre boyunca temas halinde kalmışlardır. Ardından üstteki kılcal boru ilk konumuna geri dönmüştür (Şekil 3. 12, Şekil 3. 13). Farklı konsantrasyon ve temas sürelerinde yapılan ölçümlerin ardından %50 kabarcık birleşmesinin gerçekleştiği süre kabarcık birleşme süresi olarak hesap edilmiştir.



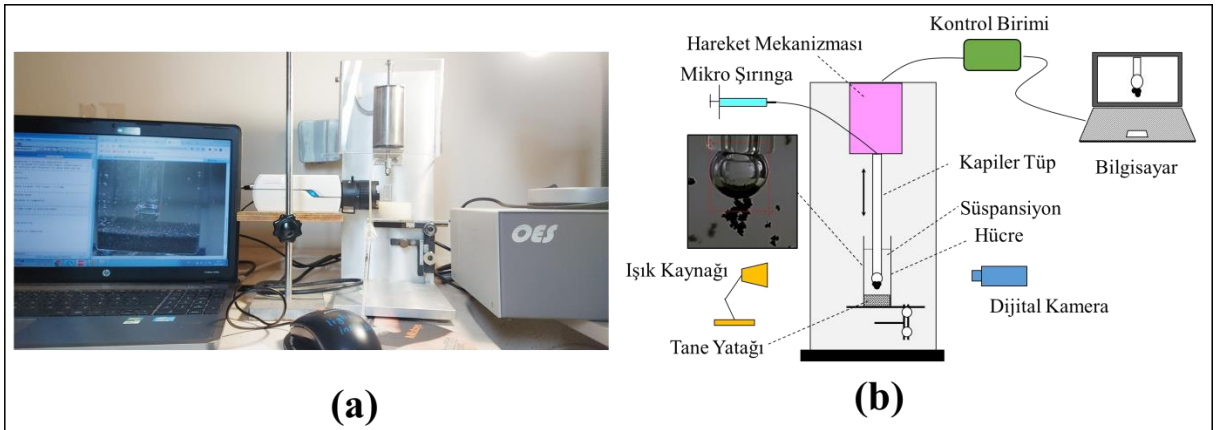
Şekil 3. 12: (a) Kabarcık birleşme süresi ölçüm cihazı ve (b) deney düzeneği.



Şekil 3. 13: Kabarcık birleşme süresi ölçümlerinde meydana gelen işlemlerin sıralaması.

3.8. KABARCIK-TANE YAPIŞMA SÜRESİ ÖLÇÜMLERİ

Bu tez çalışmasında iyon/köpürtücü varlığında kabarcık-tane yapışma süresi ölçümleri KEX ile kondisyonlanmış galen numuneleri kullanılarak kabarcık-tane yapışma süresi ölçüm cihazı (Bratton Engineering and Technical Associates LLC, BCT-100, ABD) ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3. 14). Deneylerde hidrofobik hale getirilmiş mineral tanelerini barındıran yaklaşık 5 cm³ süspansiyon ölçüm hücresine aktararak hücrenin alt kısmında bir tane yatağı oluşması sağlanmış. Ölçüm cihazının kapiler tüpü ölçüm hücresinin içerisine konumlandırıldıktan sonra bir mikro-şırınga vasıtasıyla kapilerin uç kısmında bir hava kabarcığı (~2 mm) oluşturulmuş. Oluşturulan kabarcık ile tane yatağı arasındaki mesafe cihazın hareketli standı sayesinde uygun şekilde ayarlanmış. Cihazın bağlı olduğu bir bilgisayar ve yazılım kullanılarak temas süresi milisaniye düzeyinde belirlenmiş. Cihaz çalıştırıldığında kabarcık aşağı doğru hareket ederek tane yatağıyla belirlenen süre boyunca temas halinde kalmıştır. Temas süresi sonunda ilk konumuna dönen kabarcığın üzerinde tane yapışmasının gerçekleşip gerçekleşmediği bir monitöre bağlı dijital kamera ile gözlemlenmiştir. Tane yatağının değişik noktalarında gerçekleştirilen en az 20 ölçüm yüzde olasılığa dönüştürülür ve %50 yapışmanın gerçekleştiği süre, kabarcık-tane yapışma süresi olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada tane boyutunun kabarcık-tane yapışma süresi ölçümleri üzerindeki etkisi üç ayrı boyutta galen numunesi (-125+106 µm, -106+75 µm ve -75+38 µm) kullanılarak araştırılmıştır.



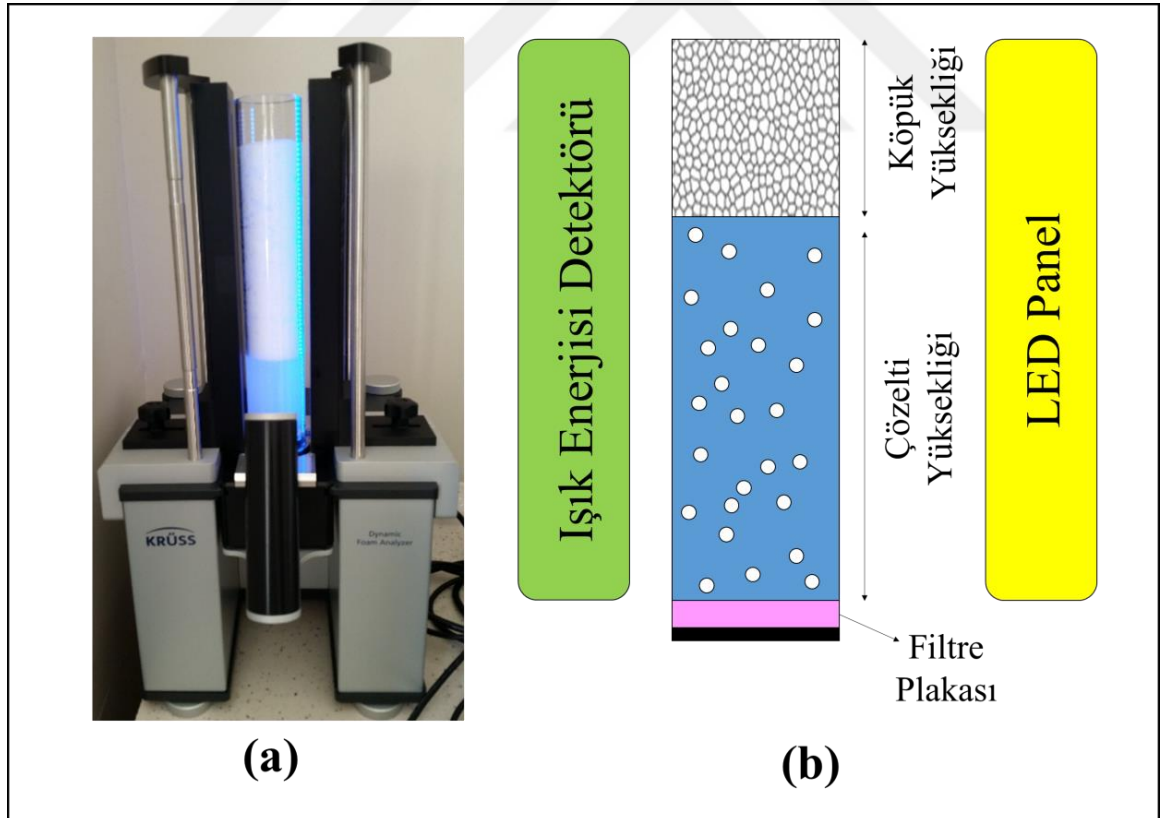
Şekil 3. 14: (a) Kabarcık-tane yapışma süresi ölçüm cihazı ve (b) deney düzeneği.

3.9. DİNAMİK KÖPÜK STABİLİTESİ ÖLÇÜMLERİ

Proje kapsamında çözünmüş iyonların köpürtücü yokluğunda ve varlığında köpük oluşturma kabiliyetleri ve köpük stabilitesine etkisini incelemek üzere hazırlanan YTS'ler (100 cm³)

dinamik köpük analiz cihazının (Krüss, DFA-100, Almanya) iç çapı 40 mm, yüksekliği 250 mm olan silindirik cam hücre sine aktarılmıştır. Kullanılan cihazda köpük oluşumu basınçlı havanın hücrenin altında bulunan ve havanın dağılmasını sağlayan bir filtre plakasından sisteme verilmesi ile sağlanır. Tez çalışması kapsamında köpük stabilitesi deneyleri iki fazlı (hava ve su) ve üç fazlı (hava, su ve galen minerali) sistemlerde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde farklı hava akış hızlarının ($20 \text{ cm}^3/\text{dk}$, $250 \text{ cm}^3/\text{dk}$ ve $300 \text{ cm}^3/\text{dk}$) ve mineral tane boyutlarının ($-125+106 \text{ } \mu\text{m}$, $-106+75 \text{ } \mu\text{m}$, $-75+38 \text{ } \mu\text{m}$) köpük stabilitesine etkisi de araştırılmıştır.

Cihazda çözelti ve köpük yüksekliği ve dolayısıyla hacimleri ölçüm hücresinin iki yanına karşılıklı olarak konumlandırılmış bir LED panel ve bir ışık detektörü vasıtası ile (Şekil 3. 15) zamana bağlı ışık geçirimi ölçülerek Krüss Advance Köpük Analiz Yazılımı tarafından belirlenmektedir. Deneylerde köpürtme süresinin sona ermesiyle birlikte hava akışı cihaz tarafından otomatik olarak durdurulmakta ve köpük bozunmaya başlamaktadır. Cihaz ölçüm almaya köpük bozunma süresi boyunca da devam etmektedir.

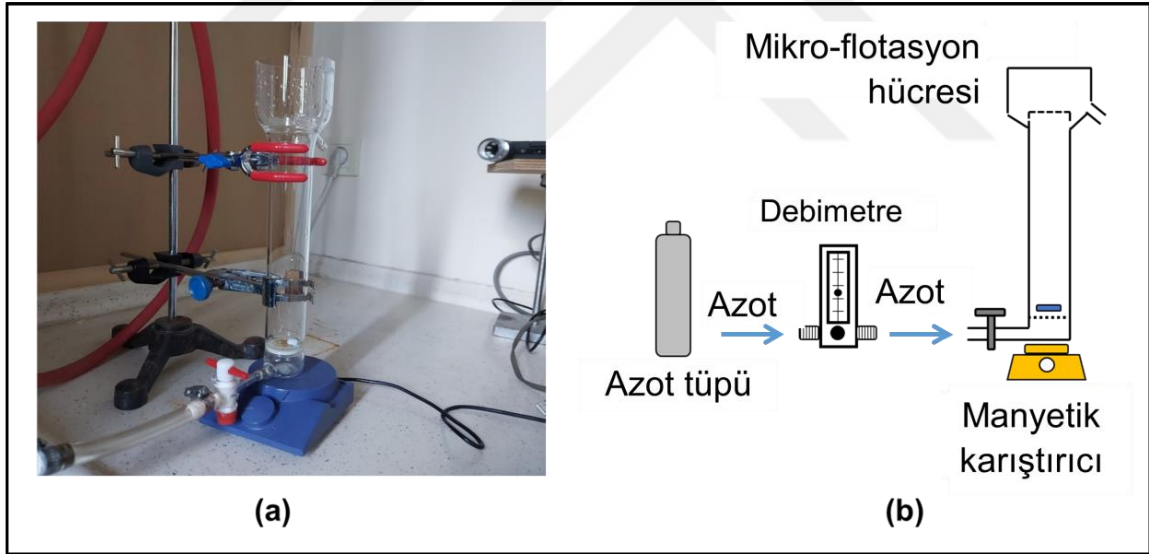


Şekil 3. 15: (a) Krüss DFA-100 dinamik köpük analiz cihazı ve (b) dinamik köpük stabilitesi ölçüm prensibi (Oetjen vd., 2014'ten uyarlanmıştır).

3.10. MİKRO-FLOTASYON DENEYLERİ

Mikro-flotasyon deneyleri üç farklı tane boyutunda galen numunesi ($-125+106 \mu\text{m}$, $-106+75 \mu\text{m}$, $-75+38 \mu\text{m}$) ile gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça %1'lik galen süspansiyonu bir beher içerisinde manyetik karıştırma (IKA, Topolino, Almanya) ile ($\sim 500 \text{ dev/dk}$) 1 dk süre boyunca disperse edilmiştir. Ardından deney için gerekli konsantrasyonda KEX (12,5, 25, 50, 75 ve 100 gr/ton) ile 3 dk kondisyonlanan numuneye CCC konsantrasyonunda BG (16 ppm) eklenerek 2 dk daha kondisyonlanmıştır. Kondisyon işleminin tamamlanmasının ardından 10-16 μm frit açıklıklı mikro-flotasyon hücresine aktarılan süspansiyon 1 dk boyunca N_2 ($0,2 \text{ cm}^3/\text{dk}$) gazı varlığında flote edilmiştir. Yüzen ve batan flotasyon ürünleri vakum filtre (KNF, N 026 1.2 AN.18, Almanya) yardımıyla filtrasyon işlemine tabi tutulmuş, 50°C 'de etüvde kurutulmuştur. Ardından flotasyon ürünleri tartılarak flotasyon verim hesaplamaları yapılmıştır.

Mikro-flotasyon hücresi ve deney düzeneği ise Şekil 3. 16'da görülmektedir.



Şekil 3. 16: Deneylerde kullanılan (a) flotasyon hücresi (b) mikro-flotasyon deney düzeneği.

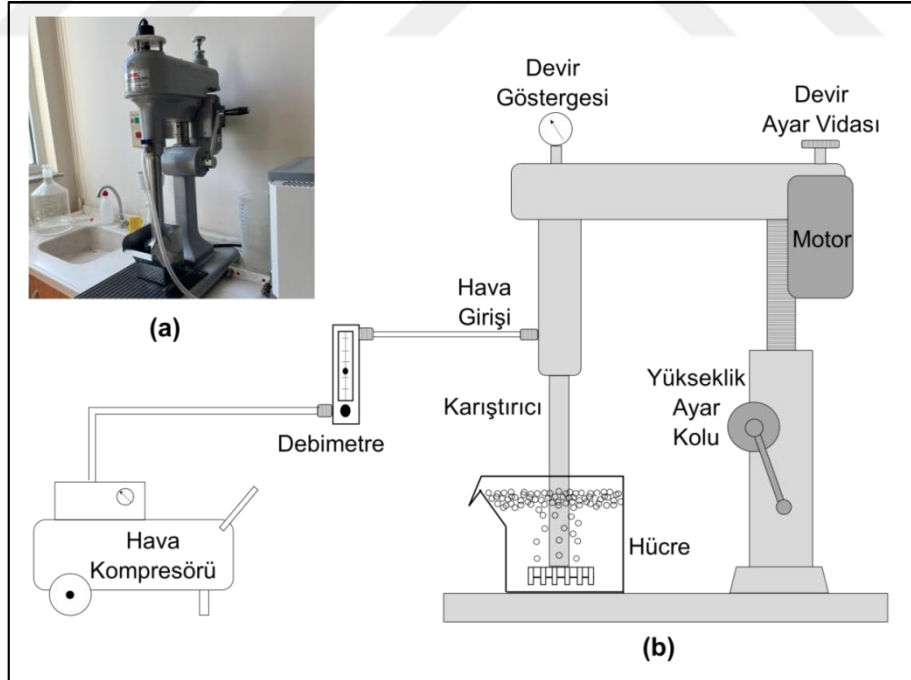
3.11. KLASİK FLOTASYON DENEYLERİ

Klasik flotasyon deneyleri Tablo 3. 4'te verilen koşullar altında Denver D-12 tipi (Ünal, Türkiye) flotasyon cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3. 17). Flotasyon işleminin ardından flotasyon ürünleri etüvde kurutularak (50°C) tartılmış ve her üründen numune alınarak agat havanda 38 μm altına öğütülmüştür. Öğütülen numunelerin kimyasal analizleri numunenin

temin edildiği şirketin laboratuvarlarında X ışını flüoresans (XRF) yöntemi ile yapılarak Pb analiz değerleri verim hesabında kullanılmıştır.

Tablo 3. 4: Klasik flotasyon deney koşulları

Tane Boyutu (μm)	-125, -106, -75	
Kolektör (KEX) (gr/ton)	10, 40, 70, 100, 130	
Köpürtücü (BG) (ppm)	16 ppm	
Hava akış miktarı (L/dk)	5, 10, 15	
Kondisyonlama süresi (dk)	10	
Pülpte katı oranı (%)	15, 25, 35	
Pülp hacmi (L)	1	
Gaz	Hava	
Bastırıcı (gr/ton)	ZnSO ₄	1500
	FeSO ₄	600
pH (0,1 mol/dm ³ HCl	10-11	
ve NaOH çözeltisi ile)		

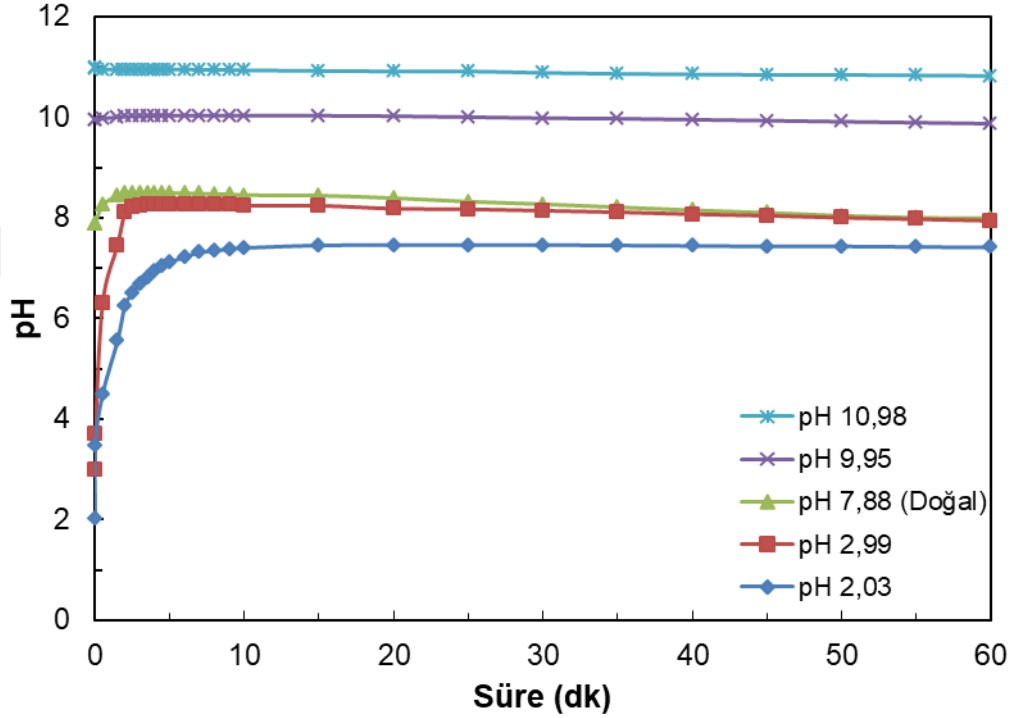


Şekil 3. 17: (a) Klasik flotasyon deney cihazı (b) deney düzeneği.

4. BULGULAR

4.1. PH PROFİLİ

%1 katı oranında hazırlanan tüvenan galen cevheri süspansiyonunun süreye bağlı pH değişiminin incelendiği pH profili deney sonuçları Şekil 4. 1’de verilmiştir.

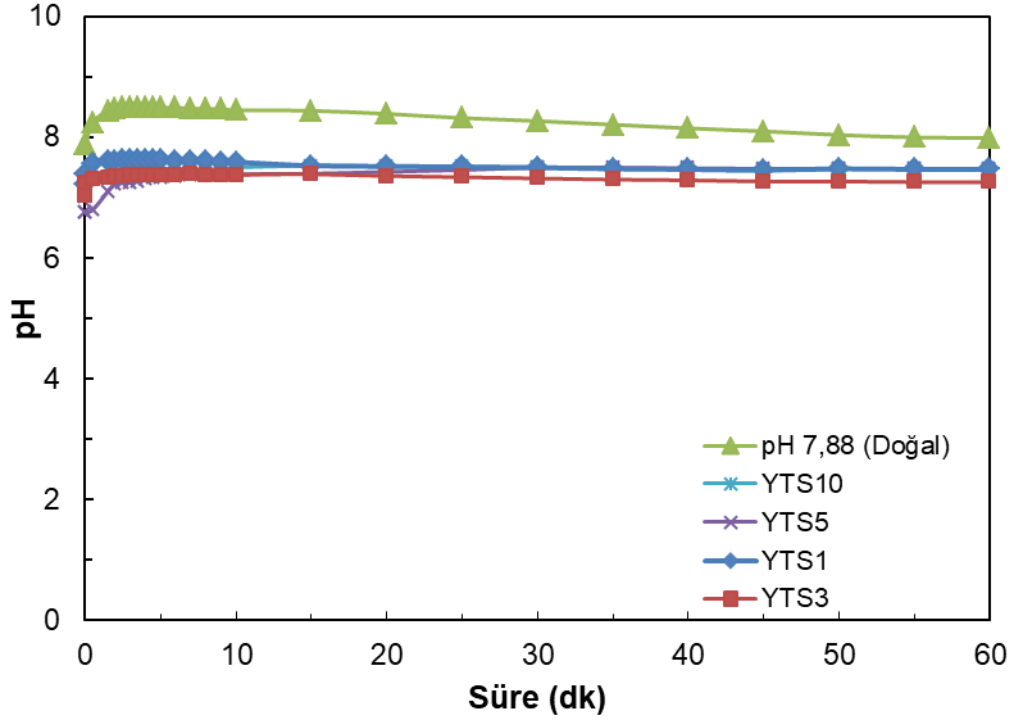


Şekil 4. 1: Tüvenan galen cevheri süspansiyonunun pH profili doğal pH ı değiştir.

pH ölçümlerinde, tüvenan galen cevher süspansiyonunun doğal pH'ının $8,10 \pm 0,2$ olduğu görülmüştür. Asidik ortamda başlanarak yapılan pH ölçümlerinde galen cevheri süspansiyonunun pH değerinin, cevherin yüksek karbonat içeriği (%44 CaO) nedeniyle pH 8 civarında tampon bir pH değerine ulaşma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir.

Bazik ortamda başlanarak yapılan pH ölçümlerinde ise zamana bağlı önemli bir değişim görülmemiştir. Bunun nedeni yine numunenin yüksek karbonat içeriği nedeniyle bazik bir yapıda olması ve kalsit mineralinin düşük çözünürlüğü (25°C 'de $4,8 \times 10^{-9} \text{ mol/dm}^3$) nedeniyle numuneden çözünerek çözeltiliye geçen katyonların kısıtlı miktarda olması ile açıklanabilmektedir (Frear ve Johnston, 1929).

Şekil 4. 2’de YTS varlığında tüvenan galen cevherin pH profili verilmiştir.



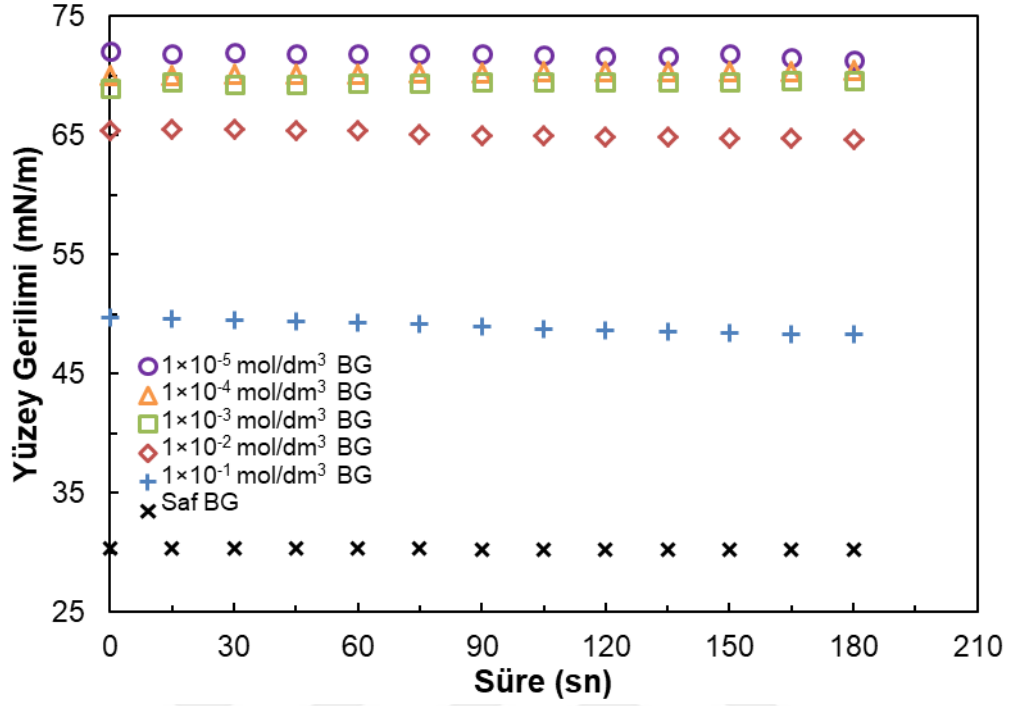
Şekil 4. 2: YTS varlığında tüvenan galen cevheri süspansiyonunun pH profili.

Şekil 4. 2’de görüldüğü gibi YTS varlığında galen süspansiyonunun pH değeri galenin doğal pH’ının (7,88) hafifçe altına düşmektedir. YTS varlığında süspansiyonun pH’ında YTS konsantrasyonuna göre ciddi bir değişim görülmemiştir. Bu durumun nedeninin ise YTS çözeltilerinin hazırlanmasında kullanılan çeşitli asidik ve bazik çözünme ürünleri veren kimyasalların ortama verdikleri toplam hidrojen ve hidroksil iyonları ile birbirlerini büyük ölçüde nötr hale getirmesi sebebiyle olduğu düşünülmektedir.

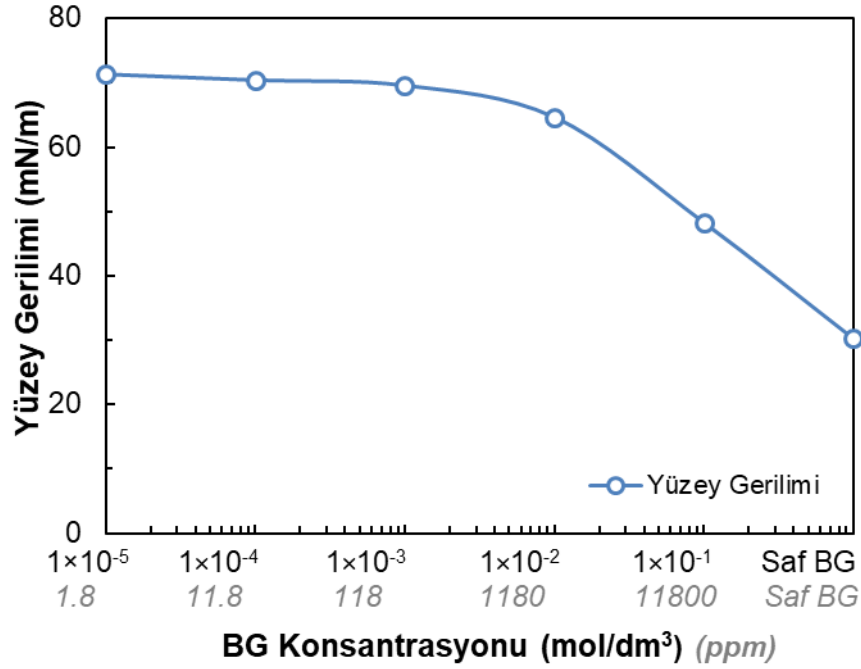
4.2. DİNAMİK YÜZEY GERİLİM ÖLÇÜMLERİ

BG’nin suyun yüzey gerilimine etkisini araştırmak için 1, 5, 10, 16, 20, 30 ve 50 ppm BG konsantrasyonlarında yüzey gerilimi gerçekleştirilmiş ve bu konsantrasyonlarda 15. sn’de sırasıyla 71,9, 71,7, 71,5, 71,35, 71,2 ve 70,7 mN/m yüzey gerilimi değerleri ölçülmüştür. BG’nin düşük konsantrasyonlarda yüzey gerilimine önemli bir etkisi olmadığı görüldüğünden yüzey gerilimi ölçümleri mol/dm³ cinsinden daha yüksek konsantrasyonlarda gerçekleştirilmiştir.

Farklı BG konsantrasyonlarında ilk önce 180 sn süresince dinamik yüzey gerilimleri ölçülmüş (Şekil 4. 3) ve 180. sn’deki yüzey gerilim değerleri kullanılarak da BG’nin denge durumundaki yüzey gerilimi değerleri elde edilmiştir (Şekil 4. 3).



Şekil 4. 3: Farklı konsantrasyonlarındaki BG çözeltilerinin dinamik yüzey gerilimi ölçüm sonuçları.



Şekil 4.4: BG konsantrasyonuna bağlı denge durumundaki yüzey gerilim değerleri (180. sn).

Şekil 4. 3 ve Şekil 4.4'ten görüldüğü üzere BG konsantrasyona bağlı olarak suyun yüzey gerilimini düşürmüştür. Yüzey geriliminde zamana bağlı olarak ise ciddi bir değişim görülmemiştir.

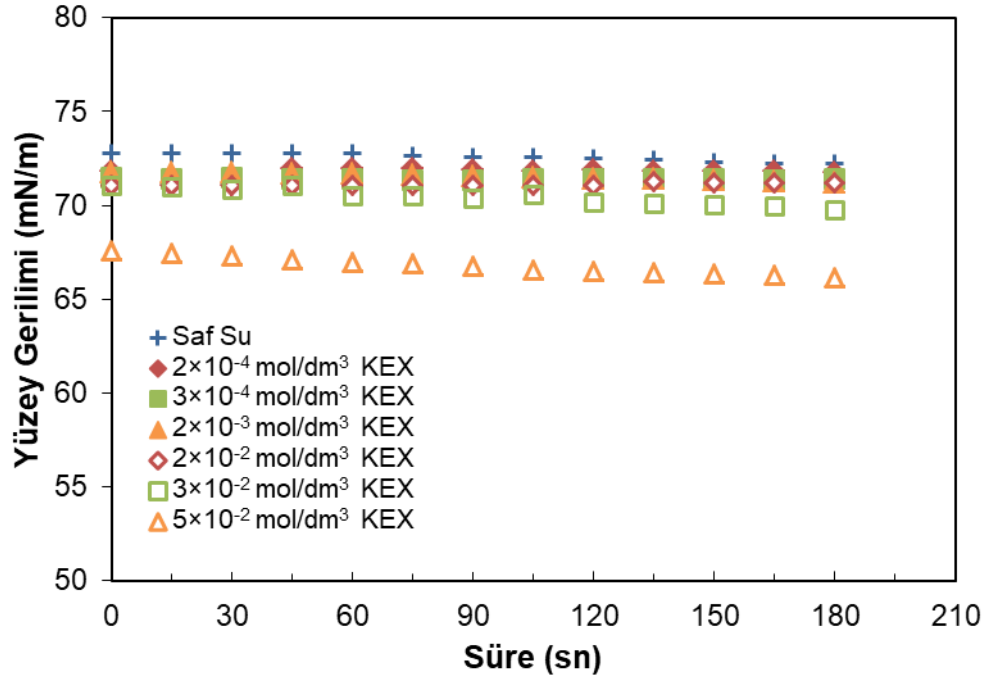
Şekil 4.4'ten görüldüğü üzere de 1×10^{-5} mol/dm³ BG konsantrasyonunda yüzey gerilimi 71,3 mN/m iken, BG konsantrasyonun artmasıyla birlikte 1×10^{-4} , 1×10^{-3} , 1×10^{-2} ve 1×10^{-1} mol/dm³ konsantrasyonlarda sırasıyla 70,5 mN/m, 69,4 mN/m, 64,0 mN/m ve 47,2 mN/m'ye düşmüştür. Saf BG varlığında ise yüzey gerilimi 30,0 mN/m olarak ölçülmüştür. Bu değer Smallwood (1996) ve Velasco-Medina ve Gracia-Fadrique (2020) tarafından yapılan önceki çalışmaların sonuçlarına yakındır (20°C'de 27,4–27,7 mN/m).

KEX konsantrasyonun dinamik yüzey gerilimi ölçüm sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 4. 1'de görüldüğü gibi 100 gr/ton KEX dozajına kadar yapılan ölçümlerde yüzey geriliminde önemli bir değişiklik olmadığı için mol/dm³ cinsinden daha yüksek konsantrasyonlara deney yapılmıştır.

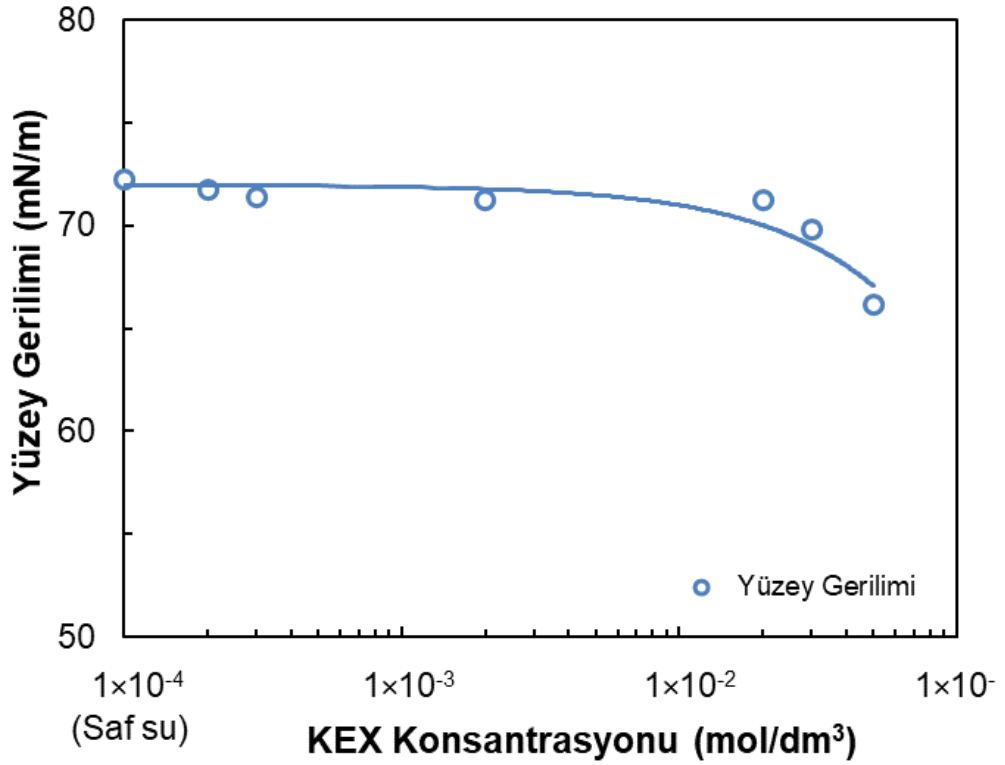
KEX konsantrasyonuna göre dinamik yüzey gerilimi ölçüm sonuçları ve 180 sn'deki denge yüzey gerilimi değerleri sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4. 5 verilmiştir.

Tablo 4. 1: KEX konsantrasyonun dinamik yüzey gerilimi ölçüm sonuçları.

Süre (sn)	Yüzey Gerilimi (mN/m)			
	KEX (12,5 gr/ton)	KEX (25 gr/ton)	KEX (50 gr/ton)	KEX (100 gr/ton)
0	71,18	71,38	71,5	71,91
15	71,26	71,36	71,43	71,92
30	71,3	71,3	71,45	71,89
45	71,35	71,33	71,39	71,88
60	71,3	71,24	71,38	72,32
75	71,32	71,22	71,37	72,33
90	71,31	71,21	71,33	72,49
105	71,28	71,17	71,42	72,46
120	71,28	71,12	71,44	72,46
135	71,28	71,05	71,42	72,49
150	71,25	71,99	71,42	72,6
165	71,22	70,94	71,34	72,68
180	71,21	70,86	71,38	72,68



Şekil 4. 5: Çeşitli KEX konsantrasyonlarında dinamik yüzey gerilimi ölçümü sonuçları.



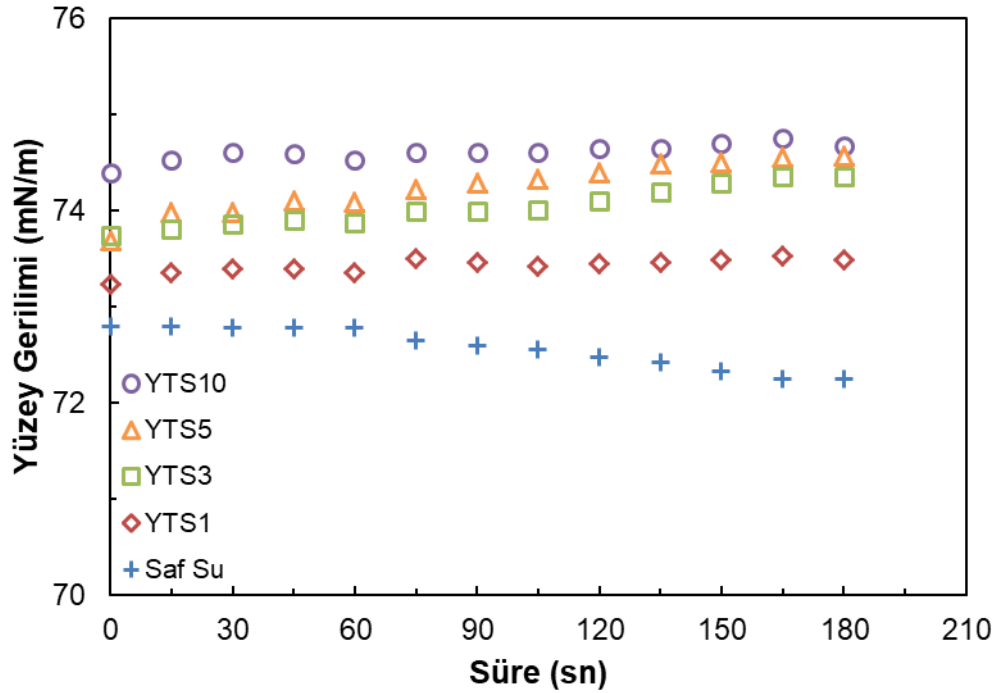
Şekil 4. 6: KEX konsantrasyonuna göre 180 sn'de denge yüzey gerilimi değerleri.

Şekil 4. 5 ve Şekil 4. 6'da görüldüğü gibi düşük KEX konsantrasyonlarında yüzey geriliminde ciddi bir değişim görülmemiştir. Bunun nedenleri arasında bir kollektör olan KEX'in

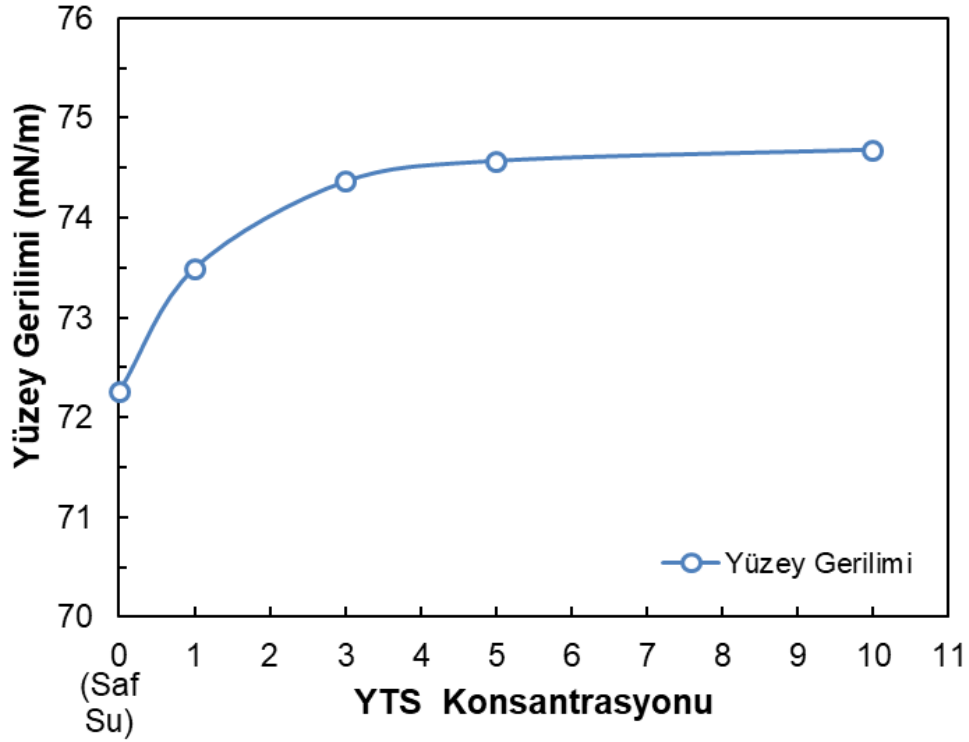
seçiciliğinin hava/su arayüzeyindense mineral/su arayüzeyine olması ve KEX'in hidrokarbon zincir yapısında oldukça az (iki) karbon atomu bulunması ve dolayısıyla KEX'in yüzey gerilimini etkili bir şekilde düşürmek için yeterli zincir uzunluğuna sahip olmaması sayılabilir. Ancak KEX konsantrasyonu çok yüksek değerlere yükseldiğinde KEX molekülleri hava/su arayüzüne adsorbe olarak yüzey gerilimini bir miktar azaltmış ve $5 \times 10^{-2} \text{ mol/dm}^3$ KEX'te 66,1 mN/m yüzey gerilimi elde edilmiştir. Zamana bağlı olarak ise yüzey geriliminde ciddi bir değişim görülmemiştir.

Yüzey geriliminin gerek BG gerekse KEX varlığında zamana bağlı olarak değişmemesinin nedeni bu moleküllerinin hava-su arayüzeyine adsorplanarak su molekülleri arasındaki bağları zayıflatma işleminin oldukça hızlı ($<1 \text{ sn}$) gerçekleşmiş olmasıdır.

Şekil 4. 7'de YTS konsantrasyonların dinamik yüzey gerilimi ölçüm sonuçları, Şekil 4. 8'de ise 180 sn'deki denge yüzey gerilimi değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4. 7: Çeşitli YTS konsantrasyonlarında dinamik yüzey gerilimi ölçümü sonuçları.



Şekil 4. 8: YTS konsantrasyonuna göre 180 sn’de denge yüzey gerilimi değerleri.

Şekil 4. 7’de YTS’lerin yüzey geriliminde zamanla hafif bir artış gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 4. 8’de ise YTS1 varlığında 73,5 mN/m olan yüzey geriliminin konsantrasyondaki artış ile YTS3’e kadar hafifçe artarak 74,4 mN/m’ye eriştiği ve bu noktada platoya ulaştığı görülmektedir.

İyon varlığında yüzey gerilimi iyonun su molekülleri ile ilişkisini etkileyen uzun menzilli elektrostatik etkileşimler, iyonun değeri, yarıçapı ve polarizasyonu gibi çeşitli parametrelerden etkilenir. Bu etkileşimlerin sonucu olarak bazı iyonlar hidrate olur ve yığın su fazında kalır, böylece yüzey gerilimi artar. Bu iyonlara kozmotropik iyonlar denir. Öte yandan kaotropik iyonlar hava/su arayüzüne doğru hareket ederek yüzey gerilimini azaltır. Ara yüzeyde adsorbe edilmiş yüzey aktif maddeler varsa, kaotropik iyonlar bunlara nüfuz eder.

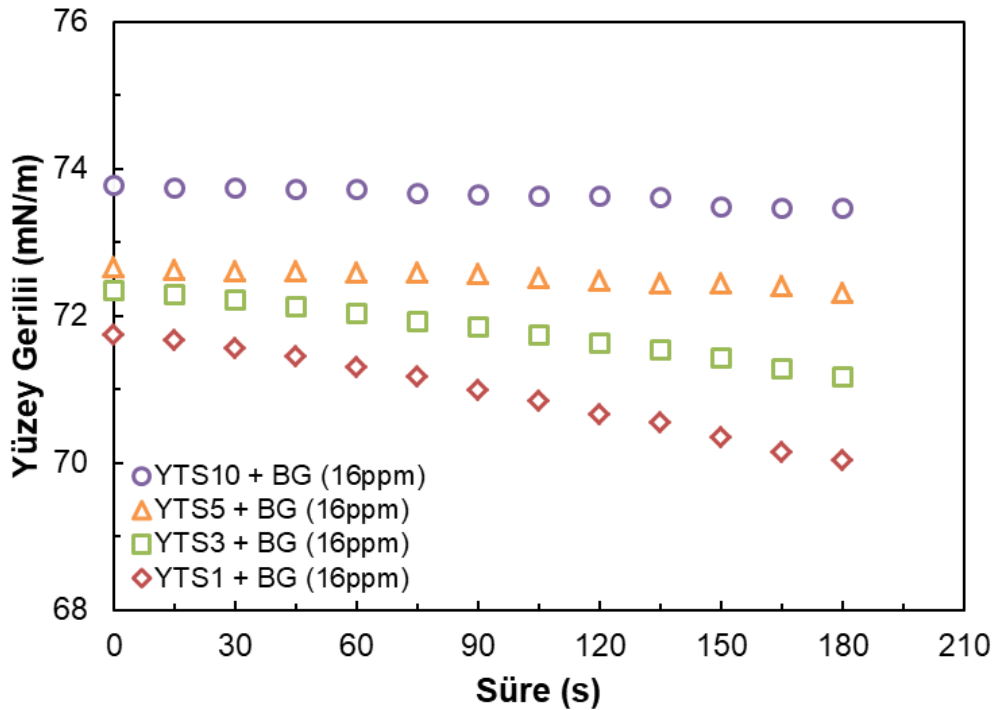
Bir iyonun kaotrofi/kosmotrofi özelliği, su molekülünün o iyonun yakınında ne kadar süreyle kaldığına bağlı olarak belirlenebilir. Bir su molekülü, bir iyonun yakınında, sudaki başka bir su molekülünün etrafında kaldığından ortalama olarak daha uzun süre kalırsa, bu tür iyonlara kosmotropik iyon denir. Aksine, eğer bir su molekülü, bir iyonun etrafında, sudaki başka bir su molekülünün etrafında bulunduğundan daha kısa bir ortalama süre boyunca kalırsa, bu tür

iyonlara kaotropik iyon denir. Daha küçük tek değerlikli iyonlar genellikle yüzeylerinde büyük elektrik yük yoğunluğuna sahiptir ve kosmotroplardır (Miller, ve Lisy, 2008; Hervø-Hansen, vd., 2022).

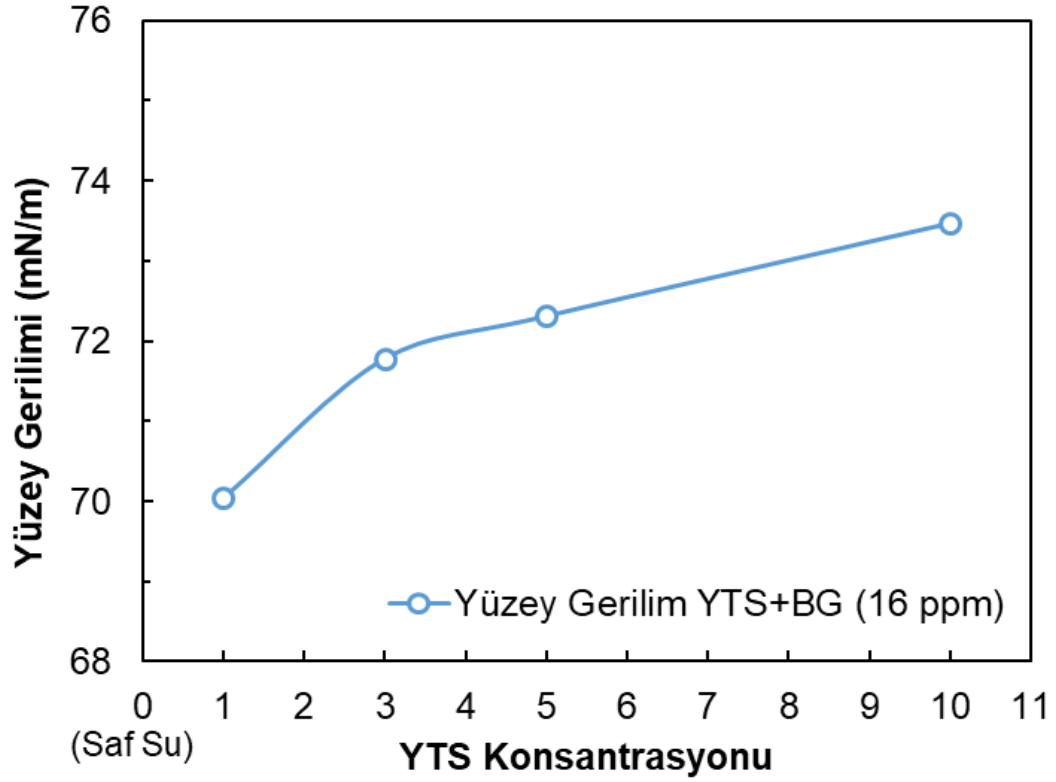
İyonlar Hofmeister (1888) tarafından su molekülleri ile olan bu tür ilişkilerin gücüne göre sıralanmıştır. Literatürden de bilindiği gibi, HCl, HClO₄ ve HNO₃ gibi birkaç elektrolit dışında çözülmüş iyonlar genellikle konsantrasyonlarına bağlı olarak çözeltinin yüzey gerilimini artırırlar (Markus, 2016; Witecki, vd., 2022).

Güngören vd. (2019) yaptığı araştırmada yüzey gerilimi ölçüm sonuçlarının iyonik kuvvet ile ilişkili olduğunu açıklamışlardır. Yüzey geriliminin konsantrasyon ile azalması çözeltinin iyonik kuvveti ile ilişkilidir. Çözülmüş iyonlar varlığında yüzey geriliminin konsantrasyona bağlı olarak arttığı daha önce Özdemir (2009) tarafından da gösterilmiştir.

YTS ve BG varlığında dinamik yüzey gerilimi ölçümlerinin sonuçları Şekil 4. 9'da, 180 sn sonunda elde edilen denge yüzey gerilimi değerleri ise Şekil 4. 10'da verilmiştir.



Şekil 4. 9: YTS ve BG varlığında dinamik yüzey gerilimi sonuçları



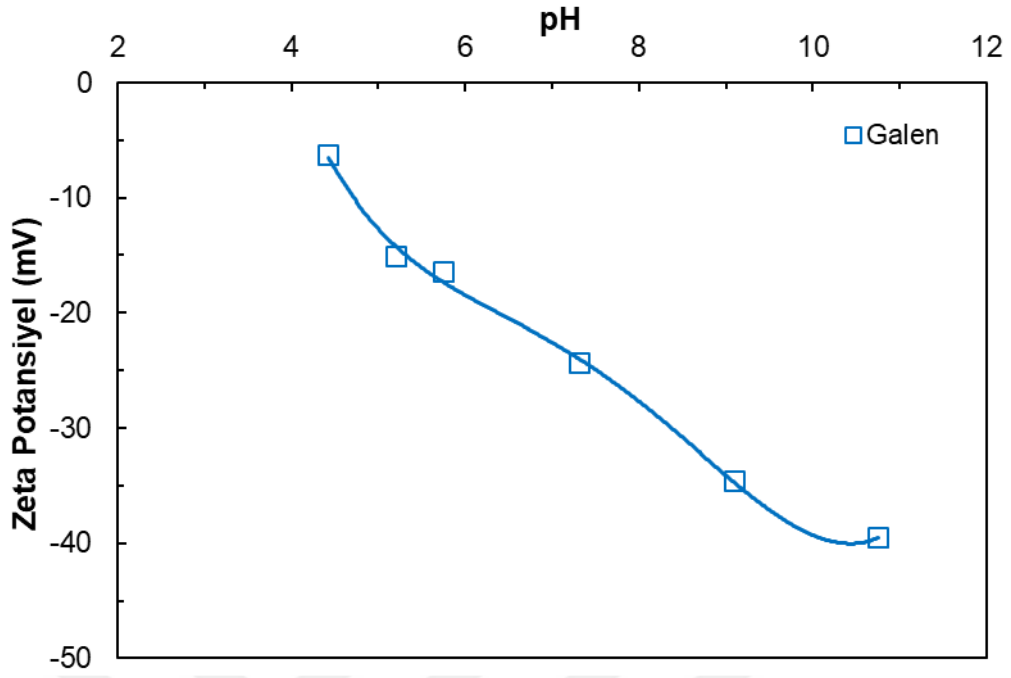
Şekil 4. 10: YTS ve BG varlığında denge yüzey gerilimi değerleri (180 sn) 16 ppm.

Hem iyonların (YTS) hem de BG'nin aynı anda mevcut olduğu bir sistemde iyonlar yüzey gerilimini artırma eğilimindeyken, BG molekülleri bunu azaltma eğilimindedir.

Şekil 4. 9'da görüldüğü gibi düşük iyon konsantrasyonlarında BG moleküllerinin ara yüzeye ulaşması zaman alsa da sonuç olarak BG yüzey gerilimini azaltmaktadır. YTS1 ve BG (16 ppm) varlığında yüzey gerilimi 180 sn sonra 71,7 mN/m'den 70,0 mN/m'ye düşmüştür. Ancak BG'nin bu etkisi iyon konsantrasyonu ile birlikte azalmıştır. YTS10 ve BG (16 ppm) varlığında yüzey gerilimindeki değişiklik yalnızca 0,5 mN/m olmuştur. Şekil 4. 10'da, BG (16 ppm) varlığında YTS konsantrasyonu ile birlikte yüzey geriliminin arttığını göstermektedir. Bu durum yüzey geriliminin belirlenmesinde iyonların baskın kimyasallar olduğunu göstermektedir.

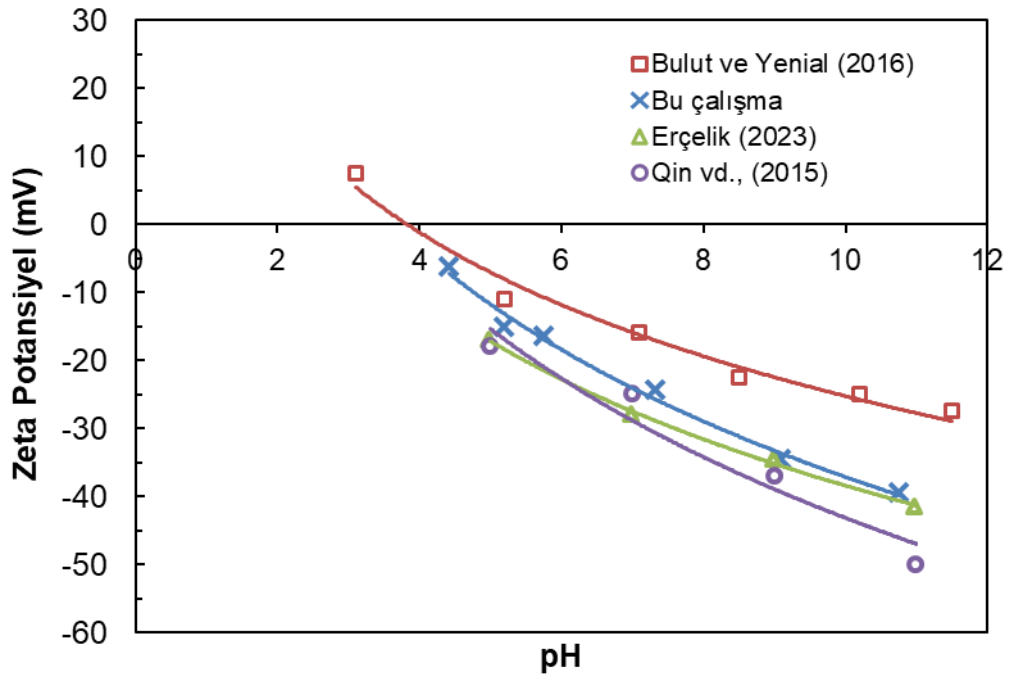
4.3. ZETA POTANSİYEL

pH'a bağlı olarak ölçülen galen zeta potansiyeli değerleri Şekil 4. 11'de verilmiştir.



Şekil 4. 11: Galenin pH'a bağlı zeta potansiyeli.

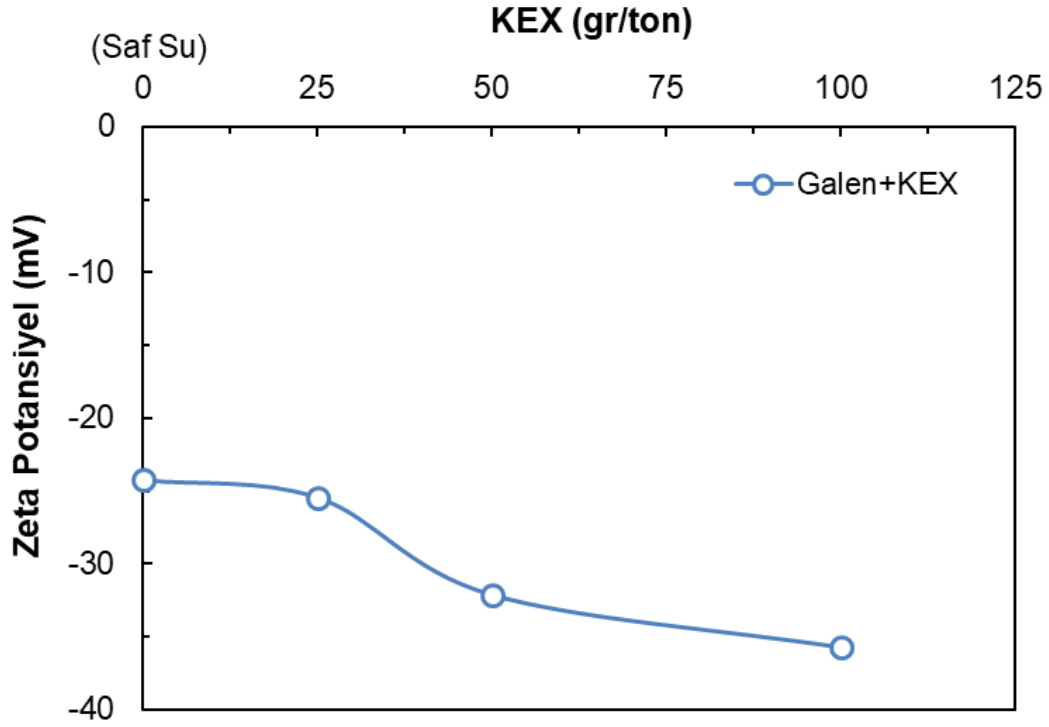
Şekil 4. 11'de görüldüğü gibi galen minerallerinin zeta potansiyeli artan pH ile daha negatif hale gelmiş, pH 4,42'de -6,3 mV iken pH artmasıyla birlikte pH 10,67'de -39,5 mV olmuştur. Elde edilen galen zeta potansiyel profilinin literatür ile karşılaştırması Şekil 4. 12'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 12: Farklı çalışmalarda elde edilen galen zeta potansiyel değerleri.

Bulut ve Yenial (2016) yaptığı çalışmada ise galen mineralin sıfır yük noktası 3,5-4 değerinde olabileceği ortaya konulmuştur.

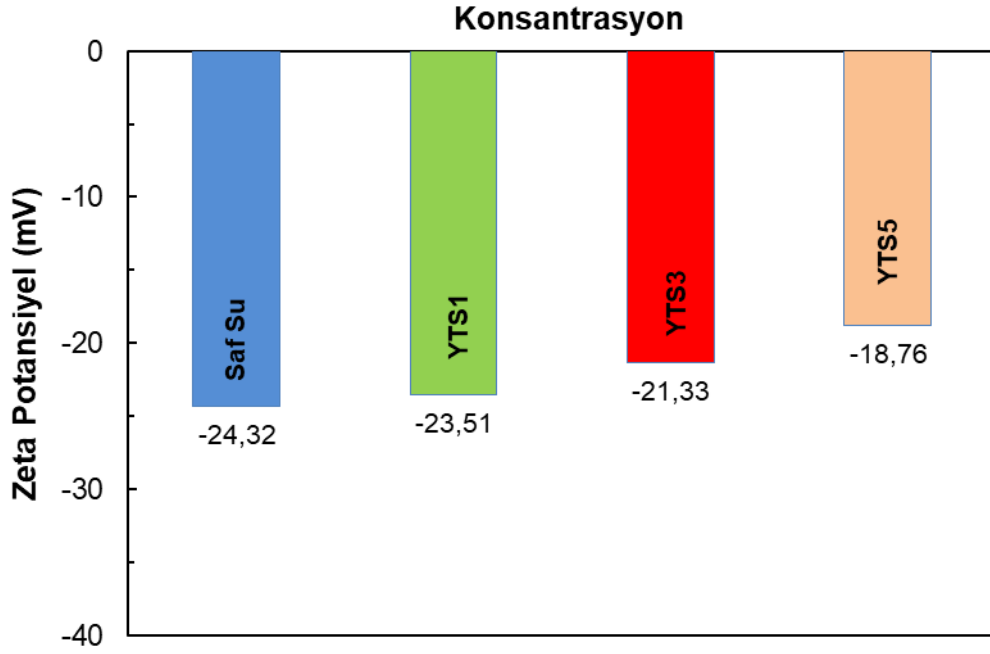
KEX konsantrasyonuna bağlı olarak elde edilen galen zeta potansiyelindeki değişim Şekil 4. 13'te görülmektedir.



Şekil 4. 13: Galenin KEX dozajına bağlı zeta potansiyeli (pH 6,70).

Şekil 4. 13'te görüldüğü gibi KEX adsorpsiyonu sonucunda zeta potansiyelinde negatif yönde bir artış olmaktadır. 25 gr/ton KEX varlığında galenin zeta potansiyeli -25,4 mV iken KEX dozajının 100 gr/ton'a artmasıyla birlikte -35,7 mV olmuştur.

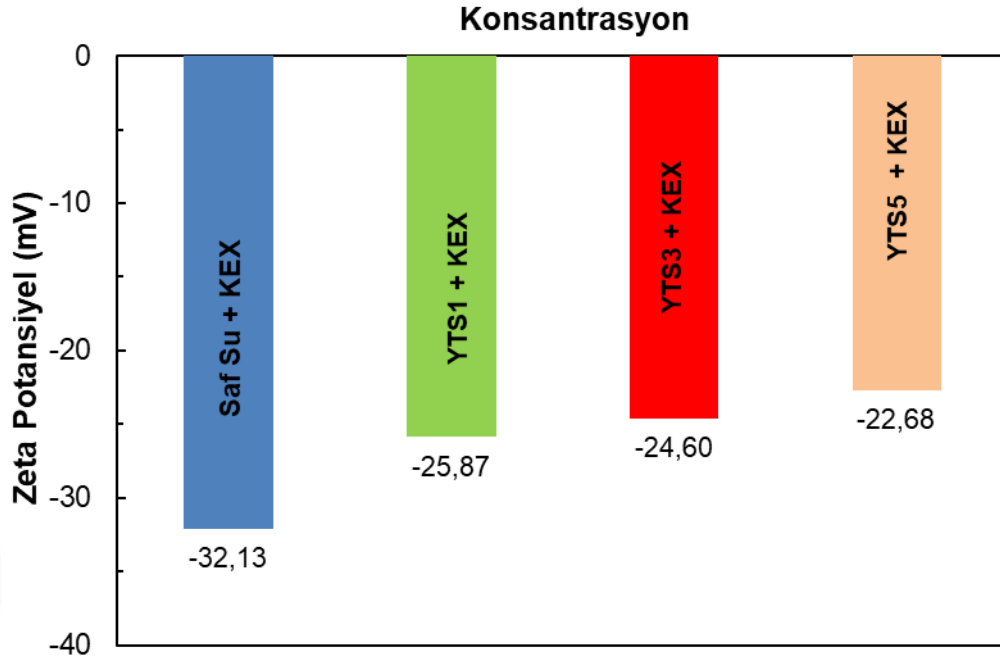
YTS varlığında ölçülen galen mineralin zeta potansiyel değerleri Şekil 4.14'te görülmektedir.



Şekil 4.14: YTS konsantrasyonuna bağlı galenin zeta potansiyeli (pH 6,8).

Şekil 4.14'ten görüldüğü gibi YTS konsantrasyonun arttıkça galenin zeta potansiyeli mutlak değerce azalmakta, saf suda 24,3 mV iken YTS5'te 18,8 mV olmaktadır. October vd. (2020), de iyonik kuvvetin artmasıyla galen zeta potansiyelinin arttığını bildirmişlerdir. YTS 10 varlığında yüksek iyon konsantrasyonundan dolayı ölçüm alınamamıştır.

50 gr/ton KEX varlığında YTS konsantrasyonuna bağlı olarak galenin zeta potansiyel ölçüm sonuçları Şekil 4.15'te verilmiştir.



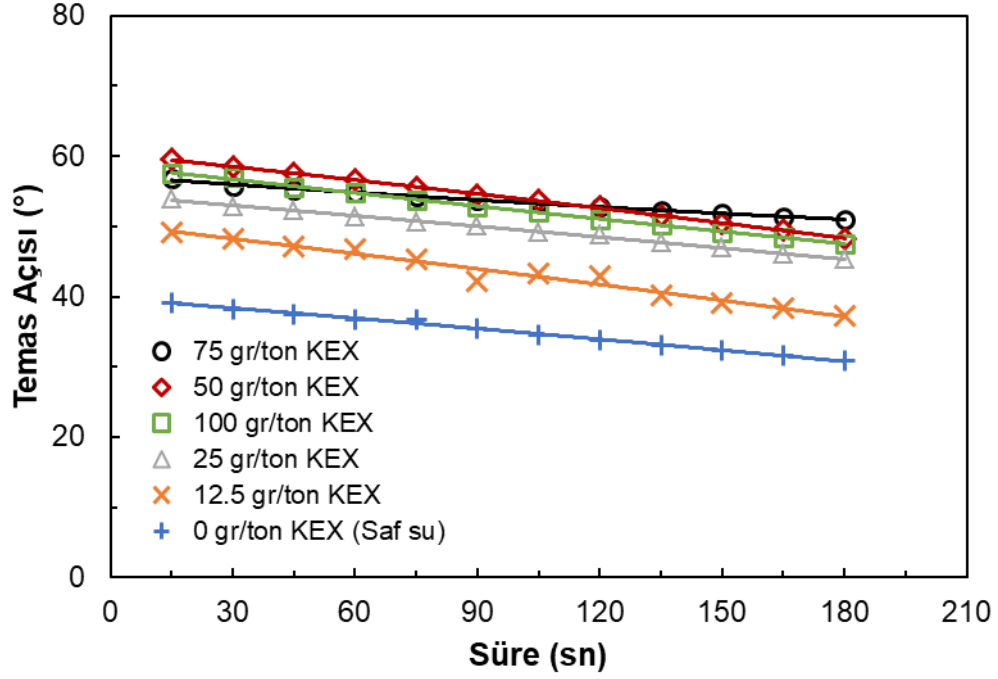
Şekil 4.15: Galenin KEX (50 gr/ton) varlığında YTS konsantrasyonuna bağlı zeta potansiyel değerleri.

Şekil 4.15'te görüldüğü gibi saf su+KEX varlığında galenin zeta potansiyeli 32,13 mV iken, YTS1+KEX varlığında -25,9 mV olarak ölçülmüş ve daha yüksek YTS konsantrasyonlarında mutlak değerce hafifçe azalmıştır.

Ikumapayi vd. (2012) kalsiyum ve sülfat iyonlarının galen flotasyonu üzerine etkisi araştırdıkları çalışmalarında flotasyon veriminde iyon konsantrasyonuna bağlı olarak bir dalgalanma olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca kalsiyum iyonu varlığında galen mineralinin negatif olan zeta potansiyelinin mutlak değerce azaldığını ifade etmişlerdir. Bu durum tez çalışması kapsamında elde edilen temas açısı verileri ile uyumludur. Galenin yüzey yükü iyon tür ve konsantrasyonuna bağlı olarak değişebilmektedir. Bu da mineral yüzeyine kollektör moleküllerinin adsorpsiyonunu ve desorpsiyonunu etkilemektedir.

4.4. TEMAS AÇISI ÖLÇÜMLERİ

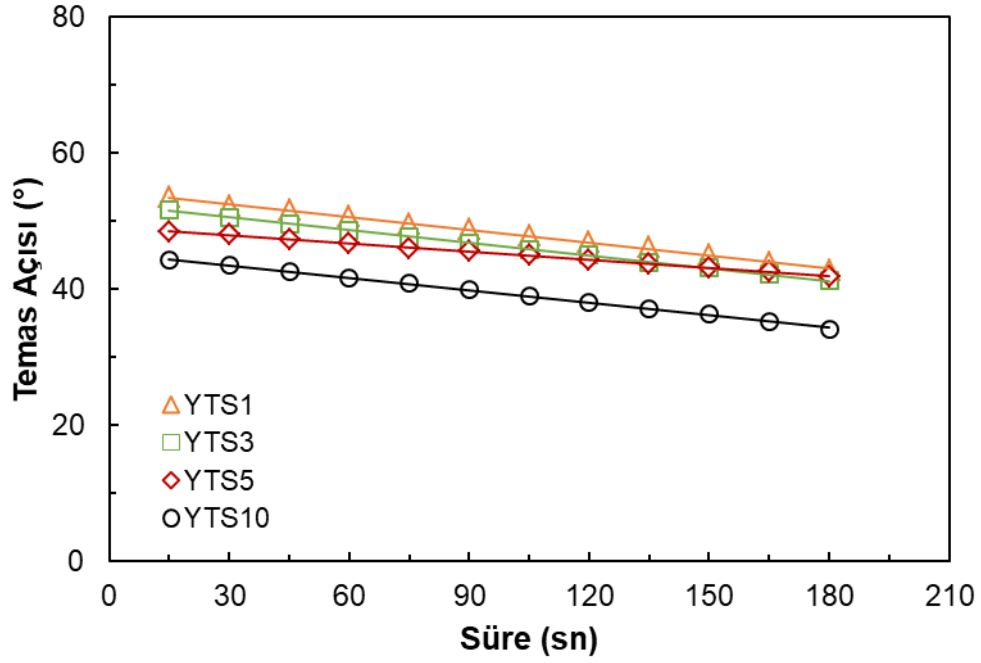
Galen mineralinin farklı KEX konsantrasyonlarında dinamik temas açısı ölçüm sonuçları Şekil 4. 16'da görülmektedir.



Şekil 4. 16: Galen mineralinin farklı KEX konsantrasyonlarında dinamik temas açısı.

Şekil 4. 16’da görüldüğü üzere oluşturulan damlanın zamanla buharlaşmasının sonucu olarak ölçüm süresi ile temas açısı düşmektedir. Ayrıca galen mineralinin temas açısı artan KEX konsantrasyonu ile birlikte artan hidrofobluğa paralel olarak 75 gr/ton KEX’e kadar artmış, en yüksek 60°’ye yakın değerler elde edilmiştir. Ancak KEX konsantrasyonunun 100 gr/ton’a çıkması temas açısında hafif bir düşüşe neden olmuştur. Bunun nedeni KEX moleküllerinin mineral yüzeyine çift tabaka halinde adsorpsiyonu dolayısıyla hidrofobluğun azalması olabilir.

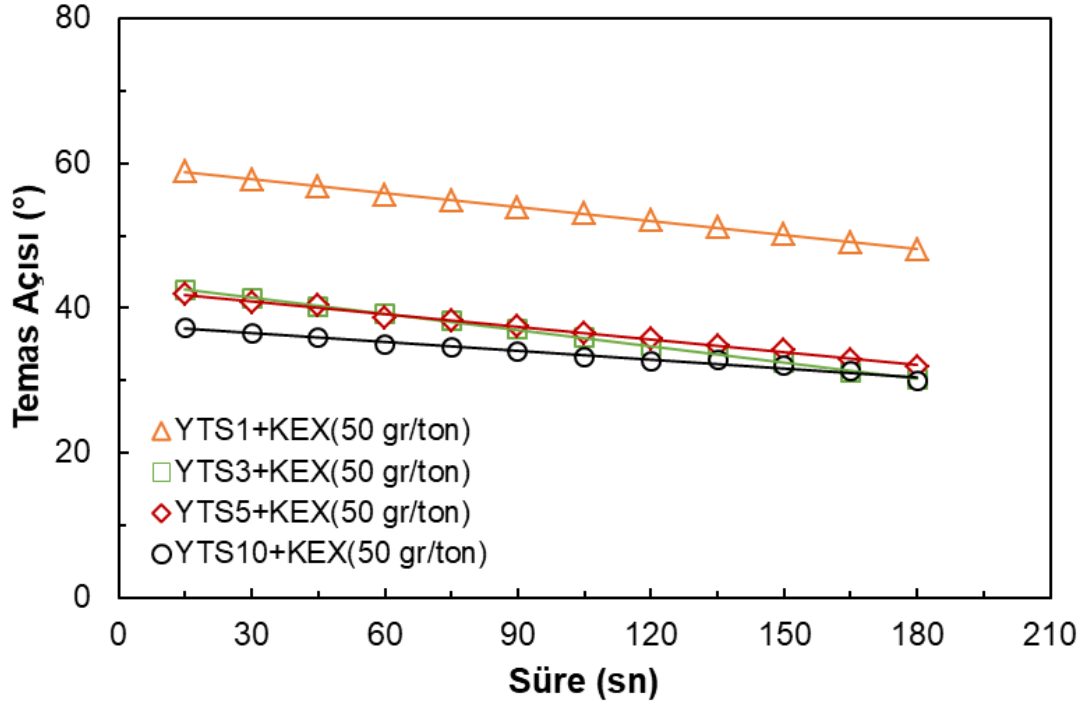
Galen mineralinin farklı YTS konsantrasyonlarında dinamik temas açısı Şekil 4.20’de görülmektedir.



Şekil 4. 17: Galen mineralinin farklı YTS konsantrasyonlarında dinamik temas açısı.

Saf su varlığında $37,53^\circ$ (15 sn) olan temas açısı (Şekil 4. 16), Şekil 4. 17’de görüldüğü gibi YTS1 varlığında 50° ’ye çıkmıştır. Bu koşulda ortamda KEX olmaması kollektör yokluğunda da iyon varlığının temas açısını arttırdığını göstermektedir. Bunun nedeni iyon varlığının galenin negatif olan yüzey yükünü sıfıra yaklaştırması olabilir. Ancak iyon konsantrasyonu arttıkça temas açısı bir miktar düşmektedir.

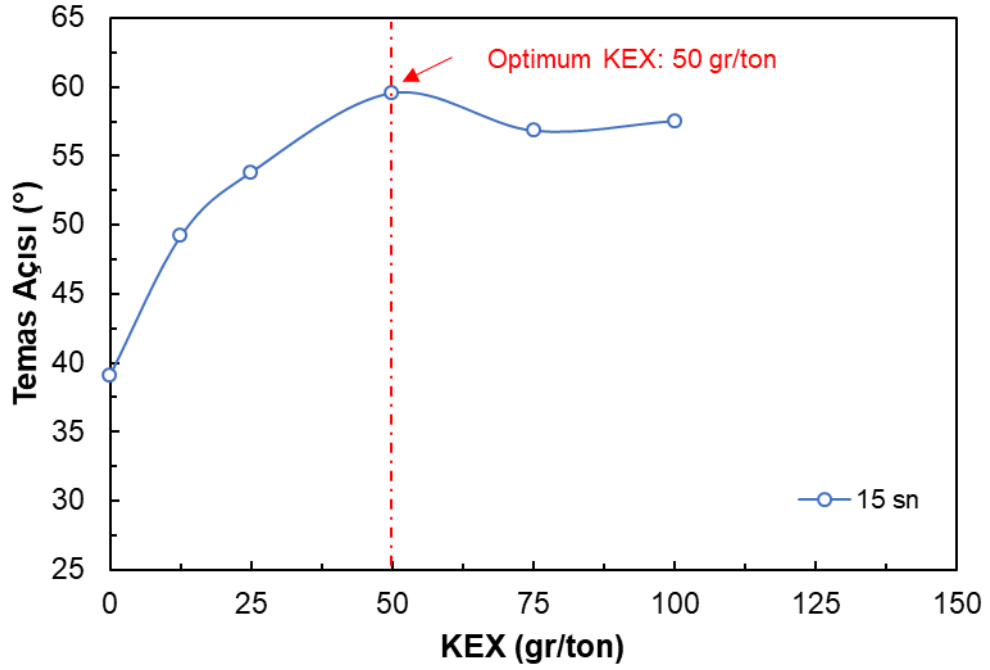
Galen mineralinin KEX (50 gr/ton) varlığında farklı YTS konsantrasyonlarındaki dinamik temas açısı ölçüm sonuçları Şekil 4. 18’de verilmiştir.



Şekil 4. 18: Galen mineralinin KEX (50 gr/ton) varlığında farklı YTS konsantrasyonlarında dinamik temas açısı.

Galen mineralinin temas açısı YTS1 varlığında 15. sn'de 58° olurken, YTS konsantrasyonu arttıkça düşmekte ve YTS10'da 37° olmaktadır (Şekil 4. 18). Bunun nedeni ortamda bulunan iyonların KEX adsorpsiyonunu engellemesi ve/veya yüzeyde adsorbe olmuş KEX moleküllerinin yüzeyden ayrılmasına sebep olması olabilir.

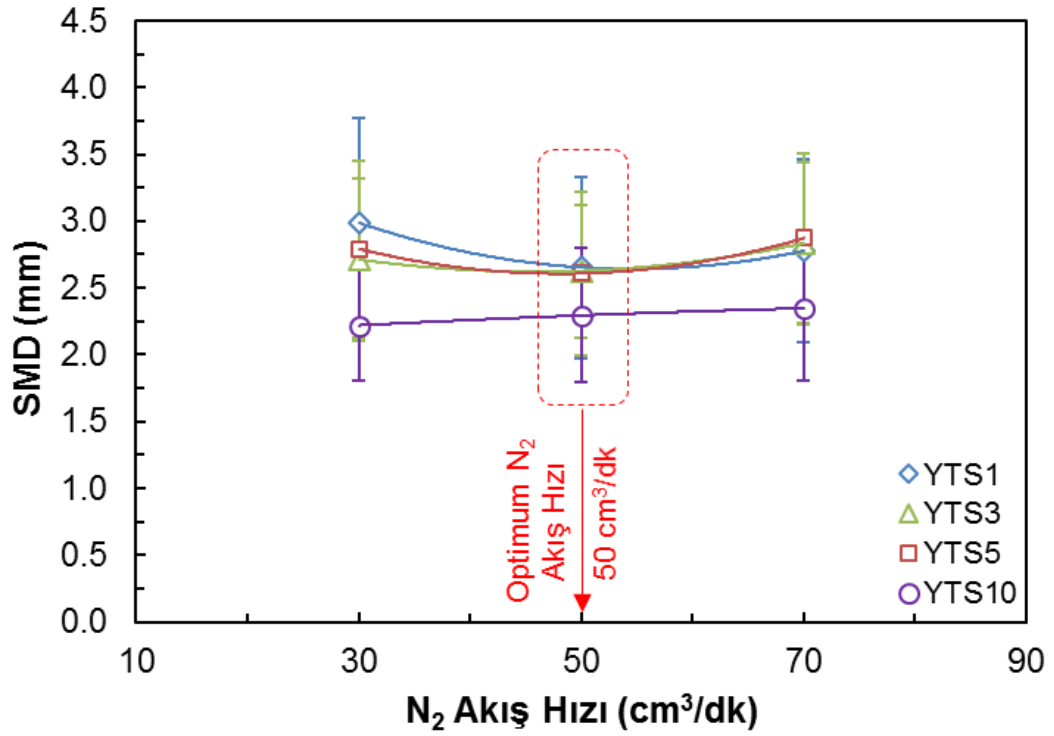
Galen mineralinin KEX konsantrasyonuna bağlı denge temas açısı (15. sn) Şekil 4. 19'de verilmiştir. Şekil 4. 19'da görüldüğü gibi denge temas açısı ölçümleri mikro-flotasyon deneyleri ile uyumlu olup, galen mineralinin hem temas açısı hem de mikro-flotasyon verimi 50 gr/ton KEX konsantrasyonunda platoya ulaşmaktadır.



Şekil 4. 19: Galen mineralinin KEX konsantrasyonuna bağlı denge temas açısı.

4.5. KABARCIK SAUTER ORTALAMA ÇAPI (SMD) VE KABARCIK BOYUT DAĞILIMI ÖLÇÜMLERİ

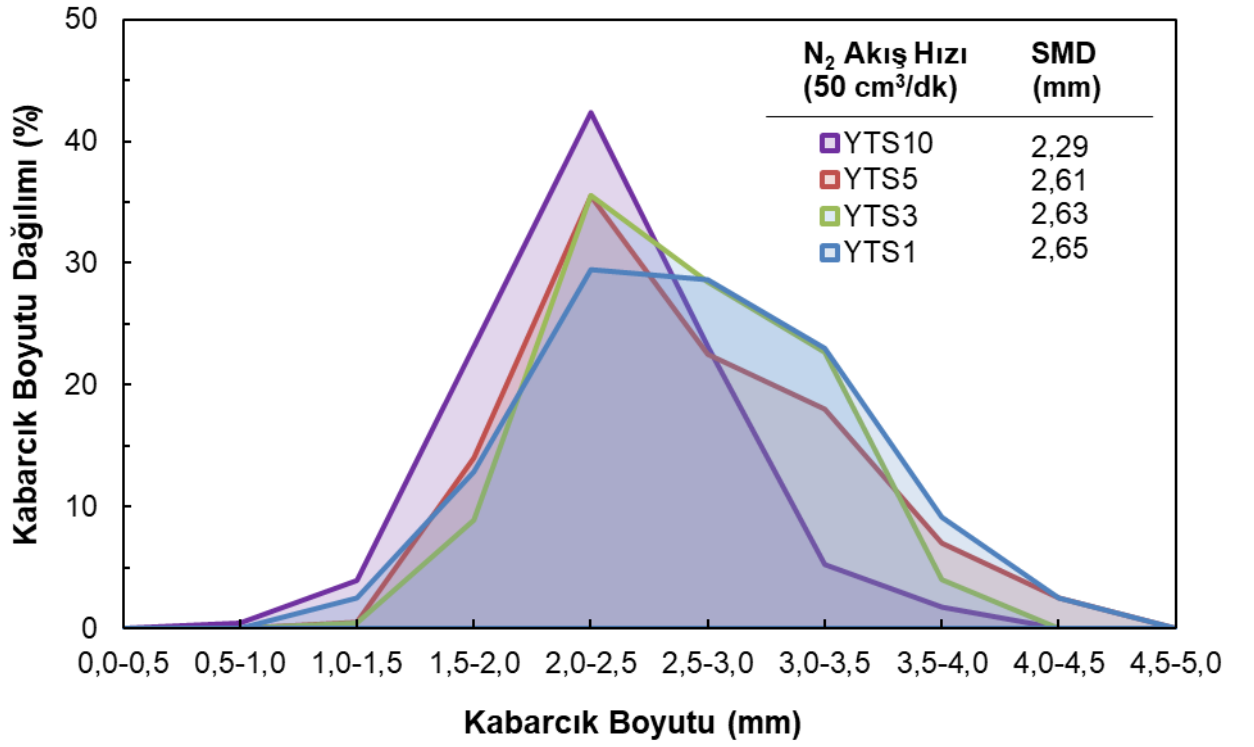
Deneylerde kullanılan azot (N_2) gazının akış hızının SMD üzerindeki etkisini belirlemek için farklı YTS konsantrasyonlarında (YTS1, 3, 5 ve 10) farklı N_2 akış hızlarında (30, 50 ve 70 cm^3/dk) ölçümler yapılmış ve SMD hesaplanmıştır. Farklı YTS konsantrasyonlarında kabarcıkların N_2 akış hızına bağlı Sauter ortalama çapı değerleri Şekil 4.20’de görülmektedir. Şekil 4.20’de verilen sonuçlardan görüldüğü üzere YTS1, 3 ve 5 için en düşük SMD değerleri 50 cm^3/dk N_2 akış hızında elde edilmiş, YTS10 da ise ciddi bir değişim gözlenmemiştir. Bu şartlarda optimum N_2 akış hızı 50 cm^3/dk olarak kabul edilmiş ve sonraki deneylerde kullanılmıştır.



Şekil 4.20: Farklı YTS konsantrasyonlarında kabarcıkların N₂ akış hızına bağlı Sauter ortalama çapı değerleri.

Şekil 4.20’de görüldüğü gibi iyon konsantrasyonu arttıkça SMD’de YTS1, 3 ve 5’te hafifçe YTS10’da ise daha büyük bir düşüş görülmüştür. Literatürden bilindiği gibi Na⁺’nın geçiş konsantrasyonu $1,5 \pm 10^{-5}$ mol/dm³tür (Güngören, vd., 2018). Buna göre Na⁺ gibi bazı iyonların konsantrasyonlarının YTS10 varlığında geçiş konsantrasyonlarından daha yüksek olması SMD değerinin diğer YTS konsantrasyonlarına göre daha fazla düşmesine neden olmuştur. N₂ akış hızı gibi fiziksel parametrelerin SMD üzerindeki etkisi, düşük YTS konsantrasyonlarında yüksek YTS konsantrasyonlarına nazaran daha yüksektir.

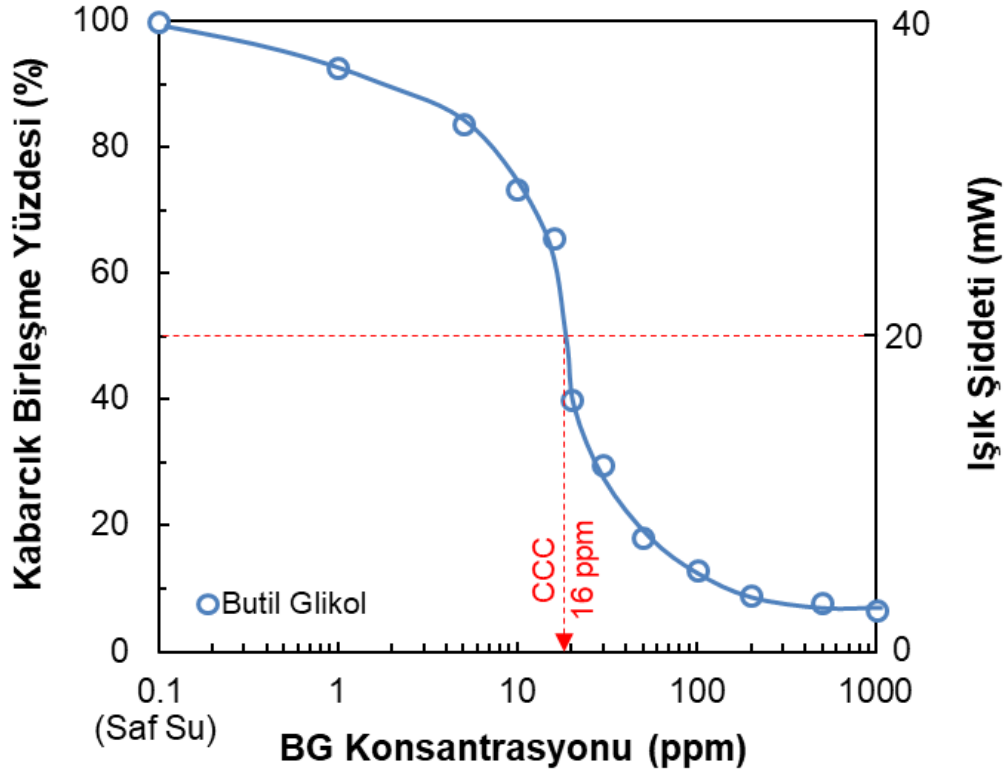
50 cm³/dk sabit N₂ akış hızında farklı YTS konsantrasyonlarında elde edilen kabarcık boyut dağılımı Şekil 4. 21’de görülmektedir.



Şekil 4. 21: Farklı YTS konsantrasyonlarında kabarcık boyut dağılımı (50 cm³/dk N₂).

Şekil 4. 21’de görüldüğü gibi YTS1 varlığında kabarcıklar geniş bir boyut dağılımı sergilemektedir. İyon konsantrasyonu artıkça daha küçük ve dar bir boyut aralığında kabarcıklar elde edilmiştir.

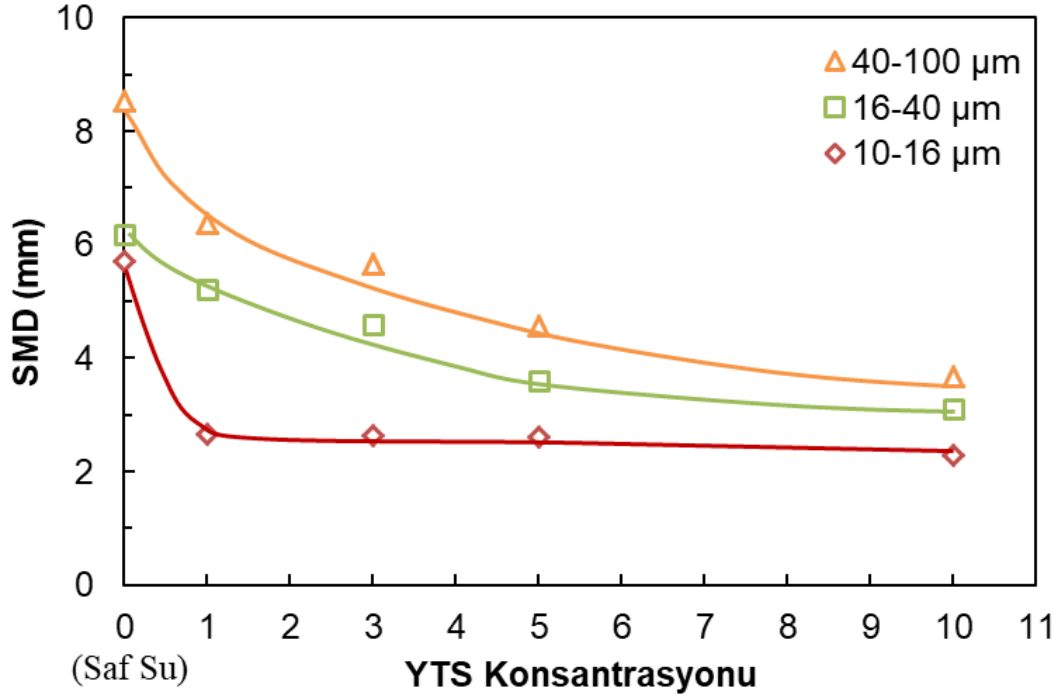
50 cm³/dk sabit N₂ akış hızında BG konsantrasyonuna bağlı ışık şiddeti ve kabarcık birleşme yüzdesi değerleri Şekil 4. 22’de verilmiştir.



Şekil 4. 22: BG Konsantrasyonuna bağlı ışık şiddeti ve kabarcık birleşme yüzdesi değerleri (50 cm³/dk N₂).

Şekil 4. 22’de BG konsantrasyonu arttıkça ışık şiddetinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni BG’nin hava-su ara yüzeyine adsorplanarak yüzey gerilimini düşürmesi böylece kabarcıkların diğer kabarcıklarla birleşmeden daha küçük boyutta stabil olarak kalabilmesidir. Ortamda bulunan kabarcık sayısı arttıkça bu kabarcıkların su ile oluşturdukları ara yüzeyler ışığı kırmakta ve ölçüm hücresinin karşına geçerek detektöre ulaşan ışığın şiddeti düşmektedir. BG yokluğunda %100 olan kabarcık birleşmesi BG konsantrasyonu arttıkça düşmüş, 16 ppm BG varlığında %50 olmuştur. 100 ppm BG’den sonra kabarcık birleşmesi minimum düzeyde olmaktadır ancak bu konsantrasyon, Pb-Zn flotasyonunda kullanılan BG konsantrasyonlarından çok daha yüksektir (Güngören vd., 2023).

Çalışma kapsamında ayrıca farklı frit gözenek açıklıklarına sahip hücreler de kullanılarak kabarcık boyutundaki değişim incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4. 23’de verilmiştir.

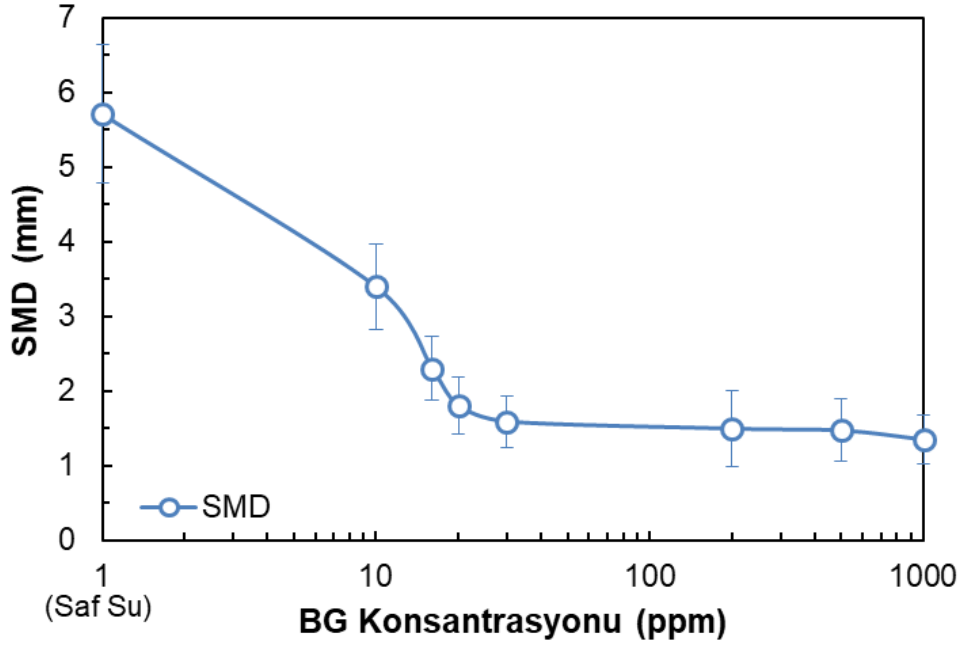


Şekil 4. 23: Farklı YTS konsantrasyonlarında kabarcıkların frit açıklığına bağlı SMD değerleri (frit gözenek çapı (a) 10-16 µm, (b) 16-40 µm, (c) 40-100 µm).

Şekil 4. 23'te görüldüğü gibi 40-100 µm gözenek açıklıklı frit ile üretilen kararlı kabarcıkların ortalama boyutu (SMD) 54 mm iken, 16-40 µm ve 10-16 µm gözenek açıklıklarında sırasıyla 6,18 ve 5,70 mm olmaktadır. SMD tüm gözenek açıklıklarında YTS konsantrasyonu ile düşmektedir. Sonraki çalışmalar en küçük kabarcık boyutunun elde edildiği 10-16 µm açıklıklı fritte sahip hücre kullanılarak yapılmıştır. Bu frit açıklığında SMD en düşük iyon konsantrasyonuna sahip YTS1'de 2,65 mm'de platoya ulaşmaktadır.

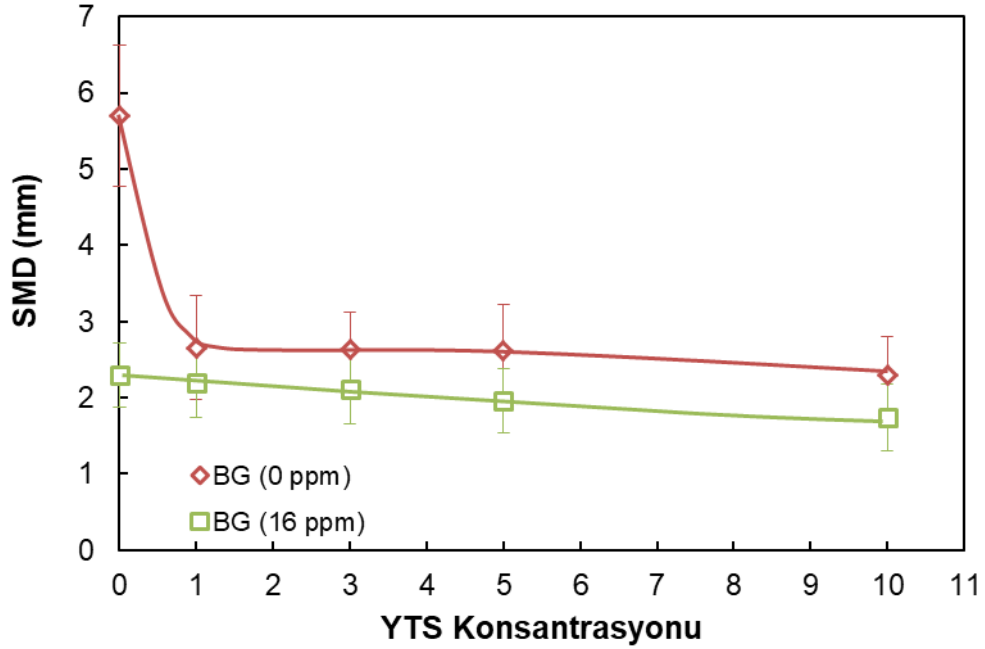
50 cm³/dk N₂ akış hızında BG konsantrasyonuna bağlı Sauter ortalama çapı değerleri Şekil 4.24'te verilmiştir.

Şekil 4.24'ten görüldüğü gibi SMD saf su varlığında 5,70 mm iken BG ilavesiyle düşmekte ve 30 ppm BG'de 1,59 mm civarında platoya ulaşmaktadır. Benzer şekilde Kowalczuk vd. (2015) de su ile kıyasladığında kabarcık boyutunda %95 azalma sağlayan BG konsantrasyon değerini 0,236 mol/dm³ (27,89 ppm) olarak bulmuşlardır.



Şekil 4.24: BG konsantrasyonuna bağlı Sauter ortalama çapı değerleri ($50 \text{ cm}^3/\text{dk N}_2$).

YTS konsantrasyonuna bağlı kabarcık SMD değerleri Şekil 4.25'te verilmiştir.

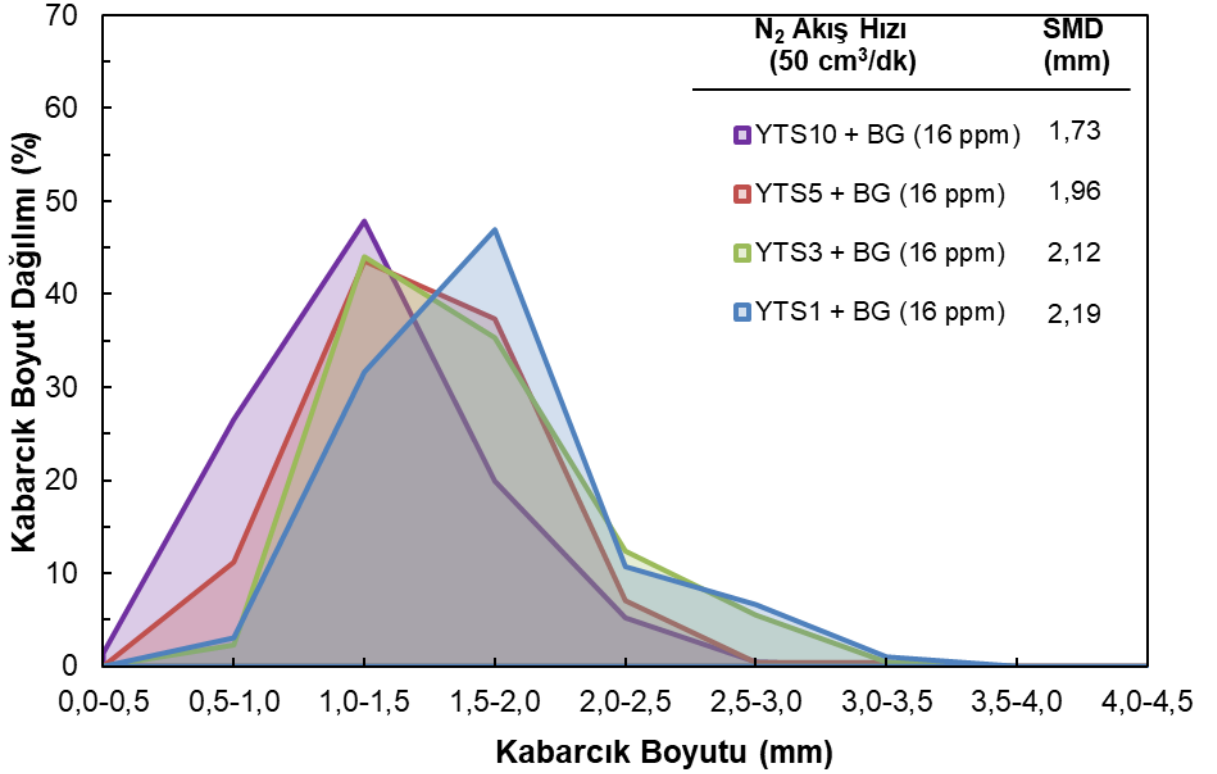


Şekil 4.25: YTS Konsantrasyonunun BG yokluğunda ve 16 ppm (CCC) BG varlığında Sauter ortalama çapına etkisi ($50 \text{ cm}^3/\text{dk N}_2$).

Şekil 4.25'ten görüldüğü üzere BG yokluğunda suda çözünmüş iyon varlığı SMD değerinde hızlı bir düşüşe neden olmaktadır. Saf suda 5,70 mm olan SMD, YTS1 varlığında 2,65 mm'ye

düşmekte ve platoya ulaşmaktadır. Ortama CCC değeri olan 16 ppm BG katıldığında ise SMD değeri saf suda 2,30 mm olurken, YTS konsantrasyonunun artmasıyla SMD değerlerinde hafif bir düşüş yaşanmakta ve YTS10'da 1,73 mm olmaktadır.

50 cm³/dk N₂ akış hızında 16 ppm (CCC) BG varlığında ve farklı YTS konsantrasyonlarında kabarcık boyut dağılımı Şekil 4.26'da verilmiştir.

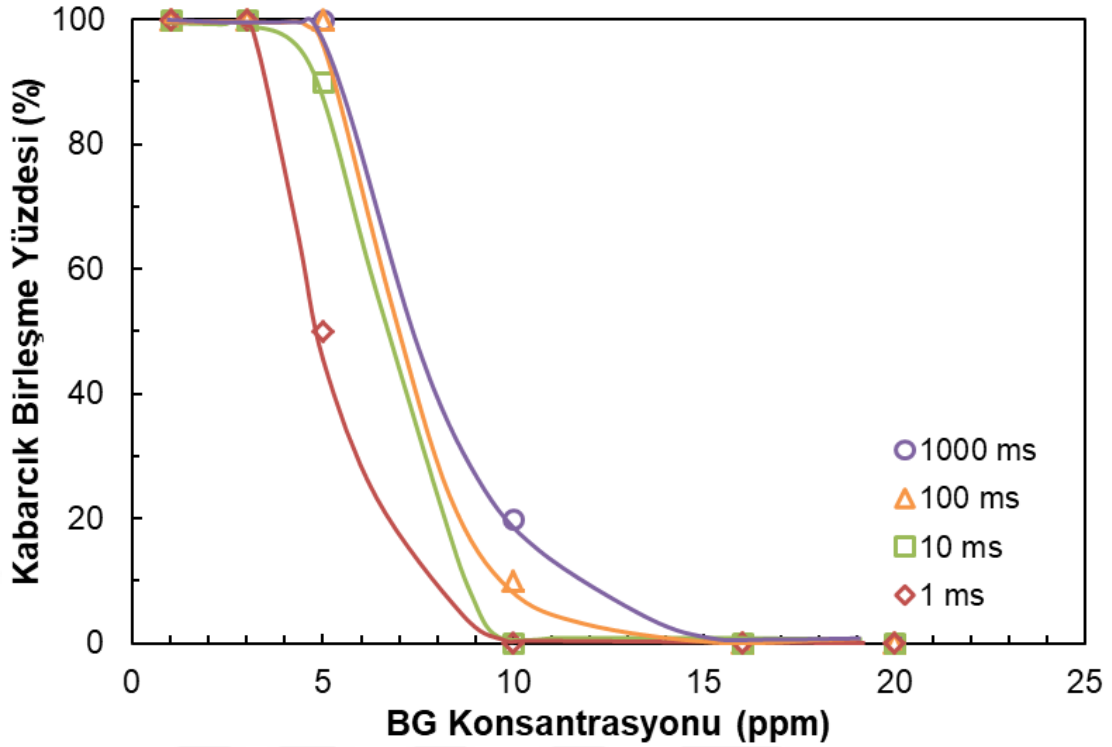


Şekil 4.26: 16 ppm (CCC) BG ve farklı YTS konsantrasyonlarında kabarcık boyut dağılımı (50 cm³/dk N₂).

Şekil 4.26'dan görüldüğü üzere 16 ppm BG (CCC) varlığında ortamdaki iyon konsantrasyonu arttıkça daha küçük boyut dağılımında kabarcıklar elde edilmektedir.

4.6. KABARCİK BİRLEŞME SÜRESİ ÖLÇÜMLERİ

1, 10, 100 ve 1000 ms temas sürelerinde BG konsantrasyonuna bağlı kabarcık birleşme yüzdeleri Şekil 4. 27'de görülmektedir.



Şekil 4. 27: 1, 10, 100 ve 1000 ms temas sürelerinde BG konsantrasyonuna bağlı kabarcık birleşme yüzdesi değerleri.

Şekil 4. 27’de görüldüğü gibi ~5 ppm BG konsantrasyonuna kadar kabarcıkların birleşmesi engellenememiştir. BG konsantrasyonunun artmasıyla birlikte kabarcık birleşme olasılığı temas süresiyle ters orantılı olarak azalmıştır. Aynı temas süresinde kabarcıkların birleşmesini önlemek için daha yüksek BG konsantrasyonlarına ihtiyaç vardır. 16 ppm BG’nin varlığında yüzey geriliminde önemli bir azalma olmamasına rağmen (Şekil 4.4) kabarcıkların birleşmesi, 1000 ms’lik temas süresinde dahi tamamen engellenmiştir.

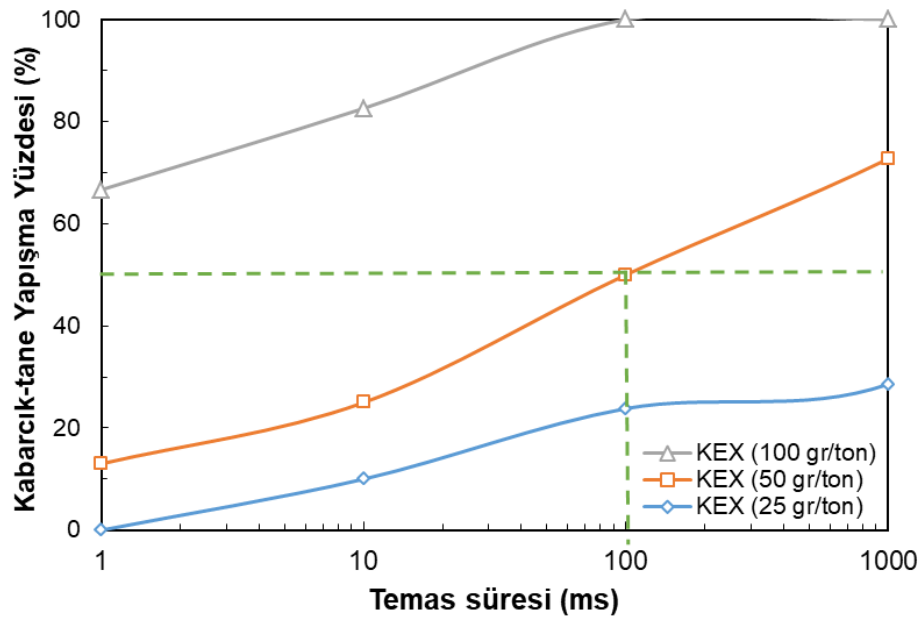
YTS varlığında farklı koşullarda kabarcık birleşme yüzdesi değerleri Tablo 4. 2’de görülmektedir. Tablo 4. 2’deki veriler YTS varlığında kabarcık birleşmesinin BG yokluğunda dahi neredeyse tamamen engellediğini göstermektedir. Benzer şekilde Roberto ve Arturo (2020) KEX’in alkali pH koşullarında birleşme süresini azalttığını belirtmiştir.

Tablo 4. 2: BG ve KEX varlığında ve yokluğunda farklı YTS konsantrasyonlarında kabarcık birleşme sonuçları

Koşul	Birleşme Sonucu
YTS1	Birleşme Yok
YTS3	Birleşme Yok
YTS5	Birleşme Yok
YTS10	Birleşme Yok
YTS1+BG (16 ppm)	Birleşme Yok
YTS3+BG (16 ppm)	Birleşme Yok
YTS5+BG (16 ppm)	Birleşme Yok
YTS10+BG (16 ppm)	Birleşme Yok
YTS1+BG (16 ppm)+ KEX (50 gr/ton)	Birleşme Yok
YTS3+BG (16 ppm)+ KEX (50 gr/ton)	Birleşme Yok
YTS5+BG (16 ppm)+ KEX (50 gr/ton)	Birleşme Yok
YTS10+BG (16 ppm)+ KEX (50 gr/ton)	Birleşme Yok

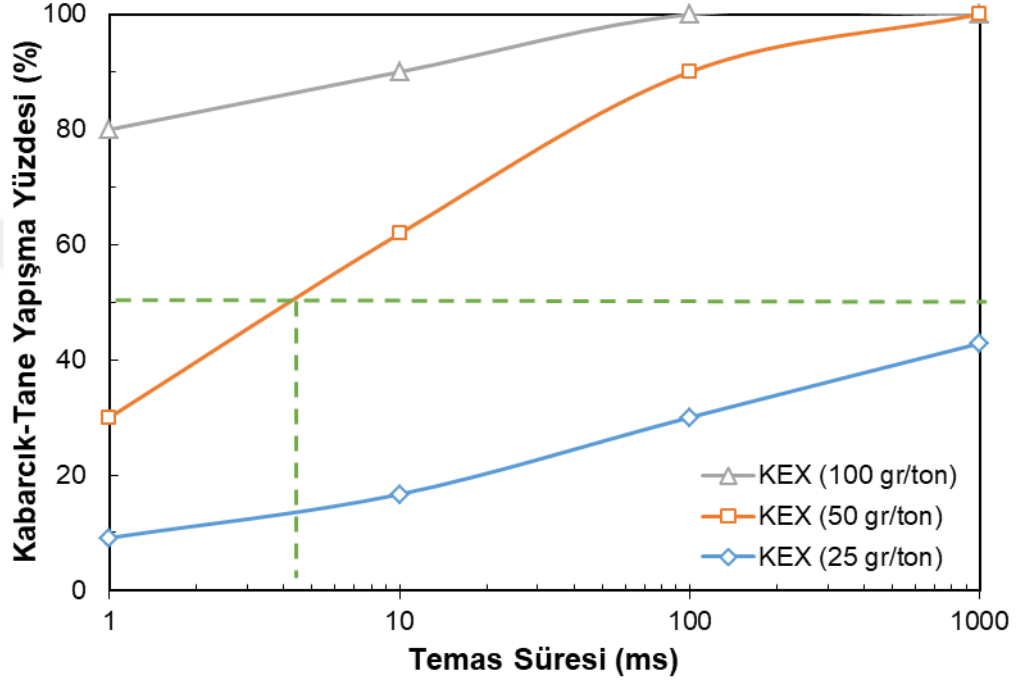
4.7. KABARCİK-TANE YAPIŞMA SÜRESİ ÖLÇÜMLERİ

Farklı KEX konsantrasyonlarında ve tane boyutlarında galen numunesi ile yapılmış kabarcık-tane yapışma yüzdesi sonuçları -125+106, -106+75, -75+38 μm tane boyutu için sırasıyla Şekil 4. 28, Şekil 4. 29 ve Şekil 4. 30'da verilmiştir.



Şekil 4. 28: -125+106 μm tane boyutu için temas süresine bağlı kabarcık-tane yapışma yüzdesi.

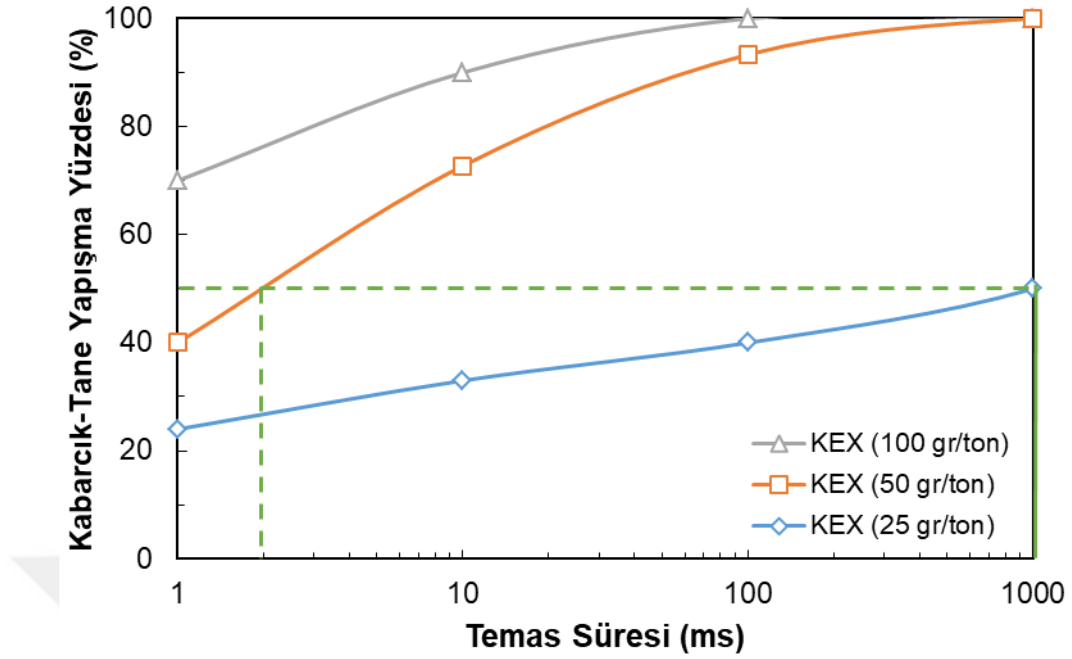
Şekil 4. 28'ten görüldüğü gibi KEX konsantrasyonu arttıkça kabarcık-tane yapışma yüzdesi artmaktadır. 25 gr/ton KEX varlığında kabarcık-tane yapışma yüzdesi 1000 ms temas süresinde dahi %50'nin altında kalmıştır. 50 gr/ton KEX varlığında kabarcık-tane yapışma yüzdesi yaklaşık 100 ms'dir. KEX konsantrasyonu 100 gr/ton'a çıkarıldığında ise 1 ms temas süresinde dahi %66,7 olasılıkla kabarcık-tane yapışması gerçekleşmekte ve 100 ms'de bu oran %100 olmaktadır.



Şekil 4. 29: -106+75 μm tane boyutu için temas süresine bağlı kabarcık-tane yapışma yüzdesi.

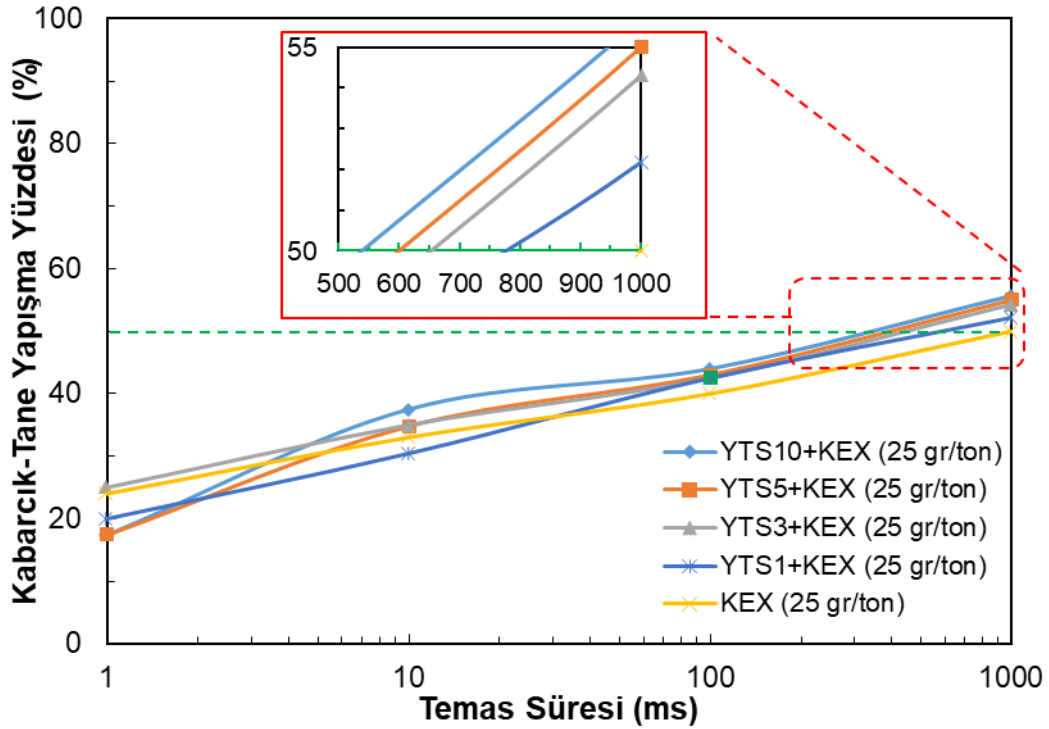
Şekil 4. 29'dan görüldüğü gibi -106+75 μm tane boyutunda da 25 gr/ton KEX kabarcık-tane yapışma olasılığının yeteri kadar (%50) arttıramamıştır. 50 gr/ton KEX konsantrasyonunda kabarcık-tane yapışma süresi 4 ms civarında gerçekleşmiş. 100 gr/ton'da 1 ms'de kabarcık-tane yapışma olasılığı %80 olmuştur.

Şekil 4. 30'da görüldüğü üzere -75+38 μm tane boyutu için de -106+75 μm tane boyutuna benzer sonuçlar elde edilmiş, 25 gr/ton için kabarcık tane yapışma süresi 2 ms olmuştur.



Şekil 4. 30: -75+38 µm tane boyutu için temas süresine bağlı kabarcık-tane yapışma yüzdesi.

Bu deneylerden elde edilen veriler ışığında YTS'nin etkisinin araştırılması için en uygun koşulların 25 gr/ton KEX ve -75+38 µm tane boyutu olduğuna karar verilmiştir. Deney sonuçları Şekil 4. 31'de görülmektedir.



Şekil 4. 31: KEX (25 gr/ton) varlığında YTS konsantrasyonunun kabarcık-tane yapışma yüzdesine etkisi.

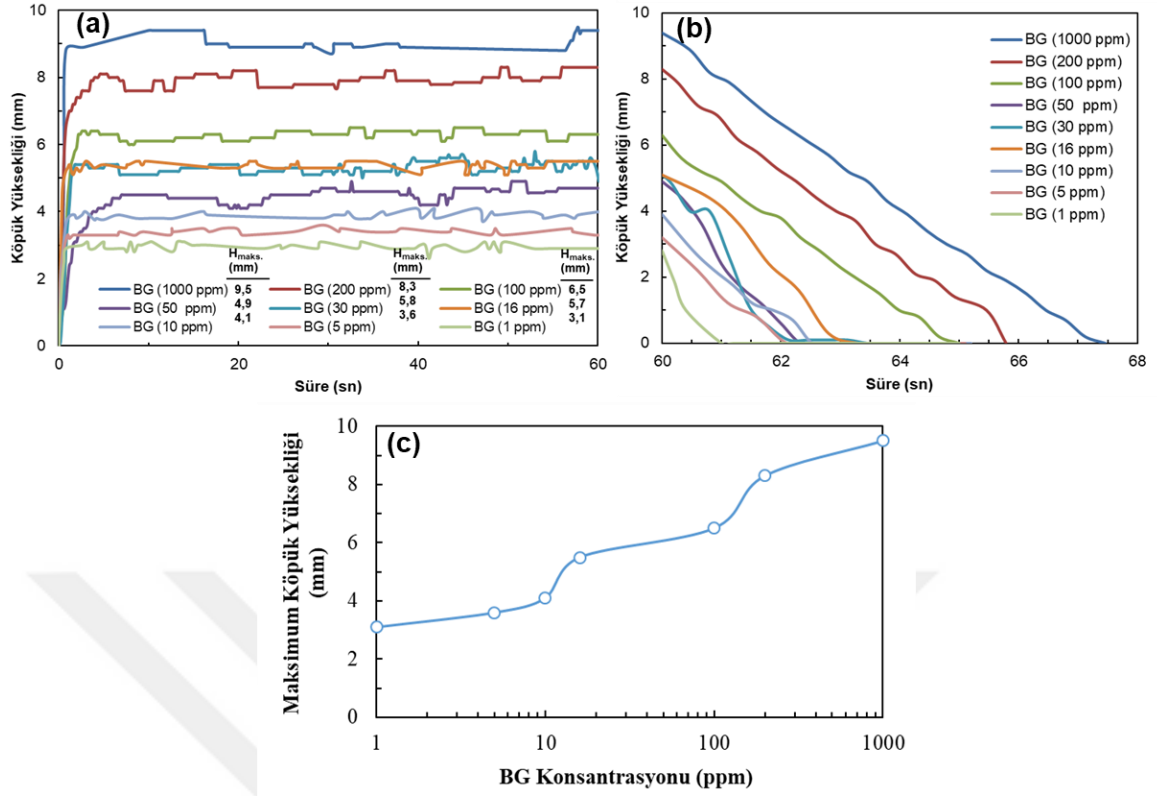
Şekil 4. 31’de görülen deney sonuçlarına göre YTS yokluğunda 25 gr/ton KEX varlığında 1000 ms olan kabarcık-tane yapışma süresi, YTS1, YTS3, YTS5 ve YTS10 için sırasıyla yaklaşık 780, 660, 590 ve 550 ms’ye düşmüştür. Dolayısıyla ölçüm sonuçları KEX varlığında iyon varlığının konsantrasyona bağlı olarak kabarcık-tane yapışma süresini azalttığını ortaya koymuştur.

Yoon ve Yordan (1991) KCl konsantrasyonu ile kuvars-dodesilamin hidroklorür (DAH) sisteminde kabarcık-tane yapışma süresini düşürdüğünü dolayısıyla yüzebilirliğin arttığını bildirmiştir. Bu durumu çözülmüş iyonlar varlığında EÇT bastırılmasına ve dolayısıyla kabarcık ve tane arasındaki sıvı filminin daha hızlı bozunmasına bağlamışlardır. Galen minerali varlığında da benzer bir durum gerçekleşmektedir.

October vd. (2021) de iyon konsantrasyonu ile meydana gelen iyonik kuvvetteki artışın minerallerin zeta potansiyelini değiştirdiğini EÇT’yi bastırdığını ve tane aglomerasyonuna neden olduğu belirtmiş ve kabarcık-tane yapışmasında meydana gelen artışı bu duruma bağlamışlardır.

4.8. DİNAMİK KÖPÜK STABİLİTESİ ÖLÇÜMLERİ

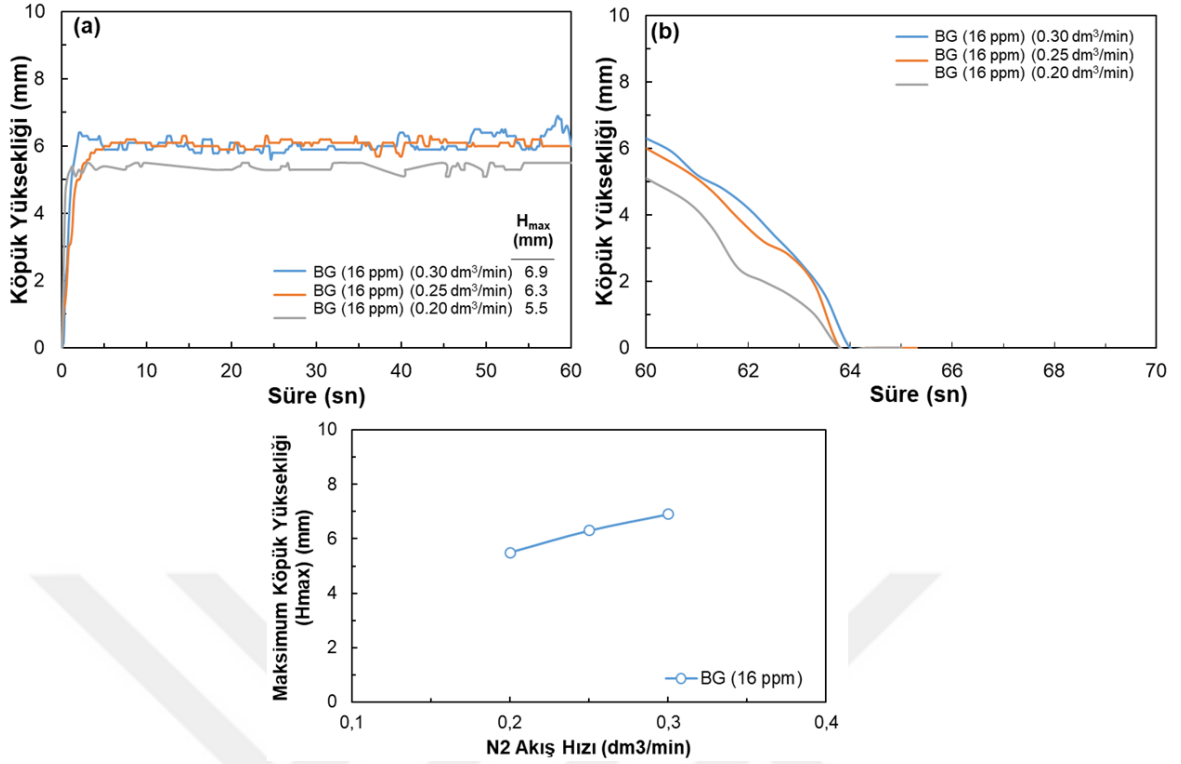
BG konsantrasyonun köpük yüksekliğine köpük üretim ve köpük bozunma aşamalarındaki etkisi Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.32: BG konsantrasyonun köpük yüksekliğine (a) köpük üretim, (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi ve (c) BG konsantrasyonuna bağlı maksimum köpük yükseklikleri.

Şekil 4.32a ve Şekil 4.32c’de görüldüğü gibi BG konsantrasyonu arttıkça köpük yüksekliği artmaktadır. Şekil 1c’de görüldüğü gibi 1 ppm BG konsantrasyonunda 3,1 mm olan maksimum köpük yüksekliği, 16 ppm BG varlığında 5,5 mm, 1000 ppm BG’de ise 9,5 mm’lik köpük yüksekliği elde edilmiştir. Köpüğün yüksek BG konsantrasyonlarında daha geç bozunduğu görülmektedir. Köpük 1 ppm BG varlığında 1 sn’de bozunurken, bu süre 1000 ppm BG konsantrasyonunda yaklaşık 7 sn olmuştur (Şekil 4.32b).

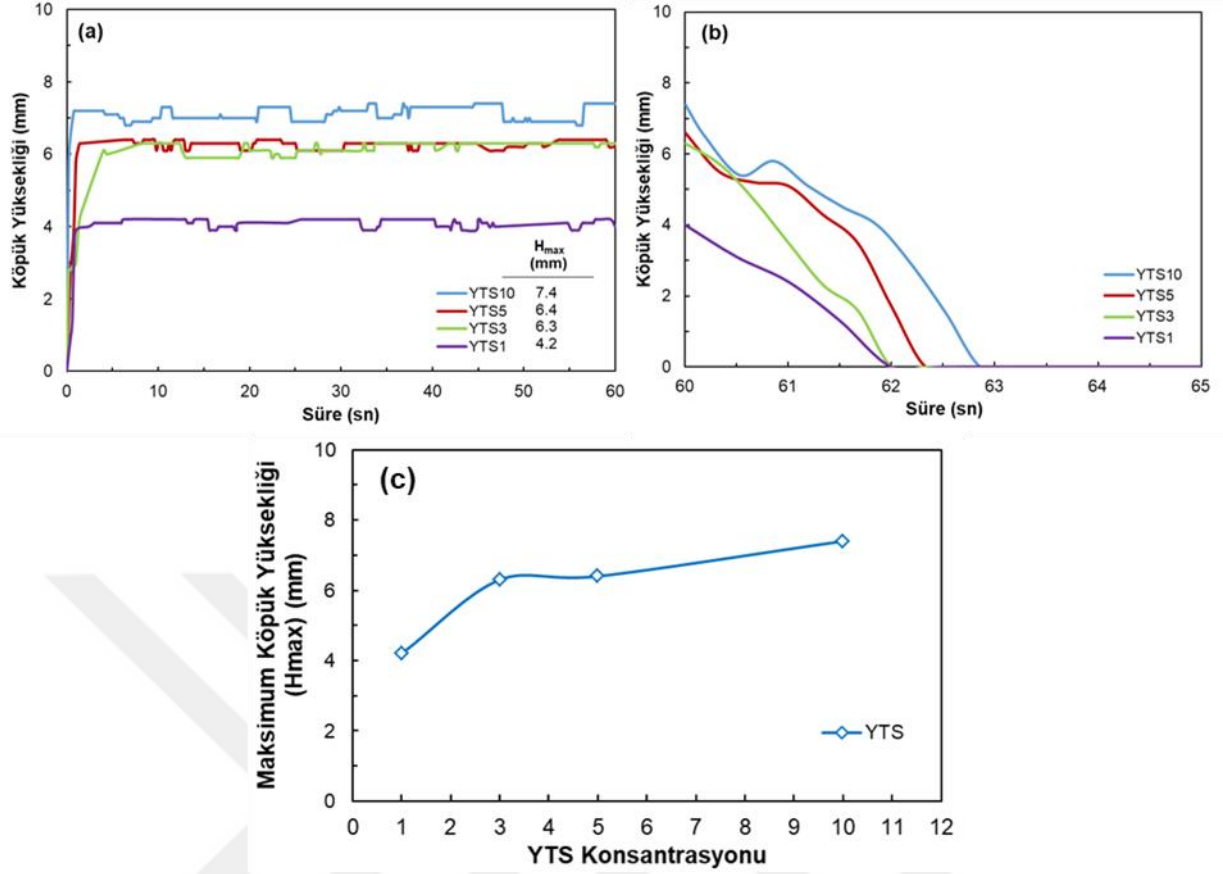
Hava akış hızının (0,20-0,25-0,30 dm^3/dk) köpük yüksekliğine etkisi ise Şekil 4.33’te görülmektedir.



Şekil 4.33: Hava akış hızının köpük yüksekliğine (a) köpük üretim, (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi ve (c) hava akış hızına bağlı maksimum köpük yükseklikleri.

Şekil 4.33a ve Şekil 4.33c’de görüldüğü gibi hava akış hızı $0,20 \text{ dm}^3/\text{dk}$ iken maksimum köpük yüksekliği 5,5 mm olmuştur. Hava akış hızının $0,25 \text{ dm}^3/\text{dk}$ ve $0,30 \text{ dm}^3/\text{dk}$ ’ya artmasıyla birlikte maksimum köpük yüksekliği sırasıyla 6,3 mm ve 6,9 mm’ye çıkmaktadır. Hava akış hızının köpük bozunması üzerinde ise ciddi bir etkisi yoktur ve bu süre yaklaşık 3,7sn’dir. (Şekil 4.33b). $0,20 \text{ dm}^3/\text{dk}$ ’da yapılan deneyin daha stabil olmasından dolayı sonraki deneyler bu hava akış hızında gerçekleştirilmiştir.

YTS konsantrasyonunun köpük yüksekliğine etkisi Şekil 4. 34’te görülmektedir.

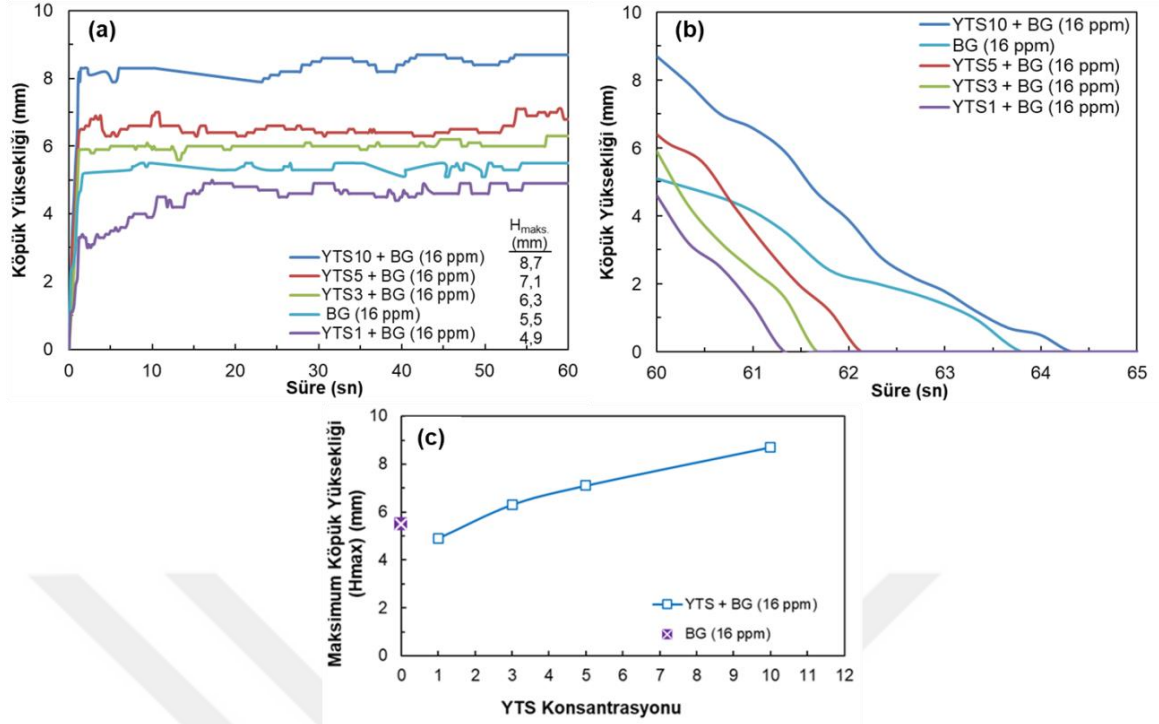


Şekil 4. 34: YTS konsantrasyonun köpük yüksekliğine (a) köpük üretim, (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi ve (c) YTS konsantrasyonuna bağlı maksimum köpük yükseklikleri.

Şekil 4. 34a ve Şekil 4. 34c’de görüldüğü gibi YTS varlığında köpük yüksekliği artarak, yaklaşık 1 sn içerisinde platoya ulaşmaktadır. Köpük yüksekliği (H_{max}) YTS1’de 4,2 mm iken, YTS konsantrasyonu ile artmakta ve YTS10’da 7,4 mm’ye ulaşmaktadır. Şekil 4. 34c’de ise YTS1 ve YTS3’te köpük yaklaşık 1 sn içinde bozunurken, yüksek iyon konsantrasyonunda köpüğün bozunması daha uzun sürmekte ve YTS10’da 2,54 sn olmaktadır.

İyonik kuvvet köpük kararlılığı üzerinde de etkilidir. Farrokhpay ve Zanin (2012) yaptığı çalışmada, çok değerlikli metal iyonlarının varlığında daha yüksek bir köpük kararlılığı elde etmişlerdir.

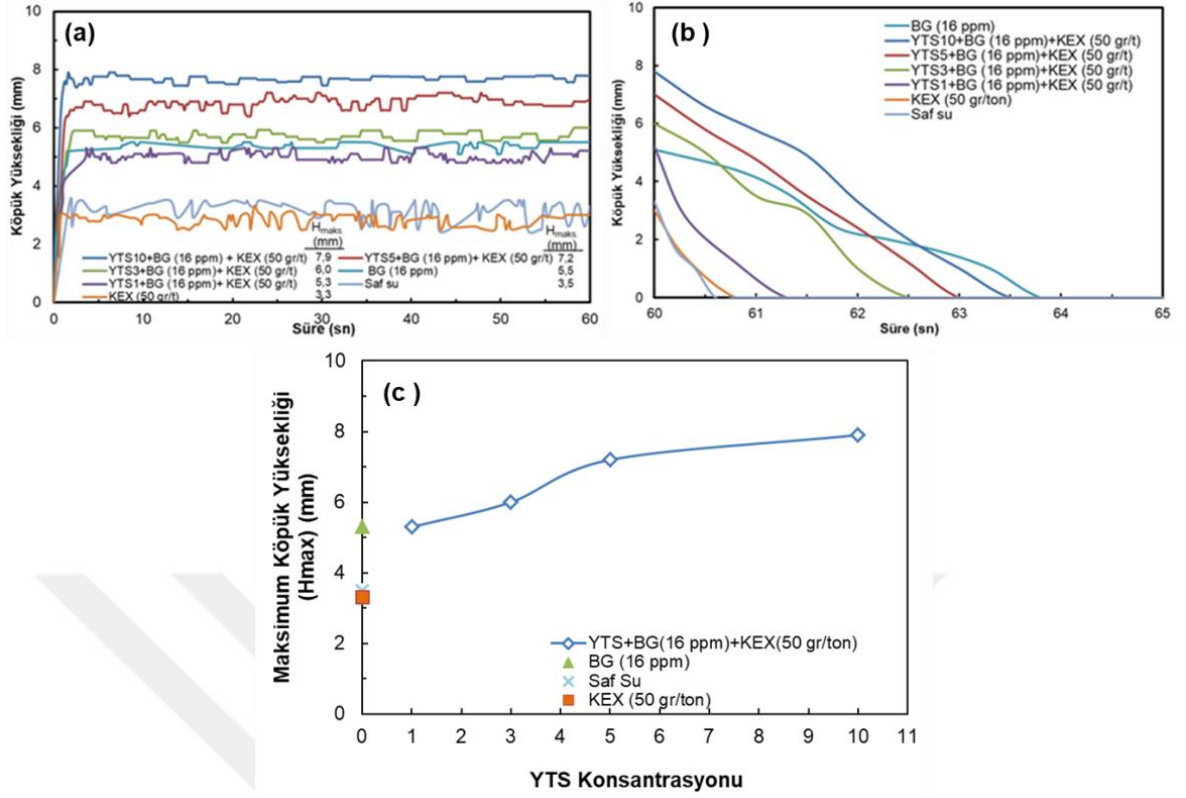
BG (16 ppm) varlığında YTS konsantrasyonunun köpük yüksekliğine etkisi Şekil 4. 35’te verilmiştir.



Şekil 4. 35: BG (16 ppm) varlığında YTS konsantrasyonunun (a) köpük üretim ve (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi ve (c) maksimum köpük yükseklikleri.

BG ilavesiyle köpük yüksekliği yaklaşık 1,2 sn içerisinde platoya ulaşmaktadır. Maksimum köpük yüksekliği YTS1'de 4,9 mm iken, YTS konsantrasyonunun artmasıyla birlikte artmakta ve YTS10'da 8,7 mm'ye ulaşmaktadır (Şekil 4. 35). Şekil 4. 35c'de YTS1, 3 ve 5'te köpük yaklaşık 2 sn içinde bozunurken, YTS10'da köpüğün bozunması yaklaşık 4 sn sürmektedir. BG varlığında iyon ilavesi önce köpük stabilitesini düşürmekte, iyon konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak arttırmaktadır.

Şekil 4. 36'da 50 gr/ton KEX ve 16 ppm BG varlığında YTS konsantrasyonunu köpük üretim ve köpük bozunma aşamalarındaki etkisini göstermektedir.

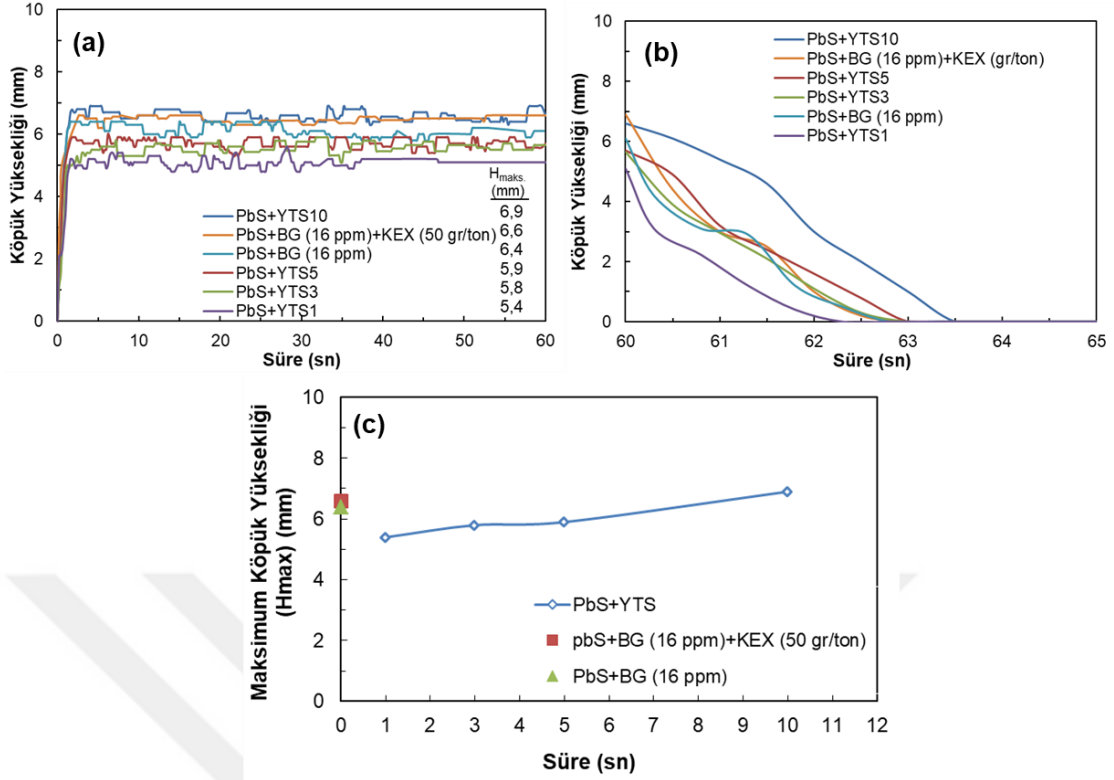


Şekil 4. 36: KEX (50 gr/ton) ve BG (16 ppm) varlığında YTS konsantrasyonunu (a) köpük üretim (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi ve (c) YTS konsantrasyonuna bağlı maksimum köpük yükseklikleri.

Şekil 4. 36a ve Şekil 4. 36c’de görüldüğü gibi saf su varlığında maksimum köpük yüksekliği 3,5 mm iken 50 gr/ton KEX varlığında ise 3,3 mm olmuştur. Bu sonuçlar KEX’in köpük yüksekliğine ciddi bir etkisi olmadığını göstermiştir.

KEX (50 gr/ton) ve BG (16 ppm) varlığında YTS1 kullanıldığında köpük yüksekliği 5,3 mm olurken, YTS konsantrasyonunun artmasıyla birlikte köpük yüksekliği artmakta ve YTS10’da 7,9 mm’ye ulaşmaktadır. Şekil 4. 36c’de görüldüğü gibi köpük YTS1’de 1 sn içinde bozunurken YTS konsantrasyonunun artmasıyla YTS10’da köpüğün bozunması yaklaşık 3,5 sn sürmektedir.

Galen varlığında YTS konsantrasyonunun köpük yüksekliğindeki etkisi Şekil 4.37’de görülmektedir.

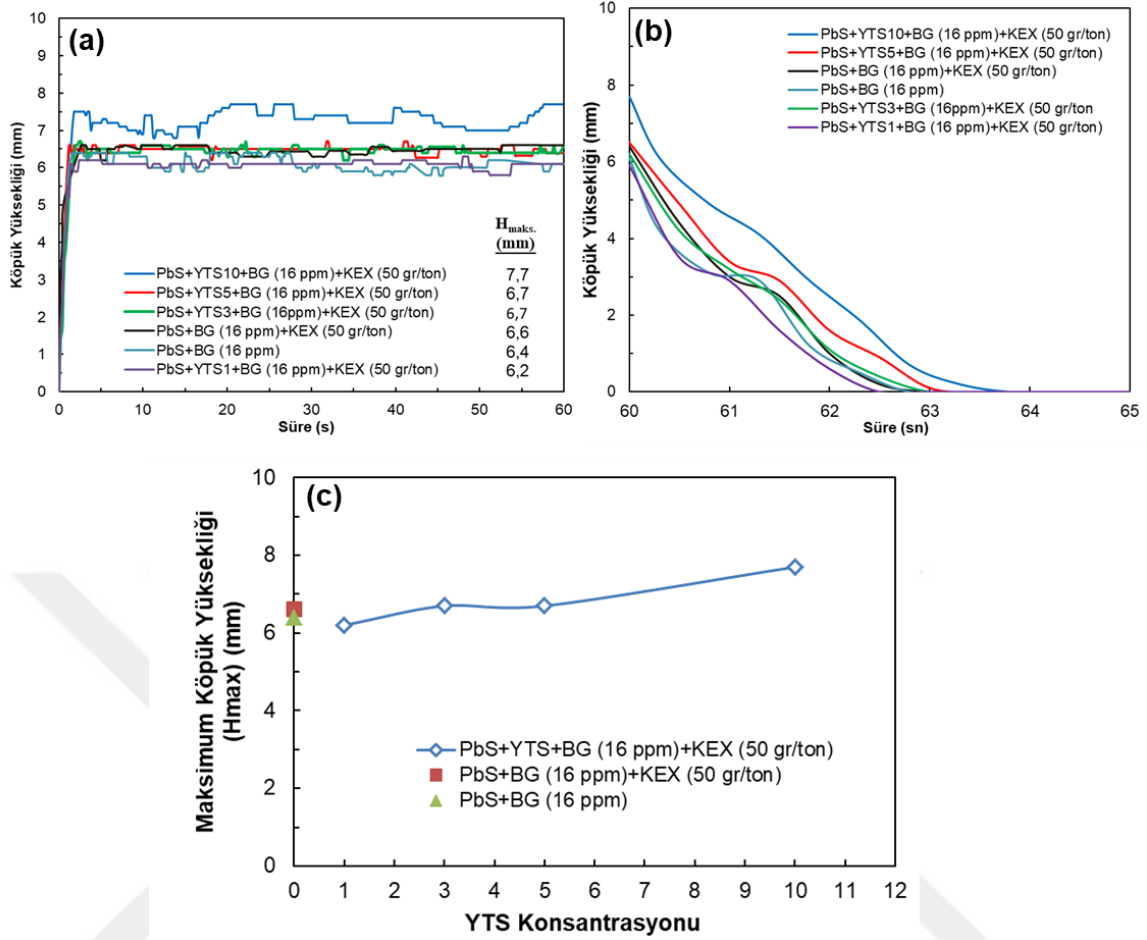


Şekil 4.37: PbS varlığında YTS konsantrasyonunun (a) köpük üretim (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi ve (c) maksimum köpük yükseklikleri.

Şekil 4.37a ve Şekil 4.37c’de görüldüğü gibi YTS konsantrasyonu arttıkça maksimum köpük yüksekliği de artmaktadır. Hatta YTS 10’da BG (16 ppm) varlığından bile yüksek köpük yükseklikleri elde edilebilmektedir. Galen varlığında YTS1’de köpük yüksekliği yaklaşık 1,5 sn içerisinde artarak platoya ulaşmaktadır. Köpük yüksekliği YTS1’de ortalama 5,4 mm iken, YTS konsantrasyonu ile artmakta ve YTS10’da 6,9 mm’ye ulaşmaktadır.

16 ppm BG ve hidrofil galen varlığında 6,4 mm olan maksimum köpük yüksekliği galen taneleri 50 gr/ton KEX ile hidrofob hale getirildiği zaman 6,6 mm’ye çıkmaktadır. Şekil 4.37b’de ise YTS1 varlığında köpük 1,5 sn içinde bozunurken YTS10’da yaklaşık 3,5 sn bozunmaktadır.

Galen ve YTS’li ortama KEX ve BG ilavesi ile elde edilen köpük yükseklikleri Şekil 4. 38’de verilmiştir.



Şekil 4. 38: PbS, BG ve KEX varlığında YTS'nin (a) köpük üretim ve (b) köpük bozunma aşamalarındaki etkisi.

PbS varlığında, BG ve KEX varlığında YTS konsantrasyonunun artmasıyla birlikte köpük yüksekliği artmaktadır (Şekil 4. 38a ve Şekil 4. 38b). YTS1 varlığında H_{maks} 6,2 mm iken iyon konsantrasyon artmasıyla YTS3 ve YTS5'te 6,7 mm çıkmaktadır. YTS10'da ise H_{maks} en yüksek 7,7 mm ulaşmaktadır. Köpük bozunması ise YTS10 varlığında 3,5 sn civarında sürmüştür (Şekil 4. 38c).

Yekeen vd. (2017) yaptığı çalışmada köpük stabilitesini maksimuma çıkaran optimum bir yüzey aktif madde konsantrasyonu olduğunu göstermiştir. Bu optimum konsantrasyon, ortamdaki iyon konsantrasyonuyla birlikte azalma göstermiştir. Yüzey aktif maddenin kritik misel konsantrasyonu (CMC) değerinde oluşmaya başlayan miseller, yüksek molekül ağırlıkları nedeniyle köpükteki kabarcıklar arasındaki sıvı drenajını artırarak köpük stabilitesinde düşmeye neden olabilmektedir. Yüzey aktif maddenin köpürme ve adsorpsiyon özelliklerini kontrol eden ana mekanizma, EÇT iyonlar tarafından bastırılması ve yüzey aktif madde kompleksinin oluşmasıdır. İyonların varlığı, daha kalın lameller oluşmasına neden

olarak CMC'nin altındaki surfaktan konsantrasyonlarında köpük stabilitesinin artmasını sağlamıştır. Köpürtücü ve ksantat, konsantrasyonlarına bağlı olarak köpükteki kabarcıklar arasındaki sıvı filmin yükünü de etkiler. Ksantat konsantrasyonunun artmasıyla yüzey katmanlarındaki yapışma ve dolayısıyla köpüğün stabilitesi azalma göstermektedir (Manev ve Pugh, 1992).

İyonik kuvvetin köpürtücü konsantrasyonun yanı sıra köpük stabilitesini de etkilediği önceki çalışmalardan görülmüştür. İyonik kuvvetin köpüğün viskozitesini arttırdığı, kabarcıklar arasındaki sıvı drenajını yavaşlattığı, kabarcık boyutunu azalttığı, köpüğün stabilitesini ve köpüğün bozunma süresini arttırdığı görülmektedir (Corin vd., 2022; Corin vd., 2017). Bu genellikle değerli mineral kazanım verimini artırır. Bununla birlikte, çok yüksek stabiliteye sahip bir köpük aynı zamanda suyun ve dolayısıyla konsantre içine gang minerallerinin konsantreye taşınımını da arttıracak, ve böylece konsantre tenörünü düşürecektir (Laskowski, vd., 2003; Manono vd., 2013; , Corin vd., 2022).

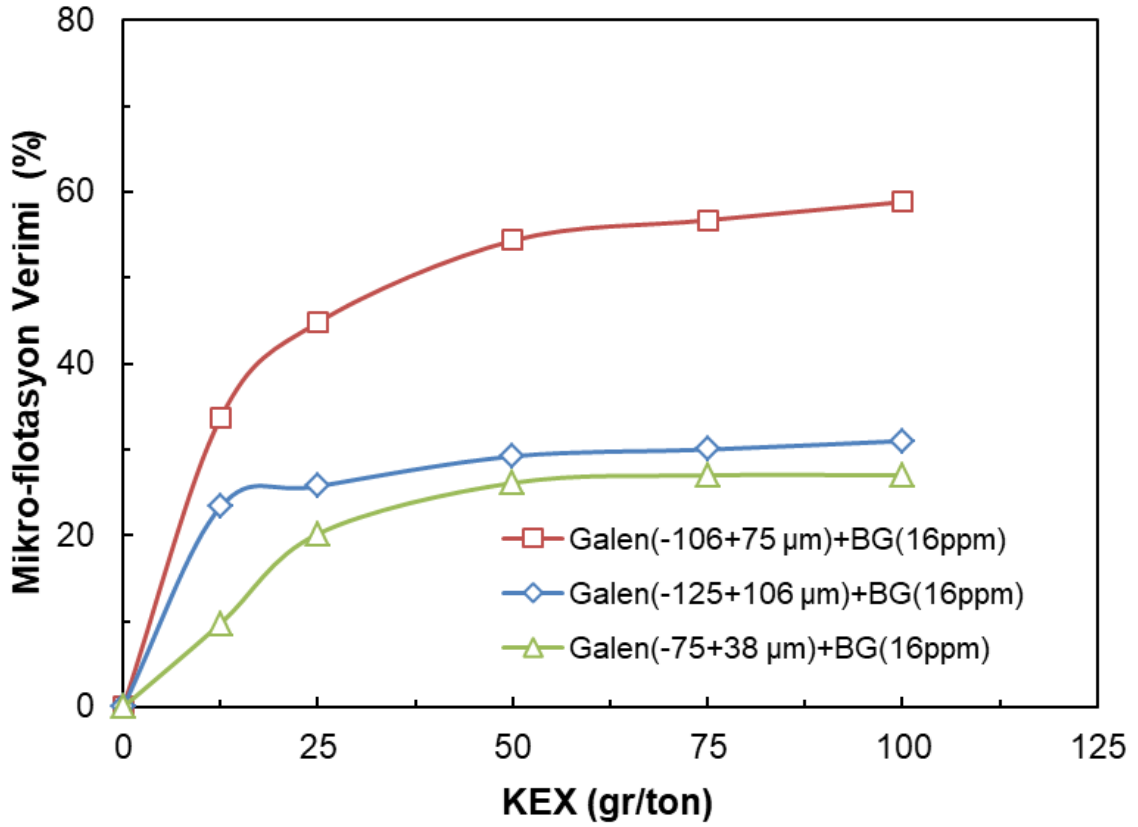
Öztürk vd. (2018) yaptıkları çalışmada SO_4^{-2} , $\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$, Ca^{+2} ve Pb^{+2} iyonlarının bir Cu-Pb-Zn cevherinin flotasyon performansı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Yaptıkları araştırmada, sülfat ve tiyosülfat varlığında köpük stabilitesi arttığını gözlenmiştir. Bu artışı da tiyosülfat iyonları ile sülfür mineral davranışı arasında güçlü bir etkileşimine bağlanmıştır (Öztürk vd., 2018). Farrokhpay ve Zanin (2022) yaptığı çalışmada, çok değerli metal iyonlarının varlığında daha yüksek bir köpük kararlılığı elde etmişlerdir.

Bıçak vd. (2012) yaptıkları çalışmada, çözünmüş iyonların (hem anyonlar hem de katyonlar) Çayeli Bakır İşletmeleri'nden alınan Cu-Zn kompleks sülfürlü cevherinin flotasyon performansına etkileri kesikli flotasyon testleri ile araştırmışlardır. Bu çalışmada, çözünmüş metal iyonları ve sülfid iyonlarının hem köpük stabilitesini hem de yüzey kimyasını etkilediğini ortaya koymuşlardır. Testlerde, köpük stabilitesi çözünmüş iyon konsantrasyonu ile bağlantılı olarak artmıştır (Bıçak vd., 2012).

4.9. MİKRO-FLOTASYON DENEYLERİ

Sallantılı masa ve triyaj yöntemleri ile saflaştırılan galen numuneleri mikro-flotasyon deneylerinde tabi tutulmuştur. Yapılan deneylerde mekanik taşıma farkı (~%30) flotasyon

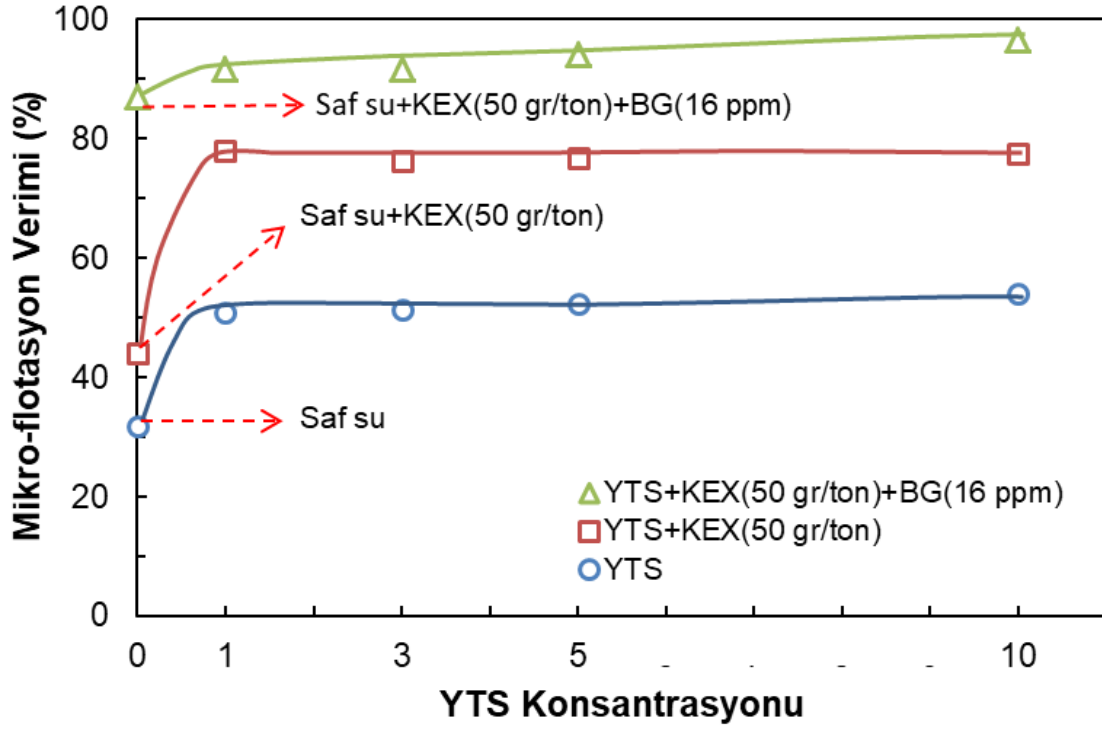
veriminden çıkartılarak elde edilen KEX konsantrasyonuna bağlı flotasyon verim değerleri Şekil 4. 39’da görülmektedir.



Şekil 4. 39: BG (16 ppm) varlığında KEX konsantrasyonunun farklı tane boyutlarında galen mikro-flotasyon verimine etkisi.

Şekil 4. 39’de görüldüğü gibi mekanik taşıma çıkarıldığında (~30) -75+38 µm tane boyutunun verimi %27’dir. Tane boyutu -106+75 µm olduğunda verim %59’a çıkarken, -125+106 µm tane boyutunda verim %31’e düşmüştür. Bu veriler ışığında optimum tane boyutu -106+75 µm olarak belirlenmiş ve sonraki deneylere bu boyut grubu kullanılarak devam edilmiştir.

Optimum konsantrasyonlarda KEX (50 gr/ton) ve BG (16 ppm) yokluğunda ve varlığında YTS konsantrasyonuna bağlı mikro-flotasyon verim değerleri Şekil 4. 40’ta görülmektedir.



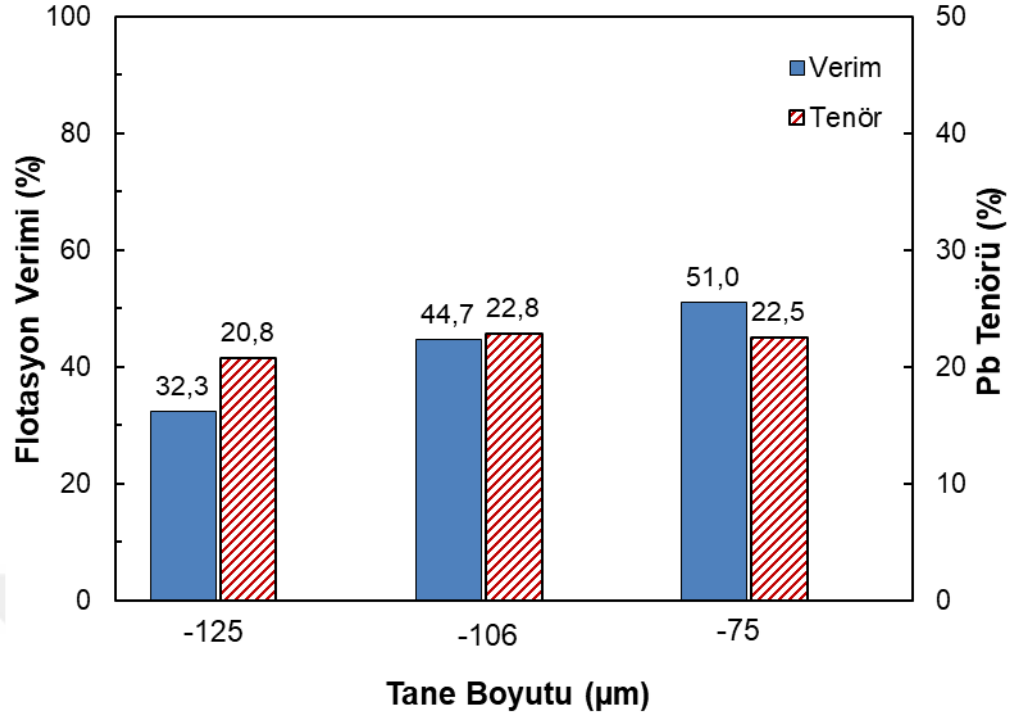
Şekil 4. 40: Optimum konsantrasyonlarda KEX ve BG'nin YTS konsantrasyonuna bağlı olarak mikro-flotasyon verimine etkisi.

Şekil 4. 40'dan görüldüğü gibi kimyasal yokluğunda (saf su) mikro-flotasyon verimi %32 iken YTS varlığında ciddi şekilde artmış ve YTS1 varlığında %54'e ulaşmıştır. Fakat YTS konsantrasyonunun daha fazla artması mikro-flotasyon verimi üzerinde ciddi bir etki yaratmamıştır.

KEX varlığında (50 gr/ton) ortamda iyon yokken mikro-flotasyon verimi %44 olarak gerçekleşmiştir. Verim iyon varlığında kuvvetlice artarak YTS1 varlığında %78'e çıkmış ve platoya ulaşmıştır. Flotasyon sistemine BG'nin de eklenmesiyle iyon yokluğunda verim %87'ye çıkmaktadır. YTS1+KEX+BG varlığında %92'ye çıkan verim, YTS10'da %96 olmuştur. Bu verilerden ortamda iyon varlığının BG yokluğunda dahi stabil kabarcık ürettiği ve böylece flotasyon verimini arttırdığı anlaşılmaktadır.

4.10. KLASİK FLOTASYON DENEYLERİ

Farklı tane boyutunda (-125, -106, -75 μm) galen ile gerçekleştirilen klasik flotasyon deney sonuçları Şekil 4.41'de verilmiştir.

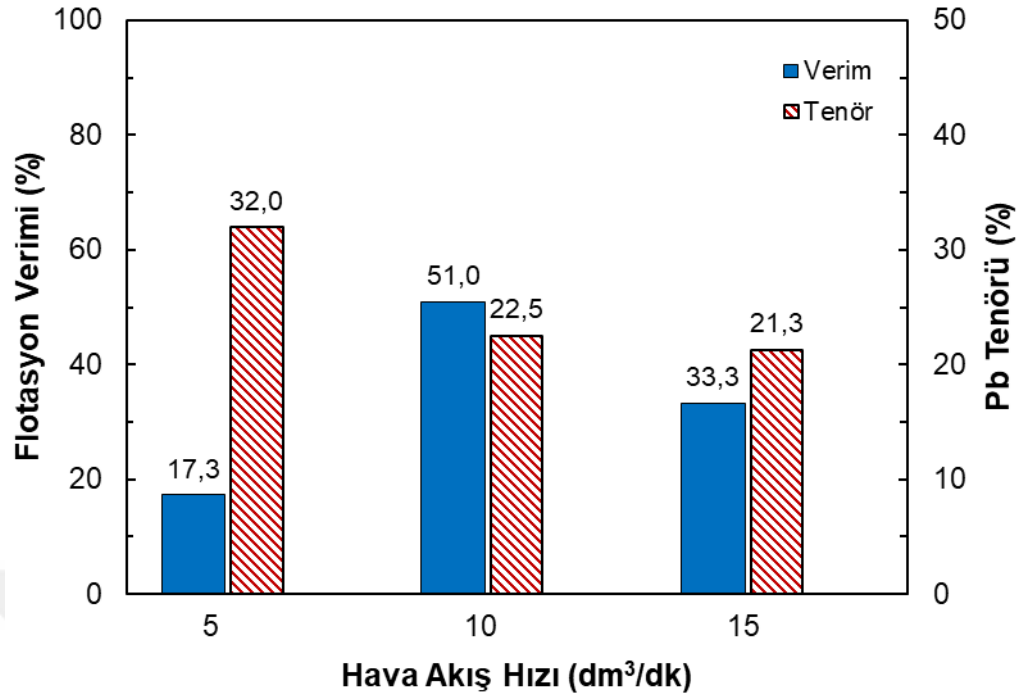


Şekil 4.41: Farklı tane boyutunda (-125, -106, -75 µm) galen ile gerçekleştirilen klasik flotasyon deney sonuçları (16 ppm BG, 40 gr/ton KEX, 1500 gr/ton ZnSO₄, 600 gr/ton FeSO₄, 10 L/dk N₂ akış hızı, Süre: 5 dk).

Şekil 4.41’de görüldüğü gibi -125 µm tane boyutunda %32,3 verim elde edilirken, tane boyutu -106 µm ve -75 µm’a indiğinde sırasıyla verim %44,7 ve 51,0’e yükselmiştir. Bu verim artışının nedeni tane boyutu küçüldükçe serbestleşme derecesinde meydana gelen artış ile açıklanabilir. Tenör ise -125 µm tane boyutunda %20,8 iken -106 µm tane boyutunda %22,8, -75 µm tane boyutunda ise %22,5 olmuştur. Sonraki deneyler en yüksek verimin ve tenörün elde edildiği -75 µm tane boyutunda gerçekleştirilmiştir.

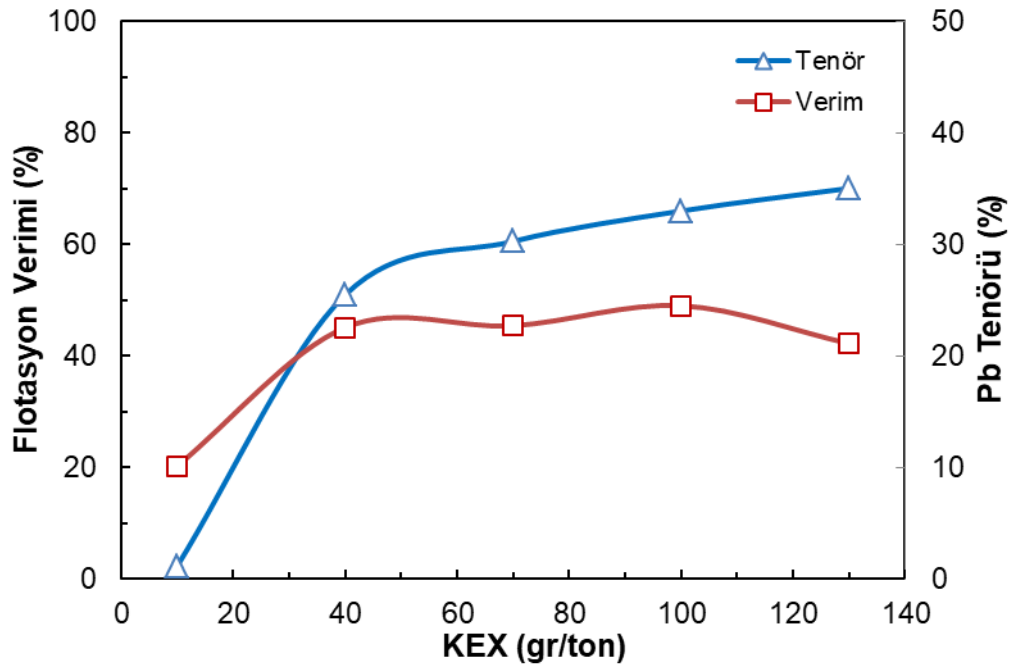
Farklı hava akış hızlarında (5, 10, 15 dm³/dk) gerçekleştirilen galen klasik flotasyon deney sonuçları Şekil 4. 42’de verilmiştir.

5, 10 ve 15 dm³/dk hava akış hızlarında flotasyon verimi sırasıyla %17,3, %51,0 ve %33,3 olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4. 42). Tenörleri ise %32,0, %23,1, %21,3 olarak bulunmuştur. Sonraki deneyler en yüksek verimin elde edildiği 10 dm³/dk hava akış hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. 42: Farklı hava akış hızlarında (5, 10, 15 dm³/dk) galen ile gerçekleştirilen klasik flotasyon deney sonuçları (16 ppm BG, 40 gr/ton KEX, 1500 gr/ton ZnSO₄, 600 gr/ton FeSO₄, -75 µm tane boyutu, Süre: 5 dk).

Farklı KEX konsantrasyonlarında (10, 40, 70, 100, 130 gr/ton) galen ile gerçekleştirilen klasik flotasyon deney sonuçları Şekil 4. 43’de verilmiştir.

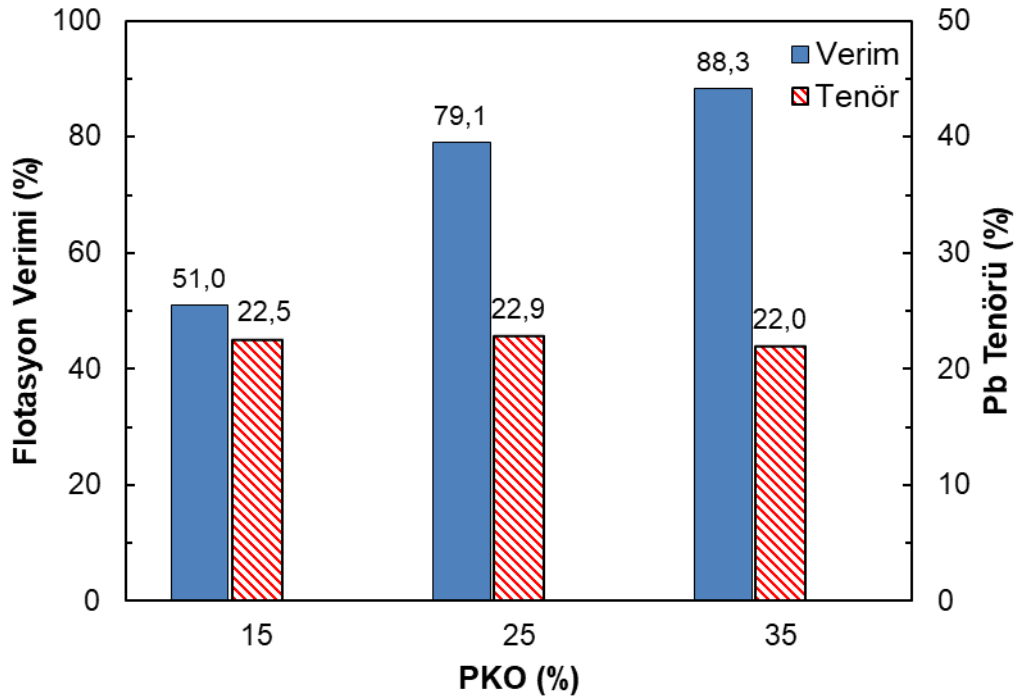


Şekil 4. 43: Klasik flotasyonda KEX dozajının etkisi (16 ppm BG, 1500 gr/ton ZnSO₄, 600 gr/ton FeSO₄, -75 µm tane boyutu, Süre: 5 dk).

Şekil 4. 43’de görüldüğü gibi KEX konsantrasyonunun artmasıyla galenin hidrofobisitesindeki artışa bağlı olarak flotasyon verimi artmaktadır. 10 gr/ton KEX varlığında %2,3 olan verim 70 gr/ton KEX’te %60,1’de platoya ulaşmıştır.

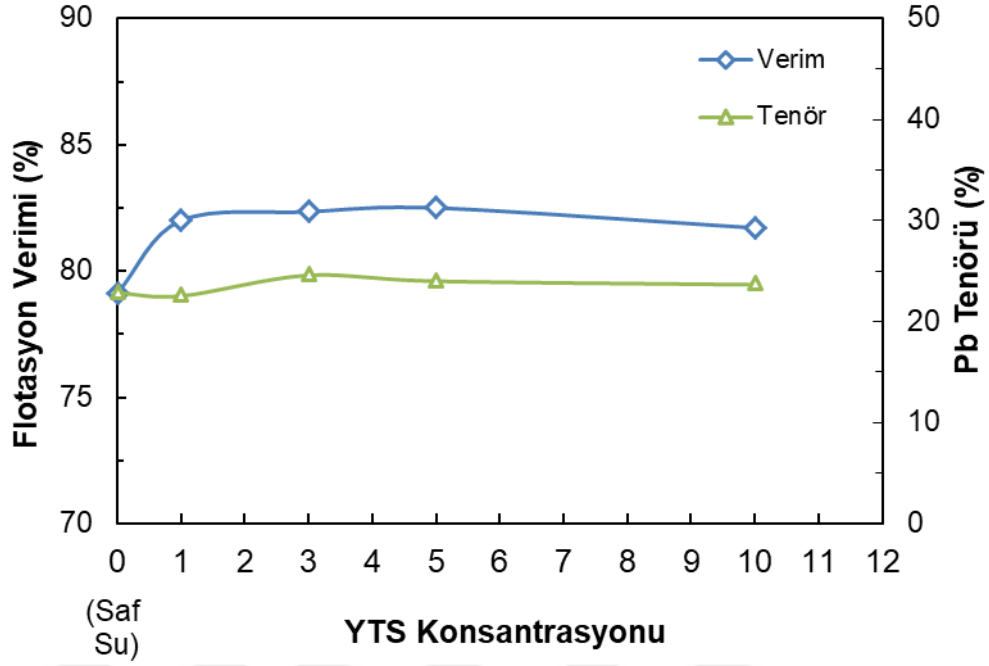
Flotasyon verimine pülpte katı oranının (PKO) etkisinin belirlemek üzere %15, %25 ve %35 PKO’larda flotasyon deneyleri yapılmıştır. Artan PKO’ya bağlı olarak yeterli KEX konsantrasyonunu sağlamak üzere deneyler 100 gr/ton KEX konsantrasyonunda gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının verildiği Şekil 4.44’te görüldüğü üzere PKO arttıkça flotasyon verimi artmış tenörde ise ciddi bir değişim görülmemiştir.

YTS konsantrasyonunun flotasyona etkisinin araştırıldığı deneyler kabul edilebilir (%79,1) verim ve en yüksek tenör (%22,9) değerinin elde edildiği %25 PKO’da gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.44: Klasik flotasyonunda PKO’nın etkisi (KEX 100 gr/ton, 16 ppm BG, 1500 gr/ton ZnSO₄, 600 gr/ton FeSO₄, -75 µm tane boyutu, Süre: 5 dk).

Elde edilen veriler ışığında YTS’li deneyler gerçekleştirilmiştir. YTS konsantrasyonunun flotasyona etkisi Şekil 4. 45’te görülmektedir.



Şekil 4. 45: Klasik flotasyonunda YTS konsantrasyonunun etkisi (KEX 100 gr/ton, 16 ppm BG, 1500 gr/ton $ZnSO_4$, 600 gr/ton $FeSO_4$, -75 μm tane boyutu, Süre: 5 dk).

Şekil 4. 45'te görüldüğü gibi saf su varlığında %79,1 olan flotasyon verimi YTS1 varlığında artarak %82,0'ye çıkmıştır. Daha yüksek konsantrasyonlarda ise verim sabit kalmıştır. Tenörde ise önemli bir değişiklik gözlenmemiştir.

Bıçak vd. (2018) iyonlarının kompleks bir Cu-Zn cevherinin flotasyon performansı üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmalarında $S_2O_3^{2-}$, Ca^{+2} iyonlarının köpük stabilitesini arttırdığını bildirmişlerdir. Bu sonuçlar bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla uyumludur. Bununla beraber yazarlar Cu^{+2} iyonunun köpük stabilitesine etki etmediğine de değinmişlerdir. Aynı çalışmada flotasyondaki verim düşüşünü bazı iyonların bastırıcı etkisine bağlamışlardır. Olumsuz bir etki gözükmemesine rağmen mikro-flotasyonda görülen olumlu etkinin klasik flotasyonda aynı seviyede gerçekleşmemesinin, iyonların klasik flotasyonda kullanılan bastırıcı reaktifler ile etkileşiminden kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir.

Başka bir yorum olarak klasik flotasyonda alt boyut kesilmediği için gang minerallerinin küçük kabarcıkları ile taşınmasına da bağlanabilir.

5. TARTIŞMA

Güngören vd. (2019)'nin yaptığı araştırmada yüzey gerilimi ölçüm sonuçlarının iyonik kuvvet ile ilişkili olduğunu açıklamışlardır. Bu çalışmada da yüzey geriliminin konsantrasyon ile azalması çözeltinin iyonik kuvveti ile ilişkilidir. Çözünmüş iyonlar varlığında yüzey geriliminin konsantrasyona bağlı olarak arttığı daha önce Özdemir (2006) ve Özdemir (2009) tarafından da gösterilmiştir.

Ikumapayi vd. (2012) Ca^{+2} ve SO_4^{-2} iyonlarının galen flotasyonu üzerine etkisi araştırdıkları çalışmalarında flotasyon veriminde iyon konsantrasyonuna bağlı olarak bir dalgalanma elde etmişlerdir. Ayrıca Ca^{+2} iyonu varlığında galen mineralinin negatif olan zeta potansiyeli mutlak değerce azalmaktadır. Bu durum bu tez çalışmasında elde edilen zeta potansiyel verileri ile uyumludur.

October vd. (2021) de iyon konsantrasyonu ile meydana gelen iyonik kuvvetteki artışın minerallerin zeta potansiyelini değiştirdiğini ECT'yi bastırdığını ve tane aglomerasyonuna neden olduğu belirtmiş ve kabarcık-tane yapışmasında meydana gelen artışı bu duruma bağlamışlardır.

Yoon ve Yordan (1991) KCl konsantrasyonu ile kuvars-dodesilamin hidroklorür (DAH) sisteminde kabarcık-tane yapışma süresini düşürdüğünü dolayısıyla yüzebilirliğin arttığını bildirmiştir. Bu durumu çözünmüş iyonlar varlığında elektriksel çift tabakanın (ECT) bastırılmasına ve dolayısıyla kabarcık ve tane arasındaki sıvı filminin daha hızlı bozunmasına bağlamışlardır. Galen minerali varlığında da benzer bir durum gerçekleşmektedir.

Bıçak vd. (2018) iyonlarının kompleks bir Cu-Zn cevherinin flotasyon performansı üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmalarında $\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$, Ca^{+2} iyonlarının köpük stabilitesini arttırdığını bildirmişlerdir. Bu sonuçlar bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla uyumludur. Yazarlar Cu^{+2} iyonunun köpük stabilitesine etki etmediğine de değinmişlerdir. Aynı çalışmada flotasyondaki verim düşüşünü iyonların bastırıcı etkisine bağlamışlardır. Bu çalışmada olumsuz bir etki gözükmemesine rağmen mikro-flotasyonda görülen olumlu etkinin klasik flotasyonda azalması iyonların klasik flotasyonda kullanılan bastırıcı reaktifler ile etkileşiminden kaynaklanıyor olabilir.

Öztürk vd. (2018) yaptıkları çalışmada SO_4^{-2} , $\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$, Ca^{+2} ve Pb^{+2} iyonlarının bir Cu-Pb-Zn cevherinin flotasyon performansı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Yaptıkları araştırmada,

sülfat ve tiyosülfat varlığında köpük stabilitesi arttığını gözlenmiştir. Bu artışı da tiyosülfat iyonları ile sülfür mineral davranışı arasında güçlü bir etkileşimine bağlanmıştır (Öztürk vd., 2018). Farrokhpay ve Zanin (2022) yaptığı çalışmada, çok değerli metal iyonlarının varlığında daha yüksek bir köpük kararlılığı elde etmişlerdir.

Bıçak vd. (2012) yaptıkları çalışmada, çözünmüş iyonların (hem anyonlar hem de katyonlar) Çayeli Bakır İşletmeleri'nden alınan Cu-Zn kompleks sülfürlü cevherinin flotasyon performansına etkileri batch flotasyon testleri ile araştırmışlardır. Bu çalışmada, çoğunlukla SO_4^{-2} ve $\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$ formundaki çözünmüş metal iyonları ve sülfid iyonlarının hem köpük stabilitesini hem de yüzey kimyasını etkilediğini ortaya koymuşlardır. Testlerde, köpük stabilitesi çözünmüş iyon konsantrasyonu ile bağlantılı olarak artmıştır (Bıçak vd., 2012).

Pan vd.'nin (2022a) yaptığı çalışma 1 ppm potasyum amil ksantat (KAX)'ın sadece metil izobütil karbinol (MIBC) kullanılan deneyler ile karşılaştırıldığında kabarcık birleşme sürecinde kabarcıkların ömrünü ve köpüğün stabilitesini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Ayrıca Pan vd. (2022b)'ye göre NaCl varlığı, hava/su arayüzünde köpürtücü adsorpsiyonunu arttırırken, KAX'ın önemli bir etkisi bulunmamaktadır.

Kirjavainen vd. (2002) yaptıkları çalışmada kalsiyum ve tiyosülfat iyonlarının Ni-Cu cevherinin flotasyonu üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Kalsiyum ve tiyosülfat iyonları, çelik değirmende öğütülen bir Ni-Cu cevherinin doğal pH'daki flotasyonunu iyileştirmiştir. Değirmenden gelen demirin galvanik etkisi altında kalsiyum özellikle nikel ve bakır sülfidleri aktive etmiştir. UV/Vis spektroskopi ölçümleri, kalsiyum iyonlarının etil ksantatın sülfidler üzerindeki adsorpsiyonunu arttırdığını göstermiştir. Tiyosülfat iyonlarının ise, hidrofilik bileşiklerin sülfür partikülleri üzerindeki etkisini azalttığı ve bu şekilde flotasyonlarını iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. (Kirjavainen vd, 2002).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında galen mineralinin flotasyonunda yeniden kullanılan tesis sularında sıklıkla bulunan iyonların (Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Pb^{+2} , Zn^{+2} , Cu^{+2} , Fe^{+3} , SO_4^{-2} , Cl^- , CO_3^{-2} ve NO_3^-) flotasyon verim ve seçiciliğine etkisi farklı iyon konsantrasyonlarında hazırlanan yapay tesis suları (YTS) kullanılarak araştırılmıştır. YTS konsantrasyonunun kabarcık-kabarcık ve kabarcık-mineral etkileşimlerine etkisi dinamik yüzey gerilimi, kabarcık birleşme süresi, kabarcık boyut dağılımı dinamik köpük stabilitesi, temas açısı, kabarcık-tane yapışma süresi, mikro-flotasyon ve klasik flotasyon deneyleri ortaya konmuştur.

Tez kapsamında elde edilen yüzey gerilimi sonuçları BG'nin konsantrasyona bağlı olarak suyun yüzey gerilimini düşürdüğünü ancak iyonların konsantrasyonuna bağlı olarak suyun yüzey gerilimi artırdığını göstermiştir. Yüzey gerilimi YTS3'te platoya ulaşmıştır. Yapılan dinamik yüzey gerilimi ölçümleri gerek BG gerekse YTS'nin 1 sn'nin altındaki bir sürede etki göstererek sonrasında yüzey gerilimini değiştirmedikini ortaya koymuştur.

Kabarcık birleşme süresi ölçüm sonuçları BG'nin kabarcık birleşmesini 10-20 ppm arasında tamamen engellediğini göstermiştir. YTS varlığında ise BG yokluğunda dahi kabarcık birleşmesi neredeyse tamamen engellenebilmektedir.

Kabarcık boyut dağılımı ölçümleri ile YTS konsantrasyonu arttıkça daha küçük ve dar bir boyut aralığında kabarcıklar elde edildiği saptanmıştır. BG'nin CCC değeri (%50 kabarcık birleşmesi için) 16 ppm olarak bulunmuştur. BG yokluğunda YTS kullanıldığında ise BG ile elde edilen kabarcık boyutuna yakın boyutta kabarcıklar elde edilebildiği belirlenmiştir.

Köpük stabilitesi ölçüm sonuçları BG konsantrasyonu arttıkça daha kalın ve daha dayanıklı bir köpük tabakası elde edildiğini göstermiştir. Aynı durum YTS konsantrasyonu için de geçerlidir. YTS10 varlığında 16 ppm BG'ye kıyasla daha kalın ve dayanıklı bir köpük tabakası oluşmaktadır. YTS ve BG beraber kullanıldığında ise köpük stabilitesi daha da artmaktadır. Diğer taraftan KEX'in köpük stabilitesi üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Köpük fazında galen varlığı ise köpük stabilitesine olumlu yönde etki etmekte ve bu etki galenin hidrofobisitesi ile artmaktadır.

Galen mineralinin temas açısı KEX konsantrasyonuna bağlı olarak tek tabaka adsorpsiyon sınırına kadar artmakta, daha yüksek konsantrasyonlarda çift tabaka adsorpsiyonu neticesinde bir miktar düşmektedir. Temas açısı ölçüm süresi arttıkça mineral yüzeyindeki damlacıktan sıvı buharlaşması ve sıvının mineral yüzeyinde yayılması temas açısında bir düşüşe neden

olmuştur. YTS varlığı KEX yokluğunda dahi temas açısını artırmaktadır. Bunun nedeni iyon varlığının galenin negatif olan yüzey yükünü sıfıra yaklaştırması olabilir. Ancak iyon konsantrasyonu ile temas açısı bir miktar düşmektedir. Bunun nedeninin yüksek iyon konsantrasyonlarında galen yüzey yükünün pozitif dönmeye ve yük değerinin konsantrasyon ile artması olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde KEX varlığında da yüksek konsantrasyonlarda temas açısında bir düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeninin ortamda bulunan iyonların galenin yüzey yükünü değiştirmesi sebebiyle KEX adsorpsiyonunu engellemesi ve/veya yüzeyde adsorbe olmuş KEX moleküllerinin yüzeyden ayrılmasına sebep olması olduğu düşünülmektedir.

Kabarcık-tane yapışma süresi deneylerinde KEX konsantrasyonunun kabarcık-tane yapışma yüzdesini arttırdığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni KEX'in galenin hidrofobitesini arttırmasıdır. Benzer olarak YTS konsantrasyonuna bağlı olarak KEX varlığında kabarcık-tane yapışma olasılığını arttırmakta kabarcık-tane yapışma süresini düşürmektedir. Bu sonuçlardan ortamdaki iyon varlığının galen yüzeyine KEX adsorpsiyonuna olumlu etkisinin olduğu sonucuna varılabilir.

Mikro-flotasyon çalışmalarında saf suya kıyasla YTS1 varlığında mikro-flotasyon veriminde ciddi bir artış gerçekleşmiştir. Deneysel sonuçlardan ortamda iyon varlığının BG yokluğunda dahi stabil kabarcık ürettiği ve böylece flotasyon verimini arttırdığı anlaşılmaktadır. Ancak klasik flotasyonda bu etki azalmaktadır.

YTS varlığında yapılan deneysel çalışmaların sonuçları toplu olarak değerlendirildiğinde, YTS varlığının flotasyondaki su fazındaki yüzey gerilimini nispi olarak arttırmasına rağmen, flotasyon sisteminde oluşan hava kabarcıklarının ortalama çap boyutunu ve kabarcık boyut dağılımının azaltması, galen varlığında ve yokluğunda köpük stabilitesini geliştirmesi ve flotasyon mekanizmasının mikro düzeyde dinamik bir simülasyonu niteliğinde olan kabarcık-tane ve kabarcık-kabarcık yapışma olasılığını sırası ile arttırması ve azaltması nedenleri ile tesis suyu içerisinde yaygın olarak bulunan iyonların galen flotasyonunu olumlu olarak etkilediği bu tez çalışması sonuçları ile açıkça ortaya konularak desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, N., Jameson, G.J., 1985, The effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles, *International journal of mineral processing*, 14 (3), 195-215.
- Ang, Z., Bournival, G., Ata, S., 2013, Influence of frothers on the detachment of galena particles from bubbles, *International journal of mineral processing*, 121, 59-64.
- Ata, S., Jameson, G. J., 2005, The formation of bubble clusters in flotation cells, *International journal of mineral processing*, 76 (1-2), 123-139.
- Ata, S., 2008, Coalescence of bubbles covered by particles, *Langmuir*, 24 (12), 6085-6091.
- Ata, S., 2009, The detachment of particles from coalescing bubble pairs, *Journal of colloid interface science*, 338 (2), 558-565.
- Barbian, N., Hadler, K., Ventura-Medina, E., Cilliers, J.J., 2005, The froth stability column: linking froth stability and flotation performance, *Minerals Engineering*, 18 (3), 317-324.
- Batjargal, K., Güven, O., Özdemir, O., Karakashev, S. I., Grozev, N. A., Boylu, F., Çelik, M. S., 2021, Adsorption kinetics of various frothers on rising bubbles of different sizes under flotation conditions, *Minerals*, 11 (304), 1-16.
- Bhattacharya, S., Dey, S., 2008, Evaluation of frother performance in coal flotation: A critical review of existing methodologies, *Mineral processing and extractive metallurgy review*, 29 (4), 275-298.
- Bıçak, O., Öztürk, Y., Özdemir, E., Ekmekçi, Z., 2018, Modelling effects of dissolved ions in process water on flotation performance, *Minerals engineering*, 128, 84-91.
- Bıçak, O., Ekmekçi, Z., Can, M., Öztürk, Y., 2012, The effect of water chemistry on froth stability and surface chemistry of the flotation of a Cu-Zn sulfide ore, *International journal of mineral processing*, 102-103 32-37.
- Bournival, G., Ata, S., Karakashev, S. I., Jameson, G. J., 2014, An investigation of bubble coalescence and post-rupture oscillation in non-ionic surfactant solutions using high-speed cinematography, *Colloid interface*, 414 50-58.
- Bournival, G., Pugh, R.J., Ata, S., 2012, Examination of NaCl and MIBC as bubble coalescence inhibitor in relation to froth flotation, *Minerals engineering*, 25 (1), 47-53.
- Bulut, G., Yenial, U., 2016, Effects of major ions in recycled water on sulfide minerals flotation. *Mining, metallurgy & exploration*, 33, 137-143.
- Castro, S., Miranda, C., Toledo, P., Laskowski, J. S., 2013, Effect of frothers on bubble coalescence and foaming in electrolyte solutions and seawater, *International journal of mineral processing*, 124, 8-14.
- Chau, T.T., Bruckard, W.J., Koh, P.T.L., Nguyen, A.V., 2009, A review of factors that affect contact angle and implications for flotation practice, *Advances in colloid and interface science*, 150 (2), 106-115.
- Çilek, E.C., 2006, *Mineral Flotasyonu*, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Isparta.

- Çelik, G., 2023, *Farklı gaz fazı bileşimlerinin kompleks metalik cevherlerin flotasyonu üzerindeki etkilerinin araştırılması*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul.
- Chau, T.T., Bruckard, W.J., Koh, P. T. L., Nguyen, A.V., 2009, A review of factors that affect contact angle and implications for flotation practice.” *Advances in colloid and interface science* 150 (2), 106-15.
- Christenson, H. K., Yaminsky, V.V., 1995, Solute effects on bubble coalescence, *Journal of physical chemistry*, 99, 1420-1420.
- Cho, Y.S., Laskowski, J.S., 2002a, Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability, *International journal of mineral processing*, 64, 69-80.
- Cho, Y.S., Laskowski, J.S., 2002b, Bubble coalescence and its effect on dynamic foam stability, *The Canadian journal of chemical engineering*, 80, 299–305.
- Craig, V.S.J., 2004, Bubble coalescence and specific-ion effects, *Current opinion in colloid and interface science*, 9 (1-2), 178-184.
- Craig, V.S.J., Ninham, B.W., Pashley, R.M., 1993, The effect of electrolytes on bubble coalescence in water, *Journal of physical chemistry*, 10192-10197.
- Comley, B.A., Harris, P.J., Bradshaw, D.J., Harris, M.C., 2002, Frother characterisation using dynamic surface tension measurements, *International journal of mineral processing*, 81–100 (64), 81-100.
- Corin, K.C., Tetlow, S., Manono, M.S., 2022, Considering the action of frothers under degrading water quality, *Minerals engineering*, 181, 107546.
- Corin, K.C., Reddy, A., Miye, L., Wiese, J.G., Harris, P.J., 2011, The effect of ionic strength of plant water on valuable mineral and gangue recovery in a platinum bearing ore from the Merensky reef, *Minerals engineering*, 24, 131–137.
- Corona-Arroyo, M. A., López-Valdivieso, A., Laskowski, J. S., Encinas-Oropesa, A., 2015, Effect of frothers and dodecylamine on bubble size and gas holdup in a downflow column, *Minerals engineering*, 81, 109–115.
- Di Feo, A., Mortazavi, S., Langley, S., Morin, L., Prabhakar, G. Demers, A., Bedard, L., Volchek, K., 2020, The effects of water recycling on flotation at a north american concentrator—Part 1. *Journal of minerals and materials characterization and engineering*, 8, 240-276.
- Drelich, J., 1997, The effect of drop (Bubble) size on contact angle at solid surfaces, *The Journal of adhesion*, 63 (1-3), 31-51.
- Dzingai, M., Manono, M., Corin, K., 2020, Simulating the effect of water recirculation on Flotation through ion-spiking: Effect of Ca^{2+} and Mg^{2+} , *Minerals*. 10 (11), 1033.
- Farrokhpay, S., 2011, The significance of froth stability in mineral flotation--a review, *Advances in colloid and interface science*, 166 (1-2), 1-7.
- Farrokhpay, S., Zanin, M., 2012, An investigation into the effect of water quality on froth stability, *Advanced Powder Technology*, 23 (4), 493-497.

- Foulk, C.W., Miller, J. N., 1931, Experimental evidence in support of the balanced-layer theory of liquid film formation, *Industrial engineering and chemistry*, 23 (11), 1283-1288.
- Frear, G.L., Johnston, J., 1929, The solubility of calcium carbonate (calcite) in certain aqueous solutions at 25. *Journal of the American chemical society*, 51 (7), 2082-2093.
- Gupta, A., Yan, D.S., 2006, Mineral Processing Design and Operation, *Chapter 16-Flotation*, 555-603.
- Güngören, C., 2019, An investigation of air/water interface in mixed aqueous solutions of KCl, NaCl, and DAH, *Physicochemical problems of mineral processing*, 55 (5), 1259-1270.
- Güngören, C., Dunder, E., Kesikbaş, A., Özkan, S.G., Özdemir, O., 2018, Effect of measurement method on determining of hydrophobicity of minerals, *1st international symposium on graduate research in science focus on entrepreneurship and innovation (ISGRS)*, 210.
- Güngören, C., Islek, E., Baktarhan, Y., Kurşun Ünver, I., Özdemir, O., 2018a, A novel technique to investigate the bubble coalescence in the presence of surfactant (MIBC) and electrolytes (NaCl and CaCl₂), *Physicochemical problems of mineral processing*, 54 (4), 1215-1222.
- Güngören, C., Islek, E., Baktarhan, Y., Kurşun Ünver, I., Özdemir, O., 2018b, An investigation of bubble coalescence using a dynamic method, *16th international mineral processing symposium (IMPS)*, 241-245.
- Güngören, C., Muse, Mohamed, S., Terzi, M., Eskibalci, M.F., Kurşun Ünver, I., Özdemir, O., 2023, Synergistic effect of frequently found ions in the flotation of Pb-Zn sulfide ores on Air/Water Interface, *Minerals*, 13, 1236.
- Güven, O., Batjargal, K., Özdemir, O., Karakashev, S. I., Grozev, N. A., Boylu, F., Çelik, M. S., 2020, Experimental procedure for the determination of the critical coalescence concentration (CCC) of simple frothers, *Minerals*, 10 (617), 1-12.
- Hancer, M., Celik, M.S., Miller, J. D. 2001, The significance of interfacial water structure in soluble salt flotation systems, *Jornal of colloid interface science*, 235 (1), 150-161.
- Hervo-Hansen, S., Heyda, J., Lund, M., Matubayasi, N., 2022, Anion-cation contrast of small molecule solvation in salt solutions, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 24, 3238–3249.
- Hofmeister, F., 1888, Zur Lehre von der Wirkung der Salze, *Naunyn-schmiedebergs archiv für pharmakologie*, 24, 247–260.
- Horn, R.G., Del Castillo, L.A., Ohnishi, S., 2011, Coalescence map for bubbles in surfactant-free aqueous electrolyte solutions, *Advances in colloid and interface science*, 168 (1-2), 85-92.
- Ikumapayi, F., Makitalo, M., Johansson, B., Rao, K.H., 2012, Recycling of process water in sulphide flotation: Effect of calcium and sulphate ions on flotation of galena, *Minerals engineering*, 39, 77-88.
- King, R.P., 2001, Flotation, Modeling and simulation of mineral processing systems. Butterworth-Heinemann.

- Kowalczyk, P.B., Drzymala, J., 2016, Physical meaning of the Sauter mean diameter of spherical particulate matter, *Particulate science and technology*, 34 (6), 645-647.
- Kowalczyk, P.B., Zaleska, E., Danczak, O., 2015, Flotation of carbonaceous copper shale-quartz mixture with poly (ethylene glycol) alkyl ethers. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 25, 314-318.
- Kurniawan, A.U., Özdemir, O., Nguyen, A.V., Ofori, P., Firth, B., 2011, Flotation of coal particles in $MgCl_2$, $NaCl$, and $NaClO_3$ solutions in the absence and presence of Dowfroth 250, *International journal of mineral processing*, 98 (3-4), 137-144.
- Levay, G., Schumann, R., 2006, A systematic approach to water quality management in the minerals processing industry, *Water in mining conference, Brisbane*, 277-287.
- Laskowski, J.S., Cho, Y.S., Ding, K., 2003, Effect of frothers on bubble size and foam stability in potash ore flotation systems, *The Canadian journal of chemical engineering*, 81, 63-69.
- Liu, W., Moran, C.J. ve Vink, S., 2013, A review of the effect of water quality on flotation, *Minerals engineering*, 53, 91-100.
- Manev, E.D., Pugh, R.J., 1992, Drainage and equilibrium thickness of aqueous films containing nonionic frothers and xanthate flotation collector, *Journal of colloid interface*, 151, 505-516.
- Manono, M., Corin, K., 2022, Considering specific ion effects on froth stability in sulfidic copper-pgm ore flotation, *Minerals*, 12, 321.
- Manono, M.S., Corin, K.C., Wiese, J.G., 2013, The effect of ionic strength of plant water on foam stability: A 2-phase flotation study, *Mineral engineering*, 40, 42-47.
- Marcus, Y., 2016, Specific ion effects on the surface tension and surface potential of aqueous electrolytes, *Current opinion in colloid and interface science*, 23, 94-99.
- Marucci, G., Nicodemo, L., 1967, Coalescence of gas bubbles in aqueous solutions of inorganic electrolytes, *Chemical engineering*, 22 (9), 1257-1265.
- Miller, D.J., Lisy, J.M., 2008, Hydrated alkali-metal cations: infrared spectroscopy and ab Initio Calculations of $M^+(H_2O)_{x=2-5}$ Ar cluster ions for $M = Li, Na, K, \text{ and } Cs$. *Journal of the American chemical society*, 130, 15381-15392.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA-1), 2021, *Kurşun*, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/kursun> [Ziyaret Tarihi: 03.11.2023].
- Muzenda, E., 2010, An investigation into the effect of water quality on flotation performance. *International journal of chemical, molecular, nuclear, materials and metallurgical engineering*, 4, 562-566.
- October, L., Corin, K., Schreithofer, N., Manono, M., Wiese, J., 2019, Water quality effects on bubble-particle attachment of pyrrhotite, *Minerals engineering*, 131, 230-236.
- October, L.L., Corin, K.C., Manono, M. S., Schreithofer, N., Wiese, J. G., 2020, A fundamental study considering specific ion effects on the attachment of sulfide minerals to air bubbles, *Minerals engineering*, 151, 1-6.
- Orvalho, S., Ruzicka, M. C., Olivieri, G., Marzocchella, A., 2015, Bubble coalescence: Effect of bubble approach velocity and liquid viscosity, *Chemical engineering*, 134, 205-216.

- Oetjen, K., Bilke-Krause, C., Madani, M., Willers, T., 2014, Temperature effect on foamability, foam stability, and foam structure of milk, *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 460, 280-285.
- Özdemir, O., 2013, Specific ion effect of chloride salts on collectorless flotation of coal, *Physicochemical problems of mineral processing*, 49 (2), 511-524.
- Özdemir, O., Karaguzel, C., Nguyen, A.V., Celik, M.S., Miller, J.D., 2009a, Contact angle and bubble attachment studies in the flotation of trona and other soluble carbonate salts, *Mineral engineering*, 22 (2), 168.
- Özdemir, O., Karaguzel, C., Nguyen, A.V., Çelik, M.S., Miller, J.D., 2009b, Contact angle and bubble attachment studies in the flotation of trona and other soluble carbonate salts, *Mineral engineering*, 22 (2), 168-175.
- Özdemir, O., Karakashev, S.I., Nguyen, A.V., Miller, J.D., 2009, Adsorption and surface tension analysis of concentrated alkali halide brine solutions, *Minerals engineering*, 22 (3), 263-271.
- Öztürk, Y., Ekmekçi, Z., 2020, Removal of sulfate ions from process water by ion exchange resins, *Minerals engineering*, 159-106613.
- Öztürk, Y., Bıçak, O., Özdemir, E., Ekmekçi, Z., 2018, Mitigation negative effects of thiosulfate on flotation performance of a cu-pb-zn sulfide ore, *Minerals engineering*, 122, 142-147.
- Pan, Y., Bournival, G., Karakashev, S.I., Yang, B., Wang, L., Ata, S., 2022a, Effect of electrolyte and flotation collector on foam films in the presence of frothers, *Chemical engineering science*, 264, 118176.
- Pan, Y., Gresham, I., Bournival, G., Prescott, S., Ata, S., 2022b, Synergistic effects of frothers, collector and salt on bubble stability, *Powder technol*, 2022 (397), 117028.
- Prestidge, C.A., Ralston, J., 1996, Contact angle studies of particulate sulphide minerals, *Minerals engineering*, 85-102.
- Pugh, R.J., Weissenborn, P., Paulson, O., 1997, Flotation in inorganic electrolytes; the relationship between recover of hydrophobic particles, surface tension, bubble coalescence and gas solubility, *International journal of mineral processing*, 51, 125-138.
- Qin, W., Wang, X., Ma, L., Jiao, F., Liu, R., Yang, C., Gao, K., 2015, Electrochemical characteristics and collectorless flotation behavior of galena: With and without the presence of pyrite, *Minerals Engineering*, 74, 99-104.
- Quinn, J.J., Kracht, W., Gomez, C.O., Gagnon, C., Finch, J.A., 2007, Comparing the effect of salts and frother (MIBC) on gas dispersion and froth properties, *Minerals engineering*, 1296-1302.
- Roberto, P.-G., Arturo, B.-T., 2020, Coalescence of air bubbles: Effect of the electrical double layer, *Minerals engineering*, 150, 106301.
- Salopek, B., Krasic, D., Filipovic, S., 1992, Measurement and application of zeta-potential, *Rudarsko-geolosko-naftni zbornik*, 4 (1), 147.
- Sam, A. 1995, *Single bubble behavior study in a flotation column*, Ph.D Thesis, McGill University, Montreal, Canada.

- Smallwood, I.M., 1996, *Ethylene glycol monobutyl ether*. In *handbook of organic solvent properties*, Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 131–133.
- Szyszkla, D., 2018, Critical coalescence concentration (CCC) for surfactants in aqueous solutions, *Minerals*, 8 (10), 431-441.
- Tao, D., 2005, Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles-A review, *Separation Science and technology*, 39 (4), 741-760.
- Vazirizadeh, A., Bouchard, J., Chen, Y., 2016, Effect of particles on bubble size distribution and gas hold-up in column flotation, *International journal of mineral processing*, 157, 163–173.
- Velasco-Medina, A.A., Gracia-Fadrique, J., 2020, Surface tension and density of ethylene glycol monobutyl ether–water mixtures from 277.15 to 308.15 K. *Journal of chemical. Engineering*, 65, 4547–4555.
- Witecki, K., Polowczyk, I., Kowalczyk, P.B., 2022, Chemistry of wastewater circuits in mineral processing Industry-A review, *Journal of water process engineering*, 45, 102509.
- Yekeen, N., Manan, M.A., Idris, A.K., Samin, A.M., 2017, Influence of surfactant and electrolyte concentrations on surfactant adsorption and foaming characteristics. *Journal of petroleum science and engineering*, 149, 612–622.
- Yoon, R.H., 1982, Flotation of coal using micro-bubbles and inorganic salts, *Min. Congr. J. (United States)*, 76-80.
- Yoon, R. H., Luttrell, G. H., 1986, The effect of bubble size on fine coal flotation, *Coal preparation*, 2 (3), 179-192.
- Yoon, R.H., Luttrell, G.H., 1989, The Effect of bubble size on fine particle flotation. In: Laskowski, J., Ed., *Frothing in Flotation*, Gordon and breach science, New York, 101-122.
- Zanin, M., Wightman, E., Grano, S.R., Franzidis, J.P., 2009, Quantifying contributions to froth stability in porphyry copper plants, *International journal of mineral processing*, 91 (1-2), 19-27.
- Zhu, H., Valdivieso, A. L., Zhu, J., Song, S., Min, F., Corona Arroyo, M.A., 2018, A study of bubble size evolution in Jameson flotation cell, *Chemical engineering research and design*, 137, 461-466.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

Saleban MOHAMED MUSE Doktora tezi

ORİJİNALLIK RAPORU

%**8**

BENZERLİK ENDEKSİ

%**7**

İNTERNET KAYNAKLARI

%**2**

YAYINLAR

%**2**

ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1

Submitted to The Scientific & Technological
Research Council of Turkey (TUBITAK)

Öğrenci Ödevi

%**2**

2

acikbilim.yok.gov.tr

İnternet Kaynağı

%**2**

3

www.mdpi.com

İnternet Kaynağı

%**1**

4

hdl.handle.net

İnternet Kaynağı

<%**1**

5

Can Gungoren, Saleban Mohamed Muse,
Mert Terzi, Mehmet Faruk Eskibalci, Ilgin
Kursun Unver, Orhan Ozdemir. "Synergistic
Effect of Frequently Found Ions in the
Flotation of Pb-Zn Sulfide Ores on Air/Water
Interface", Minerals, 2023

Yayın

<%**1**

6

orbi.uliege.be

İnternet Kaynağı

<%**1**

7

acikerisim.aku.edu.tr:8080

İnternet Kaynağı

<%**1**