



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**KİL MİNERALLERİNİN YAPISAL**  
**ÖZELLİKLERİNİN METAL SÜLFÜRLERİN**  
**FLOTASYON PERFORMANSINA ETKİSİ**

**Hasan Ali TANER**

**DOKTORA TEZİ**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Temmuz-2019**  
**KONYA**

**Her Hakkı Saklıdır**  
**TEZ KABUL VE ONAYI**

Hasan Ali TANER tarafından hazırlanan "Kil Minerallerinin Yapısal Özelliklerinin Metal Sülfürlerin Flotasyon Performansına Etkisi" adlı tez çalışması 05/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan**

Prof. Dr. Emin Cafer ÇİLEK

**Danışman**

Doç. Dr. Vildan ÖNEN

**Üye**

Prof. Dr. Alper ÖZKAN

**Üye**

Prof. Dr. Öner Yusuf TORAMAN

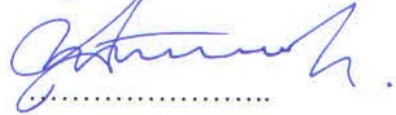
**Üye**

Dr. Öğr. Üy. Ali ARAS

**İmza**











Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

  
Prof. Dr. Hakan KARABÖRK  
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi BAP-16401051/18401029 ve ÖYP programı 2014ÖYP-058 projeleri tarafından desteklenmiştir.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Hasan Ali TANER

Tarih:30/07/2019

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

### KİL MİNERALLERİNİN YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN METAL SÜLFÜRLERİN FLOTASYON PERFORMANSINA ETKİSİ

Hasan Ali TANER

Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Vildan ÖNEN

2019, 172 Sayfa

#### Jüri

Doç. Dr. Vildan ÖNEN  
Prof. Dr. Emin Cafer ÇİLEK  
Prof. Dr. Alper ÖZKAN  
Prof. Dr. Öner Yusuf TORAMAN  
Dr. Öğr. Üy. Ali ARAS

Bu çalışmada, kil minerallerinin kalkopirit flotasyonundaki etkilerinin ortaya konulması ve flotasyonda başarılı sonuçlar elde etmek için çözüm önerileri sunulması amaçlanmıştır.

DeneySEL çalışmalar; zeta potansiyeli ve temas açısı ölçümleri, flotasyon deneyleri, kil minerallerinin flotasyon tenör/verim/köpük kararlılığına, flotasyon kinetiğine ve mekanik taşımaya etkisinin belirlendiği deneyler ile tesis numunesi için farklı bastırıcı/dağıtıcıların kullanıldığı deneyleri kapsamaktadır. Kil minerallerinin etkisinin araştırıldığı deneySEL çalışmalarda istatistiksel deney tasarım yöntemlerinden merkezi kompozit tasarımı kullanılmıştır. Deneylerde bağımsız değişkenler; köpürtücü miktarı, dağıtıcı miktarı, köpük derinliği, hava akış hızı ve kil miktarı seçilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesinde bağımlı değişkenler; kalkopirit tenörü ve verimi, pirit tenörü ve verimi, dinamik köpük kararlılığı ve ortalama kabarcık çapı olarak belirlenmiştir. Kilin etki mekanizmasını belirlemek için SEM, SEM-EDS, TOC ve FTIR analizleri yapılmıştır.

Kil miktarı arttıkça kalkopirit tenörü düşmüş; verim, köpük kararlılığı ve kabarcık boyutu artmıştır. Verim ve tenör açısından olumsuz etki önem sırası montmorillonit>kaolin>illit, dinamik köpük kararlılığı açısından kaolin>montmorillonit>illit şeklinde belirlenmiştir. En büyük kabarcık çapı montmorillonit ile elde edilmiştir. Etkin mekanizma mekanik taşıma olarak belirlenmiştir. Uygun bir flotasyon için kil tipi (kaolin, illit ve montmorillonit) ve oranına bağlı olarak uygulanabilecek flotasyon şartları matematiksel olarak modellenmiştir. Böylece tesis içerisinde zamanla değişen kil oranına bağlı olarak modelde yer alan çalışma parametrelerinde yapılabilecek değişiklikler ile flotasyon sonucunda ulaşılabilecek verim-tenör değerlerinin öngörüsü sağlanabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Flotasyon, Kalkopirit, Kil mineralleri, Köpük kararlılığı, Mekanik taşıma, Şlam kaplama, Flotasyon kinetiği

## **ABSTRACT**

### **PhD THESIS**

# **THE EFFECT OF STRUCTURAL PROPERTIES OF CLAY MINERALS ON FLOTATION PERFORMANCE OF METAL SULPHIDES**

**Hasan Ali TANER**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Mining Engineering**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Vildan ÖNEN**

**2019, 172 Pages**

#### **Jury**

**Assoc. Prof. Dr. Vildan ÖNEN  
Prof. Dr. Emin Cafer ÇİLEK  
Prof. Dr. Alper ÖZKAN  
Prof. Dr. Öner Yusuf TORAMAN  
Asst. Prof. Dr. Ali ARAS**

In this study, it is aimed to reveal the effects of clay minerals on the flotation of chalcopyrite and to offer solutions for successful results in flotation.

Experimental studies include zeta potential and contact angle measurements, flotation experiments, experiments determined of clay minerals effect on flotation grade/flotation recovery/froth stability, flotation kinetic and mechanical entrainment and experiments using different depressants/dispersants for the plant sample. Central composite design which is a statistical experimental design method has been used in experimental studies which investigated the effect of clay minerals. In the experiments, the amount of frother and dispersant, froth depth, air flow rate and the amount of clay were chosen as independent variables. Dependent variables in the evaluation of results were determined as chalcopyrite grade and recovery, pyrite grade and recovery, dynamic froth stability and mean bubble size. SEM, SEM-EDS, TOC and FTIR analyzes were performed to identify the mechanism of action of clay.

As the amount of clay increased, chalcopyrite grade decreased; recovery, froth stability and bubble size increased. The order of negative interaction in terms of grade and recovery was determined as montmorillonite>kaolin>illite and in terms of dynamic froth stability was determined as kaolin>montmorillonite>illite. The largest foam diameter was obtained with montmorillonite. The effective mechanism is defined as mechanical entrainment. For a suitable flotation clay type (kaolin, illite and montmorillonite), clay ratio and flotation conditions that can be applied are modelled mathematically. Thus, the changes in the working parameters in the model depending on the time-varying clay ratio within the facility and the predictability of the recovery-grade values that can be achieved as a result of the flotation will be provided.

**Keywords:** Flotation, Chalcopyrite, Clay minerals, Froth stability, Mechanical entrainment, Slime coating, Flotation kinetic

## ÖNSÖZ

Doğada birçok değerli minerallerle bir arada bulunan kil minerallerinin, flotasyon yöntemiyle etkili bir şekilde değerli minerallerden ayrılabilmesi için, flotasyonu etkilediği mekanizmanın bilinmesi önemlidir. Kil minerallerinin flotasyona etkisini belirleme ile ilgili bugüne kadar birçok bilim adamı çalışmakla birlikte, hala tartışmalar devam etmektedir. Bu tez kapsamında uygulamada karşılaşılan sorunlara da ışık tutmak amacıyla, kalkopirit flotasyonunda kil minerallerinin geniş kapsamda davranışı belirlenmiştir.

Doktora tez çalışmamın seçiminde, planlanmasında ve yürütülmesinde öneri ve desteğini esirgemedi beni yönlendiren, gerekli tüm imkânları sağlayan, değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana ışık tutan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Vildan Önen'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezin önemli bir parçasını oluşturan konularda kıymetli fikirlerini paylaşan, deney setinin oluşturulmasında çok faydalı görüş ve önerilerde bulunan, tezime ilgili birçok aşamada kendisine sıkça danıştığım, her seferinde hoşgörülü ve sabırlı yaklaşımları ile her anlamda destek olan, değerli vaktini ayırarak yol gösteren Sayın Prof. Dr. Emin Cafer Çilek'e içten teşekkürlerimi sunarım. Doktora tez izleme komitesinde yer alma nezaketini göstererek, her türlü katkılarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Alper Özkan'a teşekkür ederim. Doktora tez savunma sınavımda jüri üyesi olan ve katkılarını esirgemeyen Prof. Dr. Öner Yusuf Toraman'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde en sıkıntılı zamanlarımda beni cesaretlendiren, gerek bilgi ve gerekse manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üy. Ali Aras'a özellikle teşekkür ederim. Tez dönemi boyunca bölümün tüm imkânlarından yararlanmamı sağlayan ve her türlü fikirlerini paylaşan başta Maden Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. İhsan Özkan olmak üzere tüm bölüm personeline teşekkür ederim.

Ayrıca tez sürecinde Erasmus kapsamında, Lulea Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü'nde devam ettiğim 3 aylık süre içerisinde gönüllü olarak yardımcı olan, bana laboratuvarlarını açan ve rahat bir çalışma ortamı hazırlayan Sayın Dr. Anuttam Patra'ya teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Numunelerin ve kimyasalların temin edilmesinde, bazı analizlerin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Maden Yük. Müh. Adnan Ceylan'a, ESAN Eczacıbaşı firmasından Tuğba Uçar Demir'e, Nidaş Madencilik A.Ş.'ne, İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Birinci'ye, Clariant A.Ş. firmasından Anı Gençoğlu İnceler'e, Pionera firmasından Dr. Rolf Andreas Lauten'e ve İnnospec Lim. Firmasından Nobuzwe Makhotla'ya teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Bu çalışmayı 16401051 ve 18401029 nolu araştırma projeleriyle maddi olarak destekleyen Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Yaşamımın her döneminde benden desteklerini esirgemeyen rahmetli babam Ahmet Taner'e, annem Hasibe Taner'e ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tüm bu süreçte istemeden de olsa ihmal ettiğim, fakat her şeye rağmen sonsuz anlayış, sabır ve sevgiyle yanımda olan, bu çalışmanın hazırlanmasında ve bitirilmesinde en büyük katkı sahiplerinden biri olan sevgili eşim Duygu ile canım kızım Rabia Buğlem'e sonsuz sevgi ve en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Hasan Ali TANER  
KONYA-2019

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Problem .....	1
1.2. Amaç .....	2
1.3. Tezin Önemi .....	3
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>5</b>
2.1. Kil Mineralleri .....	5
2.1.1. Kil minerallerinin genel özellikleri .....	5
2.1.2. Kil mineral türleri .....	7
2.1.2.1. Kaolin grubu kil mineralleri .....	7
2.1.2.2. İllit grubu kil mineralleri .....	9
2.1.2.3. Montmorillonit grubu kil mineralleri .....	10
2.2. Kil Minerallerinin Flotasyona Etkileri .....	11
2.2.1. Şlam kaplama .....	12
2.2.2. Mekanik taşıma .....	13
2.2.3. Köpük kararlılığı .....	15
2.2.4. Reaktif tüketimini artırması .....	20
2.2.5. Viskozite ve şişme davranışına etkisi .....	20
2.3. Kil Minerallerinin Olumsuz Etkilerinin Kontrolü .....	22
2.4. Siirt Madenköy Zenginleştirme Tesisi ve Kalkopirit Flotasyonu .....	26
2.5. İstatistiksel Deney Tasarım Yöntemi .....	28
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM .....</b>	<b>30</b>
3.1. Malzeme .....	30
3.1.1. Sülfürlü cevher numunesi .....	30
3.1.2. Kil mineralleri .....	34
3.1.3. Numunelerin tane boyut dağılımı .....	36
3.1.4. Kullanılan reaktifler .....	37
3.1.5. Çeşme suyu analizi .....	39
3.2. Yöntem .....	40
3.2.1. Zeta potansiyeli ölçümleri .....	40
3.2.2. Temas açısı ölçümleri .....	42
3.2.3. Flotasyon deneyleri .....	44
3.2.3.1. Yüksek tenörlü cevher ile gerçekleştirilen flotasyon deneyleri .....	45
3.2.3.2. Kil minerallerinin etkisinin araştırıldığı yapay karışımlar ile gerçekleştirilen flotasyon deneyleri .....	47

3.2.3.3. Flotasyon kinetiği deneyleri.....	53
3.2.3.4. Mekanik taşıma deneyleri.....	54
3.2.3.4.1. FTIR spektrometri analizi.....	55
3.2.3.4.2. TOC analizi.....	56
3.2.3.4.3. SEM ve SEM-EDS analizi.....	57
3.2.3.5. Düşük tenörlü tesis cevheri ile gerçekleştirilen flotasyon deneyleri	57
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>59</b>
4.1. Minerallerin Elektrokinetik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	59
4.1.1. Kalkopirit ve kil minerallerinin pH'a bağlı zeta potansiyeli değerleri .....	59
4.1.2. Farklı tür ve miktarda kil içeren kalkopirit mineralinin pH'a bağlı zeta potansiyeli değerleri.....	60
4.2. Temas Açısı Sonuçları .....	62
4.2.1. Ortam pH değerinin minerallerin temas açısına etkisi.....	62
4.2.2. Toplayıcı miktarının minerallerin temas açısına etkisi.....	63
4.3. Flotasyon Deneyleri .....	64
4.3.1. Yüksek tenörlü cevher ile gerçekleştirilen flotasyon deney sonuçları .....	64
4.3.1.1. Tane boyutunun kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi .....	65
4.3.1.2. pH değerinin kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi .....	67
4.3.1.3. pH kıvamlama süresinin kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi .....	69
4.3.1.4. Bastırıcı/dağıtıcı cinsi ve miktarının kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi .....	70
4.3.1.5. Sodyum silikat kıvamlama süresinin kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi .....	74
4.3.1.6. Toplayıcı cinsi ve miktarının kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi .....	75
4.3.1.7. 3418A kıvamlama süresinin kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi .....	79
4.3.1.8. Köpürtücü cinsi ve miktarının kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi .....	80
4.3.2. Kil minerallerinin flotasyona etkileri.....	85
4.3.2.1. Kil minerallerinin kalkopirit flotasyon performansına etkisi ve modellenmesi .....	85
4.3.2.1.1. Montmorillonitin kalkopirit flotasyonunda etkisi ve modellenmesi .....	85
4.3.2.1.2. İllitin kalkopirit flotasyonunda etkisi ve modellenmesi .....	100
4.3.2.1.3. Kaolinin kalkopirit flotasyonunda etkisi ve modellenmesi .....	112
4.3.2.1.4. Kil minerallerinin flotasyona etkilerinin genel değerlendirilmesi.....	123
4.3.2.2. Flotasyon kinetiği deneyleri.....	131
4.3.2.2.1. Flotasyon kinetiği deneylerinde montmorillonitin etkisi.....	131
4.3.2.2.2. Flotasyon kinetiği deneylerinde illitin etkisi .....	132
4.3.2.2.3. Flotasyon kinetiği deneylerinde kaolinin etkisi .....	133
4.3.2.2.4. Killerin flotasyon kinetiği deneylerindeki etkilerinin değerlendirilmesi .....	135
4.3.2.3. Kil minerallerinin mekanik taşımaya etkisinin belirlendiği deneyler ..	137
4.3.2.3.1. FTIR analiz sonuçları.....	139
4.3.2.3.2. TOC analiz sonuçları .....	141
4.3.2.3.3. SEM ve SEM-EDS analiz sonuçları .....	142



4.3.3. Düşük tenörlü cevher ile gerçekleştirilen flotasyon deneylerinde farklı bastırıcı/dağıtıcı türlerinin etkisinin sonuçları .....	147
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>155</b>
5.1. Sonuçlar .....	155
5.2. Öneriler .....	160
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>161</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>170</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Köpürtücü miktarı, g/t
$A_k$	Hücrenin kesit alanı, $cm^2$
B	Dağıtıcı miktarı, g/t
C	Köpük derinliği, cm
CMC	Karboksi metil selüloz
D	Hava akış hızı, L/dk
$D_{32}$	Ortalama kabarcık çapı, mm
$D_{80}$	%80'inin elek altına geçtiği boyut
$D_{90}$	%90'ının elek altına geçtiği boyut
DF	DowFroth
dk	Dakika
DTP	Ditiyofosfat
DTPI	Ditioyofosfinat
DTPINa	Sodyum diizobütil ditiyofosfinat
E	Kil miktarı, %
EDS	Enerji dağılım spektrometresi
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
g/L	Gram/Litre
g/t	Gram/ton
HCl	Hidroklorik asit
$H_{max}$	Toplam köpük yüksekliği, cm
$HNO_3$	Nitrik asit
$H_2SO_4$	Sülfürik asit
IEP	İzoelektrik nokta
k	Flotasyon hız sabiti, $dk^{-1}$
KAX	Potasyum amil ksantat
kg	Kilogram
kN	KiloNewton
L	Litre
L/dk	Litre/dakika
M	Molar
m	Metre
mm	Milimetre
MIBC	Metil izobütil karbinol
MTA	Maden Tetkik Arama
NaCl	Sodyum klorür
NaIPX	Sodyum izo propil ksantat
NaOH	Sodyum hidroksit
$Na_2SiO_3$	Sodyum silikat
$(NaPO_3)_n$	Sodyum polifosfat
$(NaPO_3)_6$	Sodyum hegzametafosfat
nm	Nanometre
Pa	Pascal
PEO	Polietilen oksit
$R^2$	Belirleme katsayısı
$R_A$	Değersiz mineral verimi, %
$R_D$	Değerli mineral verimi, %

$R_G$	Gerçek verim, %
$R_M$	Mekanik taşıma verimi, %
$R_T$	Toplam flotasyon verimi, %
$R_\infty$	Maksimum değerli mineral verimi, %
s	Saniye
SE	Ayırma etkinliği
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
syn	Sıfır yük noktası
Q	Gazın hacimsel debisi, cm <sup>3</sup> /s
t	Flotasyon süresi, dk
T	Etki kestirimi
TOC	Toplam organik karbon
$V_f$	Köpük hacmi, cm <sup>3</sup>
$\Sigma$	Dinamik köpük kararlılığı faktörü, s
$\mu\text{m}$	Mikrometre



# 1. GİRİŞ

## 1.1. Problem

Kil mineralleri genellikle gang minerali olarak; birçok porfiri bakır cevherlerinde (Petruk, 2000), düşük tenörlü nikel cevherlerinde (Senior ve Thomas, 2005), platinyum grubu metal yataklarında (Visser ve ark., 1994), altın, kömür ve bor yataklarında bulunmaktadır. Bu cevherlerdeki kil minerali içeriği bazı durumlarda %80'e kadar ulaşabilmektedir (Forbes ve ark., 2014). Metamorfizmaya uğramamış kompleks sülfürlü polimetalik cevherin bünyelerinde kil zonları veya bantları bulundurması sık rastlanılan bir durumdur. Bu cevherin flotasyonunda jeolojik oluşumlarından kaynaklanan serbestleşme zorluğu ve kimyasal/fiziksel heterojenliklerinden kaynaklanan problemler ile karşılaşmaktadır ve en önemli sorun kil içermeleridir. Kilin oluşumunu engellemek veya azaltmak mümkün olmadığından, yapılması gereken bunların flotasyondaki zararlı etkilerini en aza indirmeye çalışmaktır (Aslan, 1996).

Kil minerallerinin sülfür flotasyonunu birçok nedenden dolayı olumsuz etkilediği bilinmektedir. Flotasyonda kil minerallerinin varlığı; dinamik köpük kararlılığını değiştirme, pülp viskozitesini artırma, şlam kaplama ve mekanik taşıma gibi problemlere neden olmaktadır.

Kil mineralleri bileşim ile sınıflandırma bakımından en karmaşık mineraller arasında yer almaktadır. Killerin yüzey ve kenarlarındaki anizotropik yükler, değerli minerallerin yüzeylerini elektrostatik etkileşimle kaplamasına (şlam kaplama) ve yüzeyin yeteri kadar hidrofobik yapılamamasına, dolayısıyla konsantre kalitesinin düşmesine neden olmaktadır (Zhang ve Peng, 2015). Kil minerallerinin oldukça yüksek bir katyon değiştirme kapasitesi ve büyük bir yüzey alanı vardır. Flotasyon pülpünde bulunan katyonlar ( $Fe^{+3}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Zn^{+2}$ ,  $Pb^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$  ve  $Ca^{+2}$ ) killer tarafından adsorbe edilmektedir. Böylece, cevher içerisindeki minerallerin flotasyon özellikleri değişmekte bunun sonucunda yüzmesi istenmeyen mineral yüzebilir, yüzmesi istenen mineral ise yüzemez hale gelebilmektedir (Aslan, 1996).

Son yıllarda düşük tenörlü ve yüksek kil içerikli cevher yataklarının işletilmesiyle birlikte cevher hazırlama tesislerinde; fazla reaktif tüketimi, konsantre tenörünün düşmesi, konsantrede  $Al_2O_3$  ile  $SiO_2$  miktarının artması ve izabe işleminde daha yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulması gibi bazı sorunlarda artış gözlenmektedir.

## 1.2. Amaç

Kil minerallerinin flotasyon tesislerindeki olumsuz etkileri, yukarıdaki mekanizmalardan biri veya birkaçının birleşiminden kaynaklanabilmektedir. Flotasyon üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için uygun yaklaşımlar geliştirmek ve temel mekanizmaları belirlemek önemlidir.

Bir bakır sülfür cevherinin zenginleştirilmesinde en önemli sorunlardan biri; kil minerali içermeleri ve ufalama sonrası şlam oluşumudur. Flotasyondan elde edilecek konsantrenin verim ve tenörünü artırabilmek için kil minerallerinin flotasyona olan olumsuz etkileri ortadan kaldırılmalı veya en aza indirilmelidir. Bu tez çalışmasında, killerin kalkopirit flotasyonundaki etkilerinin ve etki mekanizmalarının deneysel olarak ortaya konulması amaçlanmıştır. Kil mineralleri arasında belirgin yapısal farklılıklar (kristal yapısı, katyon değişim kapasitesi, şişme özelliği vb.) mevcuttur ve bu yapısal farklılıklar onların flotasyon sırasındaki davranışlarında doğrudan belirleyici bir etkidir. Bu çalışmada, yaygın olarak bulunan kil türlerinin yapısal özellik farklılıkları ile flotasyonu etkileme mekanizmaları arasındaki bağlantının anlamlı ve somut bir şekilde tanımlanması ve kil türü ve miktarının flotasyon performansı üzerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmasında, bu amaçla:

- Zeta potansiyeli ve temas açısı ölçümleri,
- Flotasyon deneyleri ile koşulların optimizasyonu,
- Her bir kil cinsi için (kaolin, montmorillonit, illit), kil oranı ve çalışılan flotasyon değişkenlerinin (köpürtücü miktarı, dağıtıcı miktarı, köpük derinliği, hava akış hızı ve kil miktarı) bir fonksiyonu olarak kalkopirit tenörü ve verimi, pirit tenörü ve verimi, dinamik köpük kararlılığı ve ortalama kabarcık çapının ampirik modellerle tanımlanması,
- Kil minerallerinin flotasyon kinetiğine etkisinin belirlenmesi,
- Kil minerallerinin mekanik taşımaya etkisinin belirlenmesi ve
- Farklı tür bastırıcı/dağıtıcıların tesis için önerilebilirlik çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

### 1.3. Tezin Önemi

Yüksek kil içerikli düşük tenörlü cevher yataklarının zenginleştirilmesinde flotasyon yönteminin kullanımı önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, farklı özellikteki kil minerallerinin (kaolin, montmorillonit ve illit) kalkopirit flotasyonunda köpük kararlılığı ve flotasyon performansı üzerine etkileri belirlenmeye ve kilden kaynaklanan sıkıntıların giderimi için çözüm önerileri sunulmaya çalışılmıştır. Deneysel çalışmalarda numunesi kullanılan ve Siirt Madenköy civarında bulunan kalkopirit zenginleştirme tesisinde, besleme kil içeriği yüksek olduğunda konsantre tenöründe önemli miktarda düşüş olmaktadır. Kil probleminin çözümüne yönelik olarak sodyum silikat kullanıldığı ve 3 adet temizleme devresiyle konsantre tenörünün artırılmaya çalışıldığı öğrenilmiştir. Cevherdeki kil içeriğinin artması sodyum silikat kullanımını da artırmaktadır. Düşük tenörlü ve karmaşık yapıli cevherlerin zenginleştirilmesindeki bu zorluk, tezin ana hatlarını oluşturmaktadır.

Tesise beslenen cevherde kil içeriği zaman zaman değişebilmekte ve yeni cevher kompozisyonundan kaynaklanan problemlere hızlı çözüm önerileri sunmak gerekmektedir. Bu çalışmada, farklı kil tipleri ve karışım oranlarında cevher karışımlarıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda etkin bir flotasyon için uygulanabilecek flotasyon şartları ortaya konulmuştur. Kil cinsi ve karışım oranına bağlı olarak flotasyon sonuçlarının modellerle tanımlanması; cevherde hangi oranda hangi tür kil bulunduğunda flotasyon verimi ve konsantre tenörü nasıl değişir ve tesisin metalurjik başarısını kabul edilebilir seviyelere getirmek için çözüm önerileri neler olabilir gibi sorulara pratik cevaplar bulabilmek açısından faydalı olacaktır.

Kil mineralleri arasındaki yapısal farklılıklar zenginleştirme işlemleri sırasındaki davranışlarında, dolayısıyla zenginleştirme işlemlerine olan etkilerinde de farklılıklar göstermektedir. Yapısal farklılıklardan kaynaklanan problemlerin ortaya konulması tesis bazında düşünüldüğünde problemin hızlı bir şekilde çözümüne yönelik stratejilerin ortaya konulmasında katkı sağlayacaktır.

Killerin olumsuz etkilerinin giderilmesine yönelik literatür çalışmaları dikkate alındığında tesislerde kil probleminin çözümüne yönelik detaylı verilerin mevcut olduğu düşünülebilir, ancak yüksek kil içerikli cevherlerin zenginleştirildiği tüm tesislerde boyut küçültme aşamasından susuzlandırma aşamasına kadar killer hala tesislerin başlıca problemlerinden bir tanesidir. Artık günümüzde daha düşük tenörlü cevherlerin zenginleştirilmesi gerekliliği de göz önüne alındığında bu konu daha da önem kazanmaktadır.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Kil Mineralleri

Kil genel olarak, -5 µm veya jeolojik tanımlamaya göre -2 µm boyutunda olan bir malzemedir (Guggenheim ve Martin, 1995). Hiçbir zaman saf bir şekilde bulunmayan kilin içerisinde alüminyum silikatlarla beraber bulunan demir, magnezyum, potasyum, kalsiyum ve sodyum yani kil olmayan malzemeler, safsızlıkları oluşturmaktadır. Birçok kil minerali ayrıca organik madde ve suda çözünebilen tuzları da içerebilmektedir (Malayoğlu ve Akar, 1995).

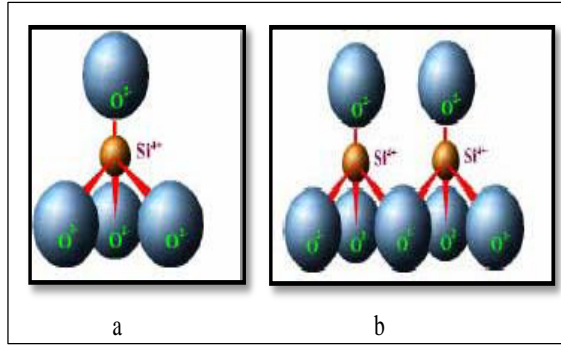
Kil mineralleri katyonlar ( $Si^{+4}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Al^{+3}$  vd.) ile anyonlardan ( $O^{-2}$  ve  $OH^{-}$ ) oluşmaktadır ve köşe, kenar ve yüzeylerinde kırık bağlar mevcuttur. Genellikle kil yüzeyleri negatif yük taşırken, kil tanelerinin kırık kenarlardaki bağların özellikle asit ve nötr pH değerinde pozitif yüklü olduğu kabul edilmektedir (Evcin ve Kavas, 2004).

Kil minerallerinin tamamı  $Al_2O_3$  içerdiklerinden, jeolojik oluşumu genellikle alüminyum silikatların değişik pH ortamında erimesine bağlı olup, jenetik bakımdan aynı parajeneze (birlikte oluşum) dâhildir. Yer kabuğunda çok miktarda bulunan alkali feldispatların doğa koşullarındaki alterasyonu sonunda feldispatlar önce iyonlarına ayrılmaktadır. Ortamın pH değerine göre değişen miktarlarda alüminyum hidrosilikat oluşmakta ve kaolinin meydana gelebilmesi için ortamın pH değeri 8-9 olması gerekmektedir. İyonize eriyiklerden kimyasal olarak kristalleşen kaolin grubu minerallerinin çökmesiyle kil yatakları, montmorillonit grubu minerallerin taşınıp çökmesi sonucu montmorillonit yatakları, alüminyum hidroksit bakımından zenginleşme, minerallerin yataklanması ile de boksit ve geniş alanlarda gördüğümüz kırmızı renkli lateritler oluşmaktadır (Öztürk, 2012).

#### 2.1.1. Kil minerallerinin genel özellikleri

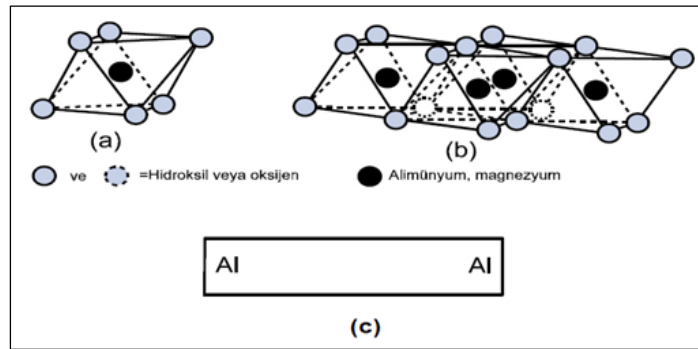
Kil mineralleri, silika tetrahedral ve alümina oktahedral olmak üzere iki temel kristal yapıdan oluşmaktadır. Silika tetrahedral yapı; merkezinde silisyum iyonu, köşelerinde ise oksijen veya hidroksil iyonları bulunan düzgün dörtyüzlü şeklindedir. Düzgün dörtyüzlülerin tabanları aynı düzlem üzerinde kalmak üzere köşelerinden altılı halkalar vererek birleşmesiyle “tetrahedral tabaka” veya diğer adıyla “silika tabakası” meydana gelmektedir (Şekil 2.1).





Şekil 2.1. Tetrahedral tabaka a) tetrahedral yapıtaşı ve b) silika tabakası

Alümina veya magnezyum oktahedral yapı ise, merkezinde alüminyum iyonu, köşelerde oksijen veya hidroksil iyonları bulunan düzgün sekizyüzlü şeklindedir. Düzgün sekizyüzlülerin birer yüzeyleri aynı düzlem üzerinde kalacak şekilde köşelerinden birleşmesiyle “oktahedral tabaka” veya diğer adıyla “alümina tabakası” oluşmaktadır (Şekil 2.2). Oktahedral levhadaki katyonların yer değiştirmesi ile farklı mineraller ortaya çıkmaktadır. Bu durum, kristal yapının değişmeden, ortamdaki katyonların yer değiştirmesi “izomorf yer değiştirme” olarak tanımlanmaktadır. Bu yer değiştirme özelliğinden dolayı mineraller farklı yapıya sahip olup farklı isimlerle adlandırılmaktadır (Savaş, 2000).



Şekil 2.2. Oktahedral tabaka a) oktahedral yapıtaşı, b) alümina tabakası ve c) Alümina tabakasının temsili gösterimi

En basit kil minerali yapısı, tek alüminyum oktahedral tabakası ve 1:1 yapısındaki tek silikat tetrahedral katmanlarının birleşimidir. 2:1 tabaka yapısındaki 2 tetrahedral ve 1 oktahedral tabakaları içeren başka ana tabaka türleri de bulunmaktadır. Bireysel katmanlar ya nötr yükleri ya da ara tabakalardaki boşluktaki katyonlarca dengelenen negatif yükleri taşımaktadırlar. Katyon yükü her iki tabakadaki katyonların bileşimine kontrol edilmektedir (Öztürk, 2012).

### 2.1.2. Kil mineral türleri

Kil mineralleri bileşim ve sınıflandırma bakımından en karmaşık mineraller arasında yer almaktadır. Killerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri esas alınarak birçok sınıflama türü geliştirilmiştir. Fakat hala kesin bir sınıflama mümkün değildir (Öztürk, 2012). Kil minerallerinin en önemli türleri: illit, kaolin, montmorillonit ve klorittir. Kaolin ve illit tabakalardan oluşmakta ve tabakalar arasında su bulunmamaktadır (Luckham ve Rossi, 1999).

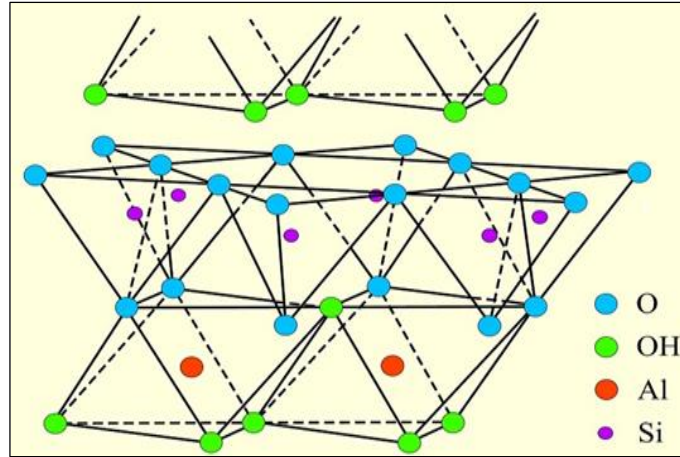
#### 2.1.2.1. Kaolin grubu kil mineralleri

Kaolin, sulu alüminyum silikattır ve kaolinit en çok rastlanan kaolin mineralidir. Kaolinin bir kil yatağındaki en önemli faktörü, kaolinleşme derecesi ve kaolinleşmeye uğrayan kayaç türüdür. Bu sebeple kil minerali cinsi ve  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranının bilinmesi gerekmektedir. Bu oran kaliteli kaolin killlerinde yaklaşık 2/1 olup, diğerlerinde ise 3/1'dir (Akıncı, 1968).

Genellikle feldispatların bozuşması sonucu oluşan kaolin; değişen oranlarda feldispat, mika, kuvars, demir, götit, hematit, rutil, ilmenit ve titan oksit minerallerini içermektedir (Murray, 1999). Kaolin kullanım alanlarına göre sınıflandırılabildiği gibi alüminli, silisli, demirli kaolin şeklinde mineralojik bileşimine; yağlı, sert, döküm, yumuşak, plastik kaolin, refrakter kaolini şeklinde fiziksel özelliklerine göre de sınıflandırılmaktadır (Malayoğlu ve Akar, 1995). Kaolin grubu kil mineralleri kendi içinde üç gruba ayrılmaktadır (Öztürk, 2012):

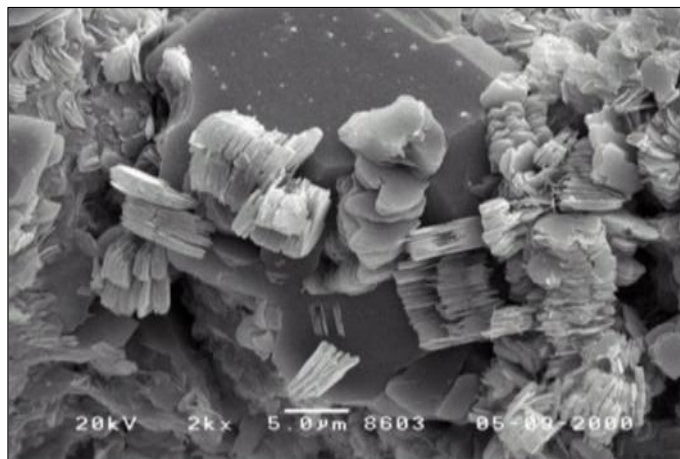
- a) Kaolinit:  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- b) Dikit ve Nakrit:  $\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$  veya  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- c) Halloysit:  $\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_{4.n} \text{H}_2\text{O}$

Kaolin, bir tetrahedral (silika) ve bir oktahedral (alümina veya gibsit) levhanın tekrarlanan katmanlarından oluşmaktadır. Bir katmanın iki levhanın bir tanesinden meydana gelmesinden dolayı kaolin 1:1 veya iki tabakalı kil minerali olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.3). Silika levhasının uçları ile oktahedral levhanın katmanlarından biri şeklindeki gibi tek katmandan oluşmakta ve iki levhanın bir araya gelmesi bu şekilde olmaktadır (Öztürk, 2012).



Şekil 2.3. Kaolinin yapısının şematik diyagramı (USGS, 2013)

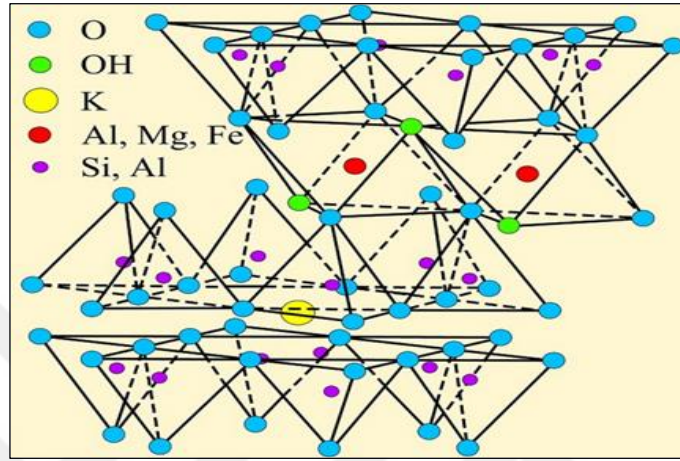
Bir kaolin kristali birkaç katmanın bir araya gelerek oluşturduğu 0,72 nm kalınlığındaki temel bir katmandan oluşmaktadır. Birbirini izleyen bu temel katmanlar oktahedral levhanın hidroksilleri ile tetrahedral levhanın oksijenleri arasındaki hidrojen bağı ile bir arada tutulmaktadır. Hidrojen bağı hidrasyonu önlemekte ve katmanların bir araya gelerek büyük bir kristal oluşmasını sağlamaktadır. Şekil 2.4'te kaolinin SEM görüntüsü yer almaktadır (Öztürk, 2012). Kaolin; montmorillonit, paligorskit ve sepiyolite göre düşük yüzey alanına ve düşük yüzey yüküne sahiptir; bu durum az absorpsiyon ve adsorpsiyon özellik göstermesi demektir. Kaolin hidrofildir ve az bir dağıtıcı ilave edilmesiyle bağları kırarak kenardaki yükler değişerek kolaylıkla bastırılmaktadır (Murray, 1999).



Şekil 2.4. Kaolinin SEM görüntüsü (Mineralogy, 2010)

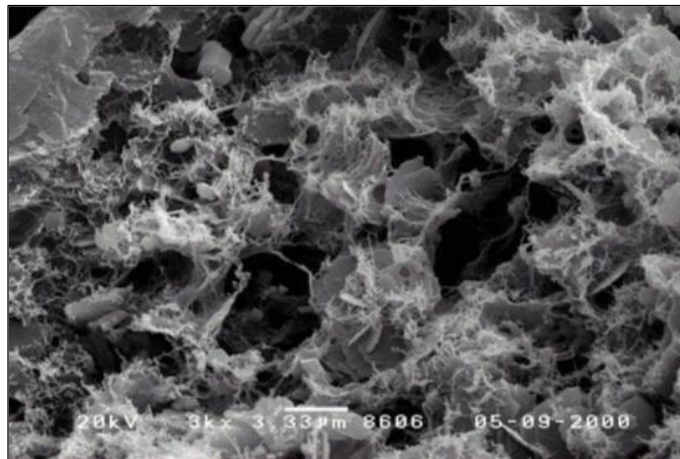
### 2.1.2.2. İllit grubu kil mineralleri

İllit, mikaya benzeyen kil minerallerine verilen genel bir isimdir. Potasyum iyonlarının birim tabakaları arasında köprü vazifesi görmesi ve bunları bağlamalarından dolayı genişlemezler (Akıncı, 1968). İllit üç tabakalı (2:1) bir mineraldir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. İllitin yapısının şematik diyagramı (USGS, 2013)

SEM görüntüsünde; küçük, zayıfça belirgin pullar, ince taneler bazen de düzensiz gruplar halindeki agregatlar gibi görünmektedir (Şekil 2.6). İllit mineralleri montmorillonit gibi şişmemekte ve  $K^+$  içermektedir. Yoğunluğu  $2,6-2,9 \text{ g/cm}^3$  ve Mohs sertliği 1-2 aralığındadır (Mineralogy, 2010; Öztürk, 2012).



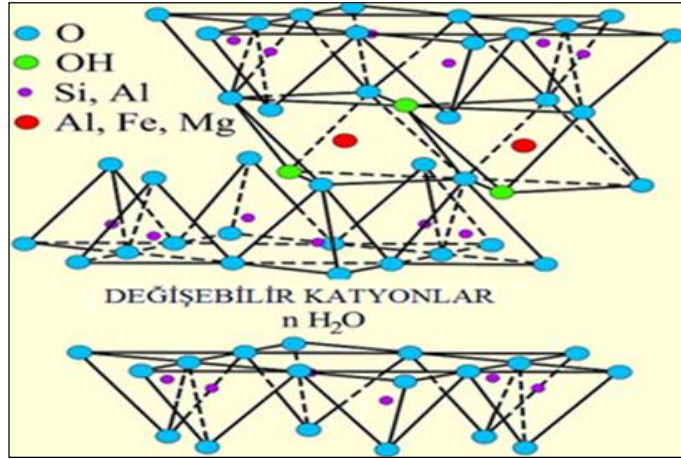
Şekil 2.6. İllitin SEM görüntüsü (Mineralogy, 2010)

### 2.1.2.3. Montmorillonit grubu kil mineralleri

Montmorillonit çok çeşitli ortamlarda oluşmaktadır.  $Mg^{+2}$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Si^{+4}$  ve  $Al^{+3}$  içeren kayaların hepsi ana kayaç olabilmektedir. Montmorillonit grubu kil mineralleri (genişleyen kafesli 3 tabakalı kil mineralleri) kendi içinde dört gruba ayrılmaktadır:

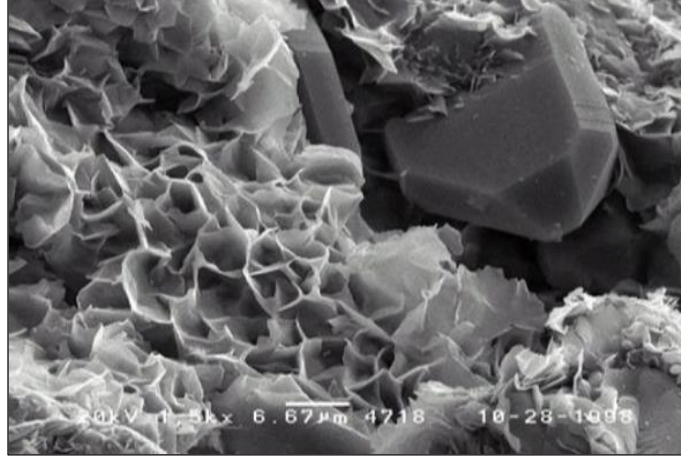
- Montmorillonit:  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O + n \cdot H_2O$
- Beydellit:  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$
- Nontronit:  $(AlFe)_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot nH_2O$
- Saponit (Hektorit):  $2MgO \cdot 3SiO_2 \cdot nH_2O$  (Öztürk, 2012).

Montmorillonit iki silika levhası ile bir alümina (gıbsit) levhasından oluşan önemli bir mineraldir. Bu yüzden 3 tabakalı (2:1) mineral olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere oktahedral levha iki silika levhası arasında gelerek bir katman oluşturmaktadır. Burada silika levhasındaki tetrahedrallerin uçları oktahedral levhanın hidroksilleri ile birleşmektedir. 2:1 katmanın kalınlığı yaklaşık olarak 0,96 nm olup kaolinde olduğu gibi diğer iki yönündeki uzama belirsizdir. Silika levhalarının tepesini bağlayan Van der Waals kuvvetlerin zayıf olması ve oktahedral levhada da net bir negatif yük boşluğu olmasından dolayı, su ve değişebilir iyonlar katmanlar arasında girerek bunları ayırabilmektedir (Öztürk, 2012).



Şekil 2.7. Montmorillonitin yapısının şematik diyagramı (USGS, 2013)

Şekil 2.8’de montmorillonit mineraline ait SEM görüntüsü verilmektedir. Montmorillonit grubu kil mineralleri düzensiz şekilli veya çubuğumsu şekilli taneler halinde bulunmaktadır. Sodyum montmorillonitin kation değişim kapasitesi diğer kil minerallerine göre daha yüksektir (Luckham ve Rossi, 1999).



Şekil 2.8. Montmorillonitin SEM görüntüsü (Mineralogy, 2010)

Montmorillonitin taban yüzeyi negatifken, köşeleri pH değerine bağlı olarak değişmektedir. Suya konulduğunda su molekülleri kil tabakalarının arasına girerek tabakalar arası mesafeyi artırmaktadır (Wang ve ark., 2016). Tamamen şişen bir montmorillonit ağırlığının 10 katına kadar, hacminin de 20 katına kadar çıkabilmektedir. Montmorillonitin daha büyük ara katman mesafesi, su moleküllerinin bu tabaka arasına nüfuz etmesini kolaylaştırmakta, böylece şişme gerçekleşmektedir (Wang ve ark., 2015). Na-montmorillonit suda daha yüksek şişme özelliği gösterirken, Ca-montmorillonit daha az şişme özelliği göstermektedir (Malayoğlu ve Akar, 1995).

## 2.2. Kil Minerallerinin Flotasyona Etkileri

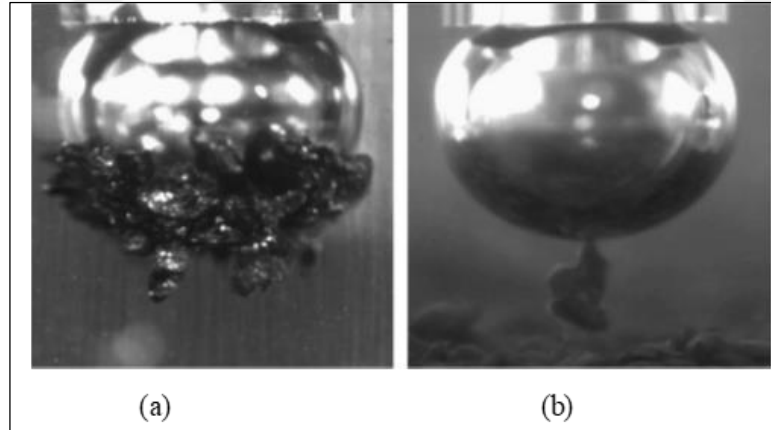
Günümüzde düşük tenörlü cevherlerin üretiminin bir gereklilik haline gelmesinden dolayı, farklı özellikteki killeri içeren gang minerallerinin mineralojisini anlamının önemi günden güne artmaktadır. Bu mineraller ana gang mineralleri olarak bulunmakta ve cevher hazırlamada ciddi zorluklara sebep olmaktadır.

Kil minerallerinin flotasyonda sebep olduğu problemler; yüzey kimyasına etkisi, mineral yüzeyine veya hava kabarcıklarına şlam kaplama yaparak verimi azaltması, yüzey alanlarının fazla olmasından dolayı reaktif tüketimini artırması, kaba ve süpürme flotasyon devrelerinde büyük miktarda kil minerallerinin konsantreye geçmesi (mekanik taşıma), flotasyon devrelerinde temizleme aşamalarının sayısının artması, montmorillonit tipi killerde görülen şişme davranışının sistemi etkilemesi, pülpün viskozitesinde artış meydana getirmesi ve köpük kararlılığını etkilemesi şeklinde özetlenebilir.

### 2.2.1. Şlam kaplama

Flotasyonu olumsuz etkileyen parametrelerden bir tanesi mineral tanelerinin şlamla kaplanmasıdır. Bu olay, değerli tanelerin kısmen ya da tamamen hidrofilik şlam tabakası ile kaplanması ve böylece hidrofilik özellik kazanarak toplayıcı adsorpsiyonunun engellenmesidir. Şlam kaplama, iri ve ince boyuttaki mineraller arasındaki zeta potansiyeli işaretinin farklı oluşu ile izah edilmektedir. Sun (1943) tarafından geliştirilen hipoteze göre şlam kaplama, mineral ve ince tane yüzeylerindeki yükün işareti ve büyüklüğü ile kontrol edilmektedir.

Fuerstenau ve ark. (1958) şlam kaplama ile flotasyon verimi arasında bağlantı kurmuş ve şlam kaplama mekanizmasını elektriksel çift tabaka yardımıyla açıklamıştır. Oats ve ark. (2010) şlamın kömür flotasyonundaki etkisini ve kabarcık-tane tutunmasını ince tane varlığında/yokluğunda incelemiştir, şlam kaplamasının kömür tanelerinin kabarcığa tutunmasını önemli derecede engellediğini ve böylece flotasyon verimini düşürdüğünü belirtmiştir. Şekil 2.9a'da kabarcığın yüzeyi kömür tanesi ile kaplanırken, Şekil 2.9b'de ince kil tanelerinin varlığında ise pülp daha bulanıklaşmış ve kil taneleri kömür yüzeyine kaplanarak kömür tanesinin kabarcık yüzeyine tutunmasını zorlaştırmaktadır.



Şekil 2.9. Kil ilave etmeden (a) ve kil varlığında (b) kömürün hava kabarcığına tutunması (Oats ve ark., 2010)

Altın ve sülfürlü minerallerin flotasyonunda, mineral yüzeyine kaplanan ince tane boyutundaki gang mineralleri (talk, montmorillonit, götit, demir oksit, profillit ve karbonatlar) probleme sebep olmaktadır. Bu durum dağıtıcı reaktifler kullanılarak kontrol edilebilmektedir. Alkalilik kontrol edildiği sürece sodyum silikat bu amaçla, etkili olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Sodyum sülfat ayrıca bu amaçla kullanılan etkili bir reaktiftir. Şlam kaplamayı önlemek için diğer fiziksel yöntem ise, hidrosiklon ile şlamın uzaklaştırılması, yüksek hızda karıştırma ve düşük pülp yoğunluğudur (Özgen, 2014).

Şlam kaplama ile ilgili olarak Kitchener (1973) üç önemli noktaya dikkat çekmektedir:

- Şlam ve tane aynı işarete ve yüksek zeta potansiyeline sahip olduğunda herhangi bir kaplama olmamaktadır,

- Yüzeyle düşük zeta potansiyeli taşıdığında, tüm agrega boyutları topaklanmakta, fakat topaklanma düzensiz olmaktadır.

- Tane dağılımının dar olduğu durumlarda, tek tanelerin rastgele topaklanması meydana gelmektedir. Bu durum gang ve değerli mineral taneleri ters veya aynı işaretli olduğunda fakat düşük zeta potansiyeli taşıdıklarında ortaya çıkmaktadır (Aslan, 1996).

İzomorfik yer değiştirmeden dolayı, kil minerallerinin yüzeyi pH değerine bağlı olarak negatif yüzey yüküne sahiptir (Luckham ve Rossi, 1999; Zhao ve ark., 2008). Tabakaların kenarında, tetrahedral silika tabakaları ve oktahedral alüminyum tabakaları birincil bağları kırmaktadır. Nötr ve asidik çözeltide kil minerallerinin yüzeyleri pozitif yüklüdür (Swartzen-Allen ve Matijevic, 1974). Hou ve ark. (2009) illit, kaolin, pirofillitin kristal yapısının flotasyonla zenginleştirdikleri araştırmada, katyonik toplayıcılar kullanarak ters flotasyonla bu killerin ıslanabilirliğini ve elektrokinetiğini incelemiştir. Ölçülen sıfır yük noktası (syn) ve hesaplanan izoelektrik nokta (IEP) değerlerinde azalma olduğunu, bu azalmanın ise azalan kırık Al-O bağları ve azalan kırık Al-O/Si-O oranından kaynaklandığını tespit etmiştir (Özmetin, 2009).

### 2.2.2. Mekanik taşıma

İnce ve aşırı ince tanelerin zenginleştirilmesinin sonucu olarak flotasyon daha da zorlaşmaktadır. Bu ince tanelerin flotasyonundaki zorluklardan biri düşük tenörlü yüksek gang taşımının olmasıdır. İnce tanelerin fizikokimyasal yüzey özellikleri farklılığından bağımsız olarak, su ile konsantreye sürüklenmeleri sebebiyle mekanik taşıma seçici olmayan bir süreçtir ve flotasyonda seçiciliğin azalmasının bir sonucu olarak konsantre tenörü azalmaktadır (Çilek ve ark., 2009).

Mekanik taşıma ile ilgili daha önceki yapılan araştırmalar konsantreye ne kadar su gelirse mekanik taşımının da o ölçüde değişeceğini göstermektedir. Konsantreye gelen besleme suyunun azaltılması için, kabarcıklar arasındaki sıvı filminin (besleme suyunun) pülp bölgesine geri akışının sağlanması gerekmektedir. Kabarcıklar arasındaki besleme suyunun pülp içine yeterince akabilmesi ise yeterli bir süre köpüğün bekletilmesi, yani köpük derinliğinin artırılması ile sağlanabilmektedir (Özer, 2007).

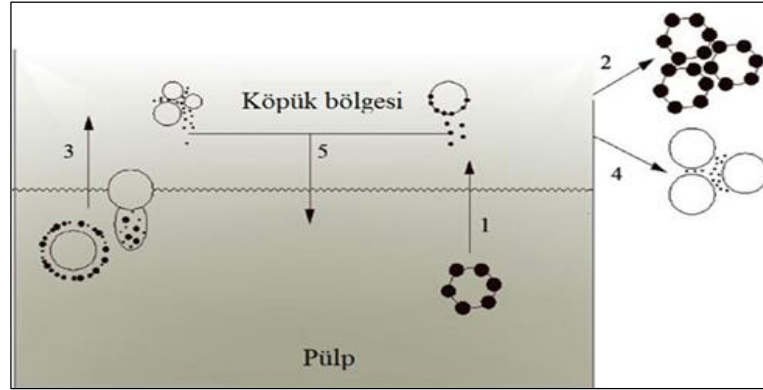


Bir flotasyon hücresinde, mekanik taşıma gerçek flotasyon ile birlikte eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir. Gerçek flotasyonun aksine mekanik taşıma seçimli değildir ve taneler kabarcıklara doğrudan tutunmadan taşınmaktadır. Bu nedenle, hem değerli hem de gang mineralleri mekanik taşımaya maruz kalmaktadır. Şekil 2.10 bir flotasyon boyunca gerçekleşen hareketleri tarif etmektedir:

- (1) Değerli minerallerin pülpten kabarcığa tutunarak flotasyonla taşınması,
- (2) Değerli minerallerin kabarcıkla konsantreye gerçek flotasyonla taşınması,
- (3) Minerallerin pülpten köpüğe mekanik taşınması,
- (4) Mineralin kabarcıklar arasında konsantreye mekanik taşıma yoluyla aktarılması,
- (5) Köpüğe tutunamayan ve mekanik taşınan tanelerin köpükten pülpe aktarılmasıdır (Wang ve ark., 2015).

Flotasyonda hidrofilik gang mineralleri, hücreden köpüğe birkaç taşınma mekanizması ile geçmektedir. Bunlar:

- a. Kabarcıklar arasında mekanik taşınması,
- b. Serbestleşmemiş tanelerin hidrofobik olan yüzeyleri sayesinde kabarcığa tutunması,
- c. Şlam kaplanmış ve zıt yüklü ince boyutlu tanelerin hetero-koagülasyonudur (Çilek ve Umucu, 2001).



Şekil 2.10. Flotasyon hücresinde mineral tanelerinin hareketi

Mekanik taşımada tane boyutu büyük önem taşımaktadır. Trahar (1981) mekanik taşımada 30  $\mu\text{m}$ 'den daha küçük taneler için önemli olduğunu ve köpük bölgesindeki su verimiyle doğru orantılı olduğunu belirlemiştir. Gang minerallerindeki bu ciddi mekanik taşıma birçok flotasyon deneylerinde gözlenmektedir. Örneğin bakır ve kurşunun kaba flotasyonunda, metalik olmayan gang mineral verimi 40  $\mu\text{m}$  boyutundaki taneler için %5'e, 10  $\mu\text{m}$  boyutundaki taneler için %30'a kadar artmaktadır (Liu ve ark., 2006).

Toklu ve Çilek (2010) barit flotasyonunda %10 katı oranında optimum flotasyon şartlarında tane boyutu-köpük derinliği ile mekanik taşıma arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Tane boyutu küçüldükçe mekanik taşımanın arttığı ve buna bağlı olarak konsantre tenörünün azaldığı, köpük derinliği arttıkça ise mekanik taşımanın azaldığı, konsantreye istenmeyen değersiz minerallerin taşınmasının engellendiği ve konsantre tenörünün arttığı belirlenmiştir.

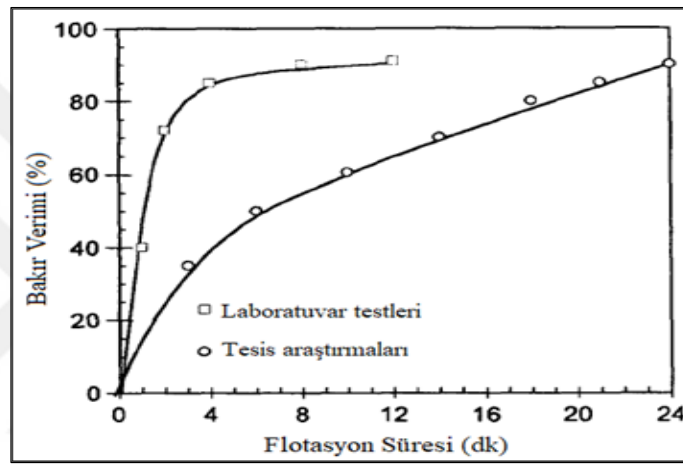
Aslan (1996) kil minerallerinin bakır kaba flotasyonuna etkisini araştırdığı çalışmada, tenör açısından olumsuz olarak etkilediği sonucuna ulaşmıştır. Kil miktarı arttıkça, alınan konsantrenin ağırlıkça miktarı da artmaktadır. Bu durum, kil fraksiyonunun çok ince tane boyutunda olmasından dolayı, köpüğe “gerçek” flotasyon (flotasyon hücresindeki mineral tanesi kabarcığa yapıştıktan sonra hidrofobik taneler ile yüklü kabarcığın köpük bölgesine yükselmesi) ile değil, mekanik taşıma (kabarcıklar arasındaki sıvı filmi ile konsantreye taşınarak) ile gelmesinden kaynaklandığı ifade edilmektedir. İnce tanelerin küçük kütle ve dolayısıyla küçük momentuma sahip olmaları, onların ya su ile birlikte ya da yüzdürülen taneler arasında mekanik olarak köpüğe taşınmasına neden olmaktadır.

### 2.2.3. Köpük kararlılığı

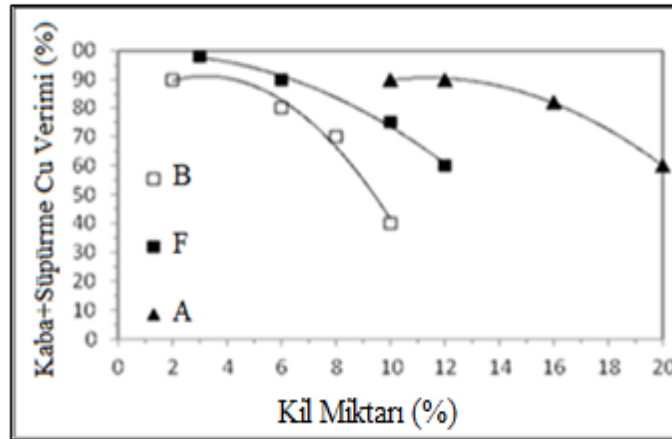
Köpük kararlılığı flotasyonda elde edilen mineralin tenörünü ve verimini belirlemede önemli bir etken olduğu bilinmektedir. Köpük kararlılığı, hem köpürtücü hem de pülpteki tanelerin miktarına ve tipine bağlıdır. En iyi köpük kararlılığını oluşturma ve koruma, flotasyonda kolay olmayan bir süreçtir. Kil minerallerinin köpük kararlılığını etkileme mekanizması tam anlamıyla anlaşılammıştır ve daha da araştırılması gerekmektedir (Farrokhpay ve Zanin, 2012).

Kil mineralleri hava kabarcıklarında kaplama yapabilmekte ve mineral taneleriyle birleşmesini engelleyebilmektedir (Wen ve Sun, 1977). Oats ve ark. (2010) kabarcık-tane tutunması ile ilgili, hücrede kalma süresinin kil tanelerinin varlığında olumsuz etkileyebileceğini ifade etmektedir. Flotasyon verimi kabarcıkların pülpten hidrofobik taneleri toplama kabiliyetine bağlı olduğu için, verimin azalması onların kabarcıktaki konsantrasyonunu ve böylelikle tüm köpük kararlılığını azaltmaktadır.

Bulatovic ve ark. (1998) köpük kararlılığına kilin etkisini araştırdıkları bir çalışmada, laboratuvar ve saha çalışmaları arasında uyumsuzluk görmüştür. Bu etki Şekil 2.11’de verilmiş ve bu olayın köpürtücü özelliklerinden dolayı olduğu belirtilmiştir. Köpürtücü laboratuvar koşullarında kolaylıkla adsorbe olurken, tesiste köpük hücreden serbestçe akmamakta ve flotasyon verimini düşürmektedir. Bulatovic ve ark. (1999) bakır flotasyonunda farklı tip ve miktardaki killerin etkisini araştırdıkları çalışmalarında, montmorillonit (B) ve kamositin (F) (bir çeşit klorit) flotasyonda kaolin ve illitten (A) daha zararlı etkiye sahip olduğunu, ancak kaolinin köpürtücü özelliklerini değiştirerek flotasyon verimini azalttığını belirtmiştir (Şekil 2.12).



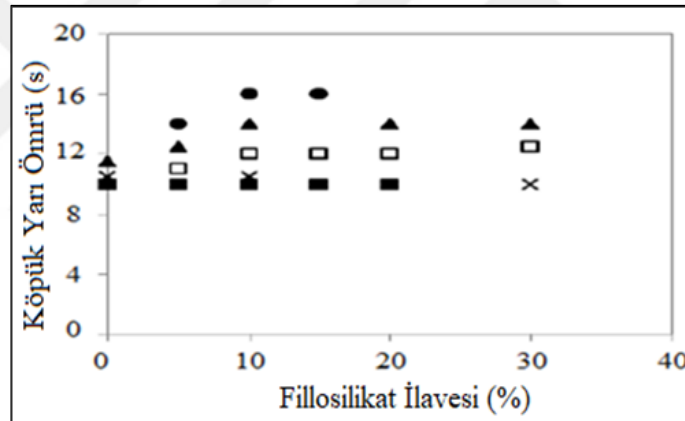
Şekil 2.11. Yüksek kil içeren bakır flotasyonunda laboratuvar ve tesis sonuçları (Bulatovic ve ark., 1998)



Şekil 2.12. Bakır flotasyon veriminde kil miktarının etkisi (Bulatovic ve ark., 1999)

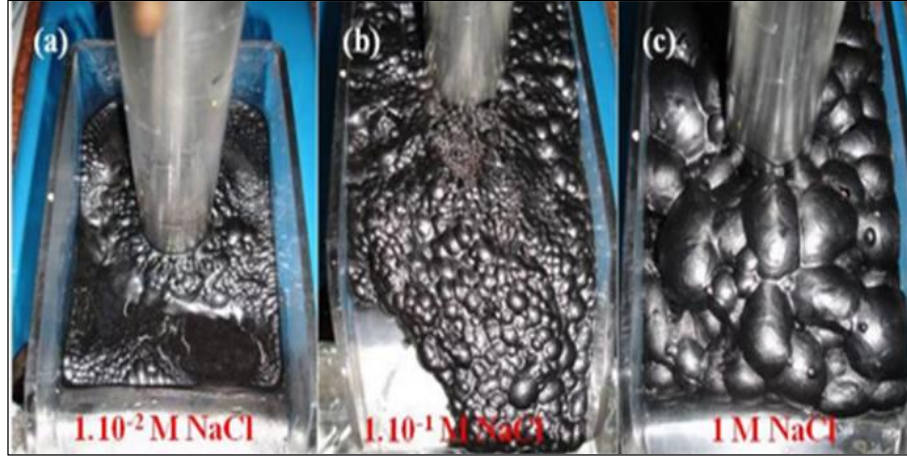
Wang ve ark. (2015) montmorillonit ve kaolin kullanarak bakır flotasyonunda kil minerallerinin etkisini araştırdıkları çalışmada, montmorillonit ve kaolinin farklı sorunlara sebep olduğu bulunmuştur. Montmorillonit miktarı arttıkça pülpün üst kısmında köpük miktarı ve kalkopirit verimi azalmakta, bu da kabarcık-tane çarpışma ihtimalini azaltan yüksek pülp viskozitesinden kaynaklanmaktadır. Kaolin artışında ise pülp viskozitesi az etkilenirken bakır tenörü düşmüş ve üst taraftaki kabarcık yüksek kararlılıkla küçülmeye başlamıştır. Kaolinin ince boyutlu agregat yapısından dolayı taneler köpük bölgesine taşınarak tenörü düşürmüştür.

Şekil 2.13'te farklı fillosilikat minerallerinin ilavesine bağlı olarak köpük kararlılığı (köpük yarı ömrü) değişiklik göstermektedir (Farrokhpay ve Ndlovu, 2013). Kalkopirit flotasyonunda montmorillonit ve muskovitin köpük kararlılığını önemli derecede etkilediği, illit, kaolin ve talk önemsenmeyecek kadar az etki gösterdiği görülmektedir.



Şekil 2.13. Kalkopirit flotasyonunun köpük kararlılığında fillosilikat minerallerinin (illit □, kaolin ■, muskovit ▲, montmorillonit ● ve talk x) etkisi

Laboratuvar ölçekli flotasyon deneyleri ile taş kömürünün hiçbir kimyasal kullanmadan sadece tuzlu su ortamında yüzmesinin mümkün olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tuz konsantrasyonunun  $1.10^{-2}$  M'dan 1 M'a artışı ile flotasyon veriminde artış olmuştur. Şekil 2.14'te görüldüğü gibi tuz konsantrasyonu arttıkça köpükteki kabarcık boyutunun arttığı ve bir açıdan flotasyon verimi ile kabarcık boyutu arasında bir ilişki olduğu açıkça görülmektedir (Özdemir ve ark., 2013).



Şekil 2.14. NaCl konsantrasyonuna bağlı olarak tuz çözeltisi içerisinde taşkömürü flotasyonu  
(a)  $1.10^{-2}$  M, (b)  $1.10^{-1}$  M, (c) 1 M NaCl

Ortalama kabarcık boyutunun kontrolü ve ölçümü flotasyonda büyük öneme sahiptir. Pülpte gerçekleşen işlem köpük yüzeyinden anlaşılabilir. Flotasyonun performansı oluşan kabarcığın boyutuna bağlıdır ve özellikle çarpışma ve tutunma veriminin küçük kabarcıklar kullanılarak artırıldığı göz önünde bulundurulmalıdır (Ekmekçi ve ark., 2005).

Hava hızının kabarcık boyutuna etkisi: Flotasyon sırasında hava hızı artması ile ortalama kabarcık boyutu artarken, bu durum tenör ve verimi etkilemektedir. Tesislerde operatör hava hızını kendilerine iyi görünen köpüğe göre ayarlamaktadır (Ekmekçi ve ark., 2005).

Köpük viskozitesinin kabarcık boyutuna etkisi: Viskozite arttığında daha büyük kabarcıklar oluşmaktadır. Bunun sebebi kabarcığın oluşumu sırasında sıvı filmin daha hızlı oluşması olarak düşünülmektedir. Yapılan çalışmalar kabarcık boyutunun sıvının viskozitesiyle arttığını göstermektedir (Moolman ve ark., 1996; Ekmekçi ve ark., 2005).

Kabarcığın şekli flotasyon açısından bazı bilgiler verebilmektedir. Köpük kuru olduğunda kabarcıklar birbirine yakındır ve polihedral (çok yüzlü) yapıda olmaktadır. Kabarcık köpük içinde yükselirken suyun pülpe geri dönmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak kabarcıklar bir araya gelmeye, birleşmeye ve deforme olarak polihedral yapı oluşturmaya zorlanmaktadır. Bu fazla birleşmeye ve drenaja kabarcıkların ince tanelerle kaplanması ile direnç gösterilmektedir. Küresel kabarcık mineral taşımayan, düşük tenörlü, sığ ve hızlı köpük anlamına gelmektedir. Kabarcıkların bu küresel şekli, kabarcıklar arasındaki su tabakalarının kalın olmasından kaynaklanmaktadır (Moolman ve ark., 1996; Ekmekçi ve ark., 2005).

Köpük kararlılığı köpük yüzeyindeki kabarcık boyutu, yüzeyde patlama ve köpük yatağı içindeki birleşme oranı ile ilişkilidir. Köpük kararlılığı hava kabarcığının patlamaya ve birleşmeye karşı direnci veya köpük ömrünün ölçülmesi olarak tanımlanabilir. Köpük yeterince kararlı olmadığı durumda minerale kaplı olan kabarcık hücreyi terk edmeden patlamakta ve mineraller tekrar pülpe dönmektedir. Kararsız köpük, kabarcıklar arasındaki su drene olduğu için patlama eğilimindedir ve bu tip köpükte kabarcık birbirine dokunup birleşene kadar neredeyse küresel şekildedir. Bu durum aşırı yüklü köpük yapısında görüldüğü gibi, hidrofobik mineral miktarı çok az olan boş köpük yapısında da görülebilmektedir. Aşırı derecede duraylı köpük büyük miktarda gang mineralinin konsantreye gelmesine neden olmakta ve konsantre tenörünü düşürmektedir. Optimum kararlılığa sahip bir köpükte kabarcıklar daha az birleşmektedir (Moolman ve ark., 1996; Ekmekçi ve ark., 2005).

Çilek ve Karaca (2015) modifiye edilmiş flotasyon hücresi ve köpük kolonu kullanarak, barit flotasyonunda 4 farklı nanomateryal köpük kararlaştırıcının ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) kullanılabilirliğini araştırmıştır. Köpük kolonu kullanarak Sauter ortalama köpük boyutunu ve dinamik köpük kararlılığını belirlemiştir. Köpük derinliği arttıkça köpükteki kabarcık birleşmesi veya yüzeyde patlaması önemli şekilde nanomateryaller kullanılarak azalabileceği bulunmuştur. Sığ köpükte tüm nanomateryallerin flotasyon veriminde herhangi bir faydası olmamış, derin köpükte  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  barit veriminde %7-11'lik artışa sebep olmuştur.

Flotasyon işleminin dengeli koşula gelip gelmediği köpük görüntüsü ile yakından ilişkili olduğu için, köpük görüntülemenin tanımlanması bir flotasyon tesisi için oldukça önemlidir ve istenmeyen ince tanelerden kaynaklanan problemleri de tespit etmede yararlı olabilmektedir. Başarılı ve iyi bir görüntü analiz sistemi, en uygun kabarcık oluşumunun nasıl olması gerektiğini daha iyi ortaya koyarak, operatör ve işlemin ilişkisini arttıracaktır (Ekmekçi ve ark., 2005).

Barbian ve ark. (2003) yaptıkları araştırmada, farklı çalışma koşullarında dinamik kararlılık katsayısını laboratuvar ölçekli çalışmada ölçmüştür. Köpük yüksekliği ve dinamik kararlılık katsayısının önemli ölçüde hem hava akış hızına hem de köpürtücü miktarına bağlı olduğu bulunmuştur. Bu değişkenlerin miktarı arttıkça, maksimum denge köpük derinliği artmaktadır. Fakat yüksek hava akış hızında ve köpürtücü miktarında, maksimum köpük yüksekliği düşmektedir. Bu koşullar altında, köpük kararlı kalamamakta ve çökmektedir. Ayrıca ölçümler, dinamik köpük kararlılığı ile köpük yapısı ve flotasyon verimi arasında daha açık bir bağlantı kurmaya yardımcı olmaktadır.

Köpük yapısı ve kararlılığı, flotasyon işlemlerinde önemli bir role sahiptir. Köpük kararlılığı; köpürtücüye (cinsi ve miktarı), askıdaki taneciklerin doğasına, tanelerin hidrofobikliğine ve boyutuna bağlıdır. Ayrıca diğer parametreler örneğin; kullanılan suyun kalitesi, gaz dispersiyonu ve tanelerin temas açısı da köpük kararlılığını etkilemektedir (Farrokhpay, 2011).

#### **2.2.4. Reaktif tüketimini artırması**

Flotasyonda kullanılan kimyasal reaktifler mineral yüzeylerine adsorplanarak işlevlerini yerine getirmektedir. Birçok kil minerali; iyonik ve molekül bağ yapıları ile adsorpsiyonu destekleyen geniş bir kimyasal aktif yüzey alanına sahiptir (Luckham ve Rossi, 1999). Kil minerallerinde bir çözünenle reaksiyona giren kısımlar dış yüzey ve köşelerdir. Geniş yüzey alanları ile kil mineralleri daha çok reaksiyona olanak sağlayabilmektedir (Farrokhpay ve Bradshaw, 2012). Bu durum artan yüzey alanı ile reaktif tüketiminin artmasının yanı sıra kimyasal reaktiflerin yoğun bir biçimde kil yüzeyine adsorpsiyonuna sebep olabilmektedir.

Reaktiflerin belirli bir süre içinde mineral yüzeyine adsorplanabilme yeteneği mineral ve reaktifin özelliklerine bağlıdır. Yüksek yüzey alanı doğrudan (a) su içinde yüksek bir çözünme hızına; (b) büyük miktarda kimyasal adsorpsiyona; (c) köpüğün rijitliğine; (d) yüksek pülp viskozitesine; (e) değerli tanelerin çok ince gang taneleri tarafından kaplanmasına neden olmaktadır (Çilek, 2006).

#### **2.2.5. Viskozite ve şişme davranışına etkisi**

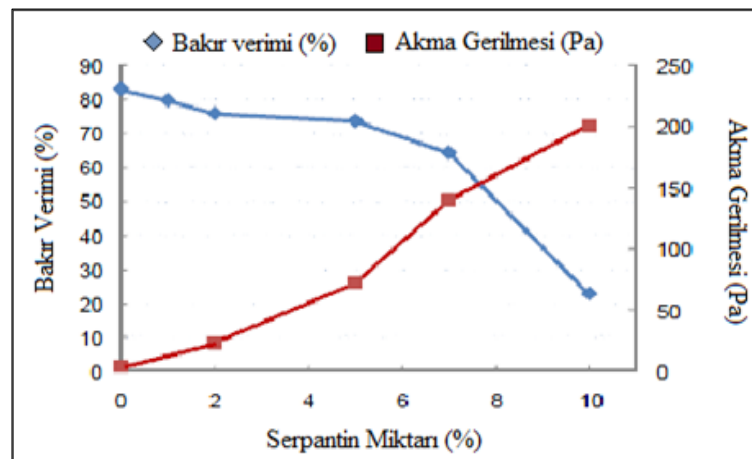
Pülpün reolojisi; tane boyutuna ve dağılımına, tane şekline, katı içeriğine, pülp kimyasına ve tanelerin yüzey özelliklerine bağlıdır. Pülpün reolojik davranışı, özellikle flotasyonda verimi önemli derecede etkilemektedir (Kılıçkaplan, 2009).

Bazı araştırmalar pülpün reolojik özellikleri ve flotasyon performansı arasındaki güçlü ilişkiye işaret etmişlerdir. Shabalala ve ark. (2011) katı oranının artması ile kabarcık boyutundaki azalmayı pülpün akma gerilmesinin yüksekliğine bağlamıştır. Patra ve ark. (2012), flotasyon pülpünde bulunan ve pülp viskozitesindeki artışla geniş bir ağ yapısı oluşturan lifli minerallerden nikel minerallerinin seçimli ayrılması üzerine pülp reolojisinin önemli etkisi olduğunu, diğer taraftan bu minerallerin kaba flotasyonu için yüksek viskozitenin faydalı olduğunu belirtmiştir.

Bilindiği gibi hücre içerisindeki türbülans kabarcık-tane çarpışma ihtimalini artırmaktadır. Pülp viskozitesinin artışı, hücrenin türbülans bölgesinde karıştırıcıyı çevreleyen küçük türbülans boşluklarının oluşmasını sınırlayarak gaz dispersiyonunda belirleyici etkiye sahiptir (Bakker ve ark., 2009; Shabalala ve ark., 2011). Ayrıca artan pülp viskozitesi ile köpük kararlılığında artış ve kabarcıktan ayrılma olmasında azalma olduğu Xu ve ark. (2011) tarafından doğrulanmıştır. Pülp viskozitesinin artışıyla pervaneyi çevreleyen küçük türbülans boşluğunu yani flotasyon hücresinin türbülans bölgesinin sınırları boyunca oluşan gaz dağılımı üzerine zararlı etkiler göstermektedir (Bakker ve ark., 2009; Shabalala ve ark., 2011; Forbes ve ark., 2014).

Forbes ve ark. (2014) kil içerikli kalkopiritin yüzdürülmesinde flotasyon verimindeki düşüşü kalkopirit tanelerinin şlamla kaplanma miktarının artmasıyla ilişkilendirmiş, ayrıca pülp viskozitesinin artması ile hidrofobik tanelerin kabarcığa tutunma ihtimalinin azalması sonucu flotasyon veriminin düştüğünü ifade etmiştir.

Şekil 2.15'te porfiri bakır cevherine serpantin eklenmesiyle bakır verimindeki düşüş ve pülp akma gerilmesindeki artış görülmektedir. 0-75 Pa akma gerilmesi değerlerinde, 75 Pa üzerindeki akma gerilmelerine göre daha az diklik gözlenmektedir. Bu da göstermektedir ki, reolojik davranış değişen oranlarda mineral verimini etkilemektedir (Patra ve ark., 2011).



Şekil 2.15. Porfiri bakır cevherine serpantin ilavesinin bakır flotasyon verimine etkisi (Patra ve ark., 2011)

Xu ve ark. (2012) kabarcık-tane adsorpsiyonunun daha kararlı hale getiren belirli bir miktarda gliserol ilave edilmesiyle artan ortam viskozitesinin kontrol edilmesi sonucu, iri tanelerin kazanımının arttığını göstermiştir. Ayrıca pülp viskozitesinin kabarcık-tane adsorpsiyonu üzerindeki gerilim kuvvetlerinin miktarı ve kabarcık-tane kararlılığını doğrudan kontrol eden anahtar bir parametre olduğunu ifade etmiştir.



Kaolin 1:1 alümina silika tabakalı yapısıyla şişmeyen bir kil mineralidir ve düşük kimyasal reaktiviteye sahiptir. Montmorillonit ise 2:1 alümina silika tabakalı yapıya sahip simektit grubu bir kil mineralidir. Bu nedenle jele benzeyen viskoz bir yapı oluşturan ince kil tanelerinin salkımlaşması ve yüksek oranda şişmesinden dolayı düşük konsantrasyonda bile kayda değer miktarda akma gerilmesi sergilemektedir (Zhang ve Peng, 2015).

### 2.3. Kil Minerallerinin Olumsuz Etkilerinin Kontrolü

Literatürden anlaşıldığı gibi, kil minerallerinin flotasyonu etkileme mekanizması; kil mineralinin cinsine ve cevhere bağlıdır. Kil minerallerinin flotasyon üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için geliştirilen yaklaşımlar;

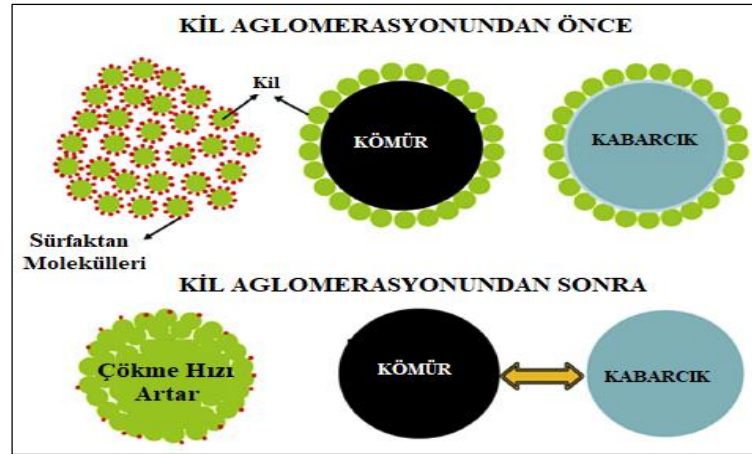
- i) Flotasyon öncesi kil minerallerinin uzaklaştırılması,
- ii) Viskozite düzenleyicilerin kullanılması,
- iii) Köpük içerisinde mekanik taşınan kil tanelerinin yıkanarak uzaklaştırılması,
- iv) Düşük hava hızlarında çalışılması,
- v) Özel köpürtücüler kullanılması (halka tipi köpürtücüler kil varlığında daha az hassas) (Bulatovic, 2007),
- vi) Kil bağlayıcılarının (bir grup özel ve düşük molekül ağırlıklı polimerler) kullanılması (Tao ve ark., 2010; Zhang ve Peng, 2015) ve
- vii) Farklı tür bastırıcı veya dağıtıcılar kullanılması olarak özetlenebilir.

Flotasyon öncesi kil minerallerinin zararlı etkilerini azaltmak için tesislerde uygulanan bir metot cevherin yıkanarak ve ince tanelerden arındırılarak flotasyon işlemine girişini engellemektir. Bu işlemi uygulamayan tesisler, ilk olarak flotasyon devresinde ve daha sonra tikiner ve filtrasyon ünitelerinde ciddi sıkıntılarla karşılaşabilmektedir. Fakat kil fraksiyonları hayli miktarda değerli mineral içerebilmektedir (Bayraktar, 2014). Bu yöntem şlam olarak atılan boyut grubu içinde değerli mineral miktarının göreceli olarak ihmal edilebilir düzeyde olmasıyla uygulanabilmektedir. Ancak serbestleşme çok ince boyutlarda gerçekleştiğinde, şlam uzaklaştırma işlemi kabul edilemez bir oranda değerli mineral kaybına neden olduğundan bir çözüm yolu olarak düşünülmemektedir (Çilek, 2006).

Kabarcıklar arasındaki besleme suyunun pülp içine yeterince akabilmesi için yeterli bir süre köpüğün bekletilmesi konsantreye gelen besleme suyunun miktarını dolayısıyla mekanik taşımayı azaltmaktadır. Bu durum, ancak köpük akış hızının azaltılması veya köpük derinliğinin artırılması ile mümkün olmaktadır. Bununla birlikte köpük derinliğinin artırılmasının veya köpük akış hızının azaltılmasının en önemli sakıncalarından birisi, köpük bölgesinde kabarcık birleşmesi olayının artmasıdır. Köpük bölgesinde kabarcıkların aşırı oranda birleşerek daha iri boyutta yeni kabarcıklar oluşturması, kabarcıklara yapışmış değerli minerallerin de pülp bölgesine geri dönmesine ve dolayısıyla verimin düşmesine neden olmaktadır.

Köpük akış hızını artıran en önemli değişken hücreye beslenen hava akış hızıdır. Düşük hava akış hızı kullanıldığında, iki önemli gerekçe ile mekanik taşımanın azalması beklenmektedir. Bunlardan ilki köpük bölgesinde oluşan köpük hacminin göreceli olarak azalmasından dolayı oluşan köpüğün akış hızındaki azalmanın bir sonucu olarak mekanik taşımanın azalmasıdır. İkincisi ise, hava akış hızı azaldığında doğal olarak pülp içindeki karışım azalacağından hücre içindeki akış rejiminin daha düşük Reynold sayısı değerinde olması ve böylece pülp-köpük ara yüzeyinde oluşan dalgalanmanın azalması sayesinde, pülp bölgesinden köpük bölgesine olan ince boyutlu tane geçişinin yani mekanik taşımanın azalmasıdır. Bu nedenle flotasyon tesislerinde hava akış hızı ve köpük derinliği oldukça önemli kontrol değişkenleri arasında yer almaktadır (Çilek, 2006).

Bağlayıcılar killeri topaklayarak, kabarcık ve tanelerin yüzeylerini temizleyerek ve yüzey aktif madde adsorpsiyonunu azaltarak, gang bastırmada önemli rol oynamaktadır. Kil bağlayıcıların iki ana adsorpsiyon mekanizması; dipol-dipol etkileşimi ve güçlü hidrojen bağıdır. Amfiprotik (proton alabilen ve verebilen) karakteristiklerinden, çok yönlü bağ oluşturmasından dolayı bağlayıcılar çok seçici olabilmektedir (Zhang, 2013). Şekil 2.16'da görüldüğü gibi kil aglomerasyonundan önce killer tek başlarına buldukları zaman, geniş yüzey alanlarından ve ince boyutlarından ( $<1\mu\text{m}$ ) dolayı flotasyonun gerçekleşmesi için eklenen reaktifleri üzerine adsorbe etmektedir. Ayrıca elektrostatik etkileşimden dolayı değerli mineral ve köpük yüzeyine adsorbe olarak şlam kaplamaya sebep olmaktadır. Kil bağlayıcıları (kil aglomerasyonundan sonra), kil tanelerini aglomere ederek bastırmakta ve kil minerallerinin yüzey alanlarını azaltarak, tane ve kabarcık yüzeylerini temizlemektedir (Aksoy ve Yarar, 1989).

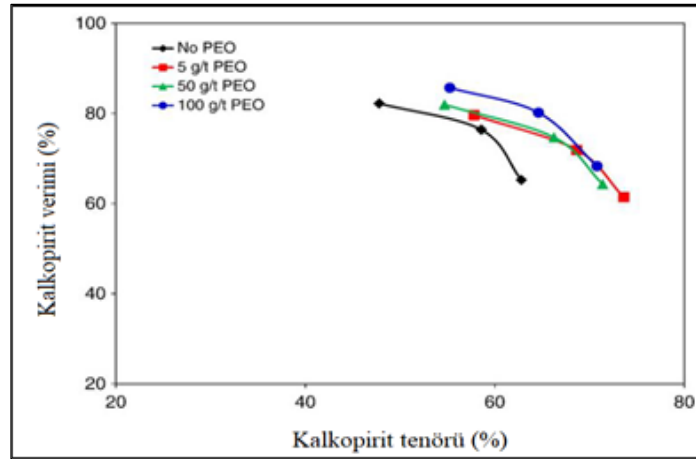


Şekil 2.16. Kil aglomerasyonu ile tane ve kabarcık yüzeyindeki şlam kaplamasının uzaklaştırılması (Tao ve ark., 2010)

Tao ve ark. (2010) ince boyuttaki kömür flotasyonunda, kil bağlayıcıların flotasyona etkisini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre %19 küllü kömürden %8-8,5 küllü ve %97-98 yanabilir verimli temiz kömür elde edilmiştir. Ayrıca, verim karıştırma hızına bağlı olarak %15-30 kadar artmıştır. Kou ve ark. (2012) kil bağlayıcılar kullanarak fosfat flotasyonunu iyileştirmek için yaptıkları çalışmada, fosfat veriminde %5'lik bir artış elde etmiştir. Buna ek olarak, konsantre tenörü %1,5 oranında artmıştır. Cao ve Liu (2006) ve Liu ve ark. (2006) yaptıkları araştırmada ince tanelerin taşınmasının hem inorganik bastırıcılarla ince gang minerallerini topaklayarak, hem de yüksek molekül ağırlıklı polimerlerle salkımlaştırarak azaldığını göstermiştir.

Gong ve ark. (2010) ise yüksek molekül ağırlıklı PEO (polietilen oksit) ile kalkopirit-kuvars karışımının flotasyonunda kuvarsın mekanik taşınmasını azalttığını (Şekil 2.17) ve düşük PEO ilavesiyle, flotasyon sırasında konsantre tenör ve veriminin arttığını belirlemiştir. PEO kullanımının, kuvarsın mekanik taşınmasını azaltarak, kalkopirit tenöründe bir artış gösterdiği görülmektedir. Liu ve Peng (2014) kaolinin çeşme suyunda ve tuzlu suda taşınmasını incelediği çalışmada, taşınma tuzlu suda daha yüksek bulunmuştur. Çeşme suyunda PEO ilavesi ile kaolin taşınması tanelerin köprüleme kabiliyeti ile salkımlar oluşturarak önemli derecede azalmıştır.

Seçimli olmayan ve konsantre kalitesinin önemli oranda düşmesine neden olan şlam kaplama ve topaklanma, pülpün flotasyona hazırlanması sırasında kullanılacak dağıtıcılar yardımıyla azaltılabilmektedir (Çilek ve ark., 2009). Seaman ve ark. (2012) ve Wei ve ark. (2013) kil minerallerinin flotasyondaki olumsuz etkilerini azaltmak için lignosülfonat türü polimerik dağıtıcılar kullanmıştır. Karboksilik asit ve lignosülfonat bazlı F-100 biyopolimeri ile kil minerallerinin bakır-altın flotasyonu üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmasında olumlu sonuçlar elde edilmiştir.



**Şekil 2.17.** Kalkopirit-kuvars yapay karışımlarının kaba flotasyonunda PEO'nun kalkopirit verim-tenör ilişkisine etkisi (Gong ve ark., 2010)

Değersiz mineral olarak silikat ve karbonat minerallerinin bulunduğu cevherlerin flotasyonunda, bu minerallerin bastırılması için cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) oldukça yaygın bir kullanıma sahiptir. Aynı zamanda etkin bir dağıtıcı kimyasaldır. Alkalilik kontrol edildiği sürece sodyum silikat bu amaçla, etkili olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Kimyasal bileşimi değişebilen sodyum silikatın, bir bastırıcı olarak mı yoksa dağıtıcı olarak mı etki yapacağı modül sayısı olarak da bilinen  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı ile belirlenmektedir (Çilek, 2006).

Flotasyon öncesinde pülp içindeki ince tanelerin topaklanmasının ve şlam kaplamasının önlenmesi için, dağıtıcı etkisi olan polifosfat bileşikleri kullanılabilir. Ticari olarak calgon adı ile tanınan sodyum heksametafosfat pülp içindeki  $\text{Ca}^{+2}$  ve  $\text{Mg}^{+2}$  iyonları ile karmaşık iyonlar oluşturarak, bu iyonların tanelerin etrafındaki elektriksel çift tabakayı inceltme yönündeki etkilerini en aza indirerek topaklanmayı ve şlam kaplamayı önlemektedir. Bu etkileri sayesinde, benzer metal iyonlarının hedef mineral dışındaki mineralleri canlandırmasına da engel olmaktadır (Çilek, 2006).

Şlam tanelerine dağıtıcıların adsorpsiyonu genellikle bu tanelere daha da eksi yük kazandırmakta ve agregasyona karşı şlam kararlı hale gelmektedir. Böylelikle flotasyonda seçimlilik artmaktadır. Cevher hazırlamada genellikle kullanılan dağıtıcılar; sodyum silikat, sodyum heksametafosfat, dekstrin, karboksi metil selüloz (CMC), tannik asit ve linyosülfonat vb. gibidir. Birçok dağıtıcı taneler arasında elektrik yüklerini artırarak güçlü elektrostatik itme kuvveti oluştururken, ayrıca sterik stabilizasyon ile dağıtım sistemi kararlı hale gelmektedir (Laskowski ve Pugh, 1992; Kılıçkaplan, 2009).

Jorjani ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada, farklı özellikte ve miktarda alüminasilikat mineralleri içeren bakır cevherinin flotasyonunda, alüminasilikatların nasıl etkilediğini belirleyerek bu istenmeyen etkiyi nasıl azaltacaklarını laboratuvar ortamında araştırmıştır. Bastırıcı olarak dekstrin, dağıtıcı olarak ise sodyum silikat ve sodyum heksametafosfat karışımıyla yapılan flotasyonda bakır verimi artarken, konsantredeki %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiO<sub>2</sub> değerleri ise düşmektedir.

#### 2.4. Siirt Madenköy Zenginleştirme Tesisi ve Kalkopirit Flotasyonu

Siirt-Madenköy bakır sahası 1970'li yıllarda Maden Tetkik Arama (MTA) Enstitüsü tarafından tespit edildikten sonra, sahada detaylı araştırma ve incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda sahanın jeolojisi, jeofizik durumu, jeoteknik ve yeraltı su etütleri araştırılarak 61 adet sondaj (16895 m) yapılmıştır. Siirt-Madenköy bakır sahasında MTA tarafından yapılan detaylı araştırmaya göre, görünür rezerv 24 milyon ton ve işletilebilir rezerv 14 milyon tondur. 1979 yılında Etibank'a devredilen saha, 1984 yılında Preussag-Alarko (Almanya) firmasına devredilmiştir. Metal fiyatlarının düşmesi nedeni ile firma sahadan çekilmiştir (Eşgün, 2006).

Ocak 2004 tarihinde yapılan ihale sonucunda, Siirt-Madenköy bakır madeninin ruhsat hakkı Ciner Grubu tarafından devir alınmıştır. Kasım 2016 tarihinde madenin açık işletme sahasında meydana gelen heyelandan dolayı üretim durmuştur. 2017 yılında saha Cengiz Holding'e devredilmiştir. Bakır madenciliği açık ve kapalı işletme yöntemleriyle yapılırken, kalkopirit cevherinin zenginleştirilmesi ile bakır kazanılmaktadır. %0,5-1 Cu tenörlü cevher flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmektedir. Bu işlemlerde cevherdeki bakır %80 verimle zenginleştirilerek %15-25 Cu içeren konsantre bakır elde edilmektedir (Ünal ve ark., 2016).

Bakır mineralleri arasında sülfürlü olarak; kalkopirit (CuFeS<sub>2</sub>), kalkosit (Cu<sub>2</sub>S), kovellit (CuS), bornit (Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>), oksitli olarak ise kuprit (Cu<sub>2</sub>O), malahit (Cu<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub>) ve azurit (Cu<sub>3</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>) bulunmaktadır. Kalkopirit dünyada bulunan en yaygın bakır cevheridir (Baba ve ark., 2012).

Sülfürlü mineraller bakır, kurşun, çinko gibi baz metallerin ana kaynağıdır. Sülfürlü cevher yataklarında genellikle iki veya daha fazla sülfürlü mineral bazen çok karmaşık bir mineralojik yapı içerisinde bulunmaktadır. Kalkopirit (CuFeS<sub>2</sub>), sfalerit (ZnS), galen (PbS) gibi ekonomik değeri olan mineraller sülfürlü gang minerali olarak pirit ve silikatlar ile beraber yer almaktadır.

Kalkopirit ve pirit doğada kompleks sülfürlü cevherlerde en çok bulunan ve kimyasal yapıları, yüzey özellikleri ve dolayısıyla flotasyon davranışları birbirinden farklı olan minerallerdir. Kalkopirit, bakır elde edilmesinde kullanılan ekonomik değeri yüksek bir mineral iken, pirit kompleks sülfürlü cevherlerde en çok bulunan, ancak ekonomik değeri olmayan bir mineraldir. Değerli sülfürlü minerallerin birbirlerinden ve piritten yüksek verimde seçimli olarak ayrılması flotasyon işlemi ile gerçekleştirilmektedir (Ekmekçi ve ark., 2006).

Pirit bir demir minerali olmasına karşın, yüksek kükürt içeriği nedeniyle doğrudan yüksek fırında kullanılamamaktadır ve pek fazla kullanım alanı olmaması nedeniyle düşük ekonomik değere sahip pirit konsantresi Türkiye ve birçok ülkede genellikle sülfürik asit üretiminde kullanılmaktadır (Bulut, 1999). Piritin flotasyon davranışı, pülpün pH değerinden etkilenmekte ve kireç piritin etkili bastırıcısı olarak tercih edilmektedir.

Sülfür minerallerinin flotasyonunda en çok kullanılan toplayıcılar, tiyol veya sülfihidril toplayıcılar olarak adlandırılan ksantatlar, dialkil ditiofosfinatlar ve dialkil ditiofosfattır. Çoğu zaman bu toplayıcılar belirli oranda karıştırılarak da kullanılmaktadır. Toplayıcıların mineral yüzeyleri üzerindeki ana etkileşim mekanizması; kimyasal adsorpsiyon, fiziksel adsorpsiyon veya bu ikisinin kombinasyonudur. Toplayıcıların polar kafası bir mineral yüzeyine adsorbe olurken, karbon zinciri kabarcık-tane yapışması için gerekli hidrofobikliği sağlamaktadır (Sihvonen, 2012).

Ksantatlar her ne kadar sülfür flotasyonunda sıklıkla tercih edilen tiyol türü toplayıcı olsa da, Fe-sülfürlere ve sfaleritlere karşı seçimliliğin gerekli olduğu kalkopirit flotasyonunda öncelikli olarak ditiyofosfat (DTP) ve ditiyofosfinat (DTPI) kullanılmaktadır. DTPI yapısal olarak DTP'ye benzer, ancak DTP'den oldukça farklı olan toplayıcı özelliklerine sahiptir. DTPI'nin metal kompleksleri, DTP'den daha karardır. Ditiyofosfat ve ditiyofosfinat arasındaki fark, fosfor atomunun hidrokarbon grubuna doğrudan bağlanması ile oluşmaktadır (Güler ve ark., 2006).

Sodyum diizobütil ditiyofosfinat (DTPiNa) bakır, kurşun ve çinko sülfürler için pirit seçimli bir toplayıcı reaktif olarak bilinmektedir. Son zamanlarda yapılan araştırmalarda, DTPiNa'nın, pirit içeren masif sülfür bakır-nikel cevherinin flotasyonu altında etkili bir toplayıcı olduğu bulunmuştur (Chanturia ve ark., 2009).

Köpürtücüler; yüzey gerilimini azaltarak, küçük kabarcık oluşumu sağlayarak, hava kabarcıklarını pülpte iyi dağılmış halde kalmalarını ve kabarcıkların patlamadan hücreden çıkarılabilecek şekilde kararlı kalmalarını sağlayan bileşiklerdir. En sık kullanılan köpürtücüler alkollerdir. Alifatik alkollere dayanan birçok endüstriyel köpürtücü arasında, metil izobütil karbinol (MIBC); güçlü bir köpüklenme, mükemmel çözünürlük ve kararlılık nedeniyle en popüler köpürtücüdür (Le ve ark., 2012). Düzenleyiciler, toplayıcıların mineral yüzeylerine adsorpsiyonunu etkileyen kimyasallardır. Seçilen bir mineral üzerine toplayıcı adsorpsiyonunu artırabilmekte (canlandırıcılar) veya toplayıcıların bir mineral üzerine adsorbe olmasını önleyebilmektedir (bastırıcılar).

## 2.5. İstatistiksel Deney Tasarım Yöntemi

Deney tasarımı en az sayıda deneyle maksimum bilgi elde etmek için kullanılan bir deney planlama yöntemidir. Deneysel çalışmalar klasik yöntem ve istatistiksel yöntemler olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Klasik (geleneksel) yöntem ile yapılan deneysel çalışmalarda, her denemede bir bağımsız değişkenin değeri değiştirilmekte ve diğerleri sabit tutulmakta, her seferde tek bir parametre incelenmektedir. Ayrıca bu yöntem ile yapılan çalışmalarda parametreler arası etkileşim göz ardı edilmekte ve çok zaman gerektirdiği için daha pahalıya mal olmaktadır. İstatistiksel yöntemler ise birçok farklı tasarımları içermektedir.

Kullanılacak tasarım ise; yapılacak çalışmanın niteliği, etkisi incelenecek faktörler, süre-bütçe gibi kısıtlamalara bağlı olarak değişmektedir. Bu yöntem kullanılarak yapılan modelleme ile iyileştirme sağlanırken, aynı zamanda malzeme, işçilik ve zamandan tasarruf edilmektedir. İstatistiksel deney tasarımlarında en çok geçen kavramlar; faktör, seviye ve yanıt değişkenidir. Süreç üzerinde etkisi olabilecek ve kontrol edilebilir bağımsız değişkenler “faktör”, bu değişkenlerin aldığı değerler ise “seviye” olarak adlandırılmaktadır. Yanıt değişkeni ise, süreç sonunda elde edilen ve faktörlere bağlı değer alan değişkendir (Sağol, 2015).

Deneysel çalışmaların tasarlanması, optimizasyonunda kullanılan tasarım türleri, uygun bir yazılıma sahip paket programlar yardımıyla oldukça anlaşılır ve kolay hale gelmektedir. Söz konusu yazılımlar oldukça fazladır ve ihtiyaca göre düzenlenmiş yanıt yüzeyi yöntemlere sahiptir. Bunlardan bazıları; faktöriyel tasarım, merkezi kompozit tasarımı, Box-Behnken tasarımı, 3 düzeyli tasarım şeklinde sıralanabilir (Kökkılıç, 2011).

Cevap Yüzeyi Yöntemleri'nden Merkezi Kompozit Tasarım ile tasarlanan deneyler aşağıdaki adımları içermektedir (Azizi, 2015);

- a. Çalışmanın yeterli ve güvenilir bir şekilde ölçülmesi için bir dizi deney tasarlanması,
- b. İkinci dereceden matematiksel bir modelin geliştirilmesi,
- c. Maksimum veya minimum yanıt değeri üreten en uygun deneysel parametre setinin belirlenmesi,
- d. Deney parametrelerinin iki ve üç boyutlu grafiklerle doğrudan ve etkileşimli etkilerinin gösterilmesi.

Deney tasarımı uzun bir süreçten oluşmakta ve tasarımın uygulanmasında izlenecek 1. yol problemin tanımlanmasıyla başlamaktadır. Değişkenler ve seviyeler belirlendikten sonra yanıt değişkenler belirlenmektedir. Uygun tasarım seçimi yapılarak, deneyler yapılmakta ve elde edilen verilerin istatistiksel açıdan değerlendirilmesi için genellikle; SPSS, MATLAB, MINITAB, DESIGN EXPERT kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, istatistiksel analize bağlı olarak yorumlanmakta ve analiz sonuçları grafikler üzerinden yorumlanarak sonuca ulaşılmaktadır.

Oluşturulan modellerin deneysel verileri ne ölçüde karşıladığı varyans analizi (ANOVA) ile belirlenmektedir. Varyans analizi özellikle çok parametrelili ve çok seviyeli modellerde kullanılan bir analizdir ve deney sonuçlarının tamamının toplu olarak yorumlanmasını sağlamaktadır. Varyans analizi iki veya daha fazla ortalama arasındaki farkın anlamlı olup olmadığı ile ilgili hipotezi test etmek için kullanılmaktadır.



### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. Malzeme

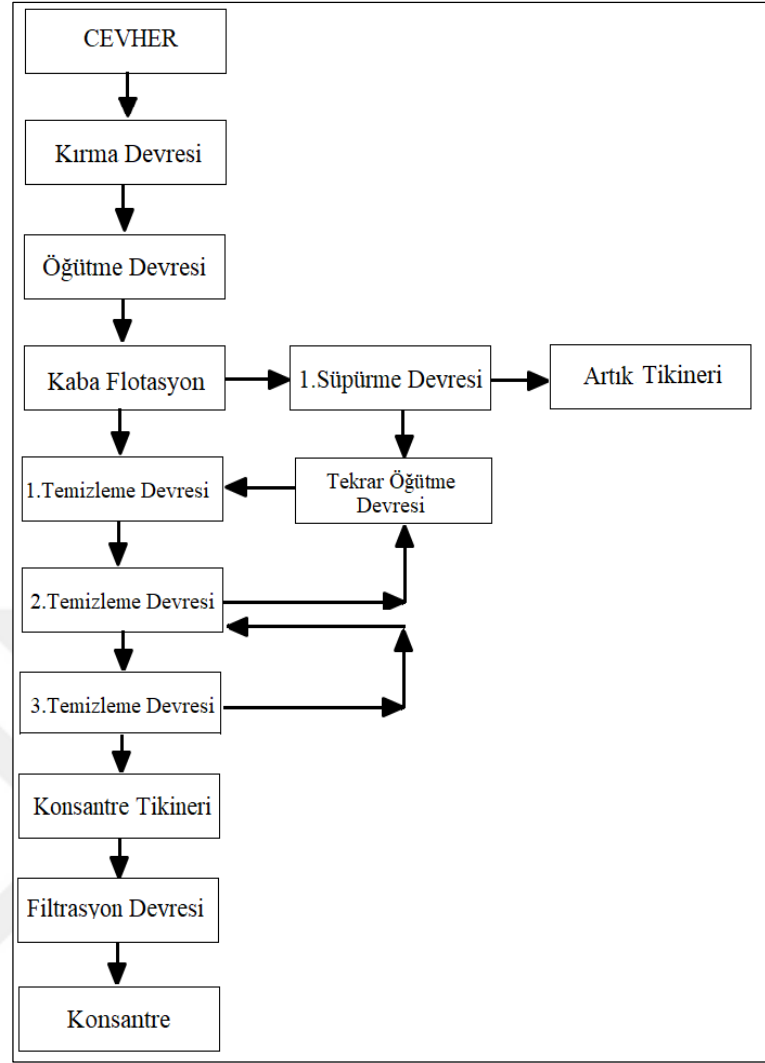
##### 3.1.1. Sülfürlü cevher numunesi

Bu çalışmada kullanılan sülfürlü cevher numunesi Güneydoğu Anadolu bölgesinde, Siirt ilinin 48 km kuzeydoğusunda, Şirvan ilçesine bağlı Madenköy mevkinde kurulmuş bir zenginleştirme tesisinden temin edilmiştir (Şekil 3.1). Coğrafi olarak dağlık bir yapıya sahip olan yörede tesis, maden yatağının hemen yanında vadi içerisinde düz bir arazide kurulmuştur. Ocaktan gelen cevher stok sahasına taşınmakta, boyut küçültme, sınıflandırma, kondüsyonlama işlemlerinden sonra cevher flotasyon hücrelerine beslenmektedir. Flotasyon devresinde, kaba flotasyon sonrası 3 temizleme ve 3 süpürme flotasyonu uygulanarak nihai konsantre elde edilmektedir (Şekil 3.2).



Şekil 3.1. Tesisin yer bulduru haritası ve Siirt Madenköy'ün uydu görüntüsü

Tesis çalışanlarıyla yapılan ön görüşmede zenginleştirme sırasında tesiste kil problemi kaynaklı sıkıntılar bulunduğu ifade edilmiştir. Tesise beslenen cevherdeki kil içeriği düştüğü zaman bakır tenörü %1-2 iken, elde edilen bakır konsantre tenörü de %20-21 civarındadır. Kil içeriği yükseldiği zaman besleme tenörü %0,5-1'lik Cu'a kadar düşmekte ve bakır konsantre tenörü de %15-18 arasında değişmektedir. Tesiste kil probleminin çözümüne yönelik olarak sodyum silikat kullanılmakta ve temizleme devresiyle konsantre tenörü artırılmaktadır. Kil içeriğinin artmasıyla birlikte sodyum silikat kullanımı da artmaktadır.



Şekil 3.2. Flotasyon tesisi akım şeması

Kil içerdiği XRD analizi ile belirlenen cevherden, iki farklı özellikte numune alınmıştır. Temas açısı ve zeta potansiyeli ölçümlerinde kil minerallerinin etkisinin belirlendiği deneylerde ve yapay cevher modellerinin oluşturulmasında kullanılan yüksek tenörlü parça cevher numuneleri elle toplanmıştır. Tesise yönelik çözüm önerileri sunabilmek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere temin edilen düşük tenörlü tesis numunesi ise hidrosiklonların üst akımından, reaktifler ilave edilmeden önce, %30 katı içeren pülpten alınmıştır.

75 kg düşük tenörlü ve 75 kg yüksek tenörlü olmak üzere toplam 150 kg numune, deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Konya Teknik Üniversitesi Cevher Hazırlama laboratuvarına getirilmiştir. Parça numune çeneli kırıcıda kırılarak, konileme ve dörtleme işlemi yapılmış ve numunenin 1/3'ü arşiv numunesi olarak paketlenmiştir. Diğer 2/3'ü ise 1 mm altına kırılmış flotasyon deneylerinde kullanılmak üzere uygun boyutta öğütülmüştür. Öğütülen numune 3 kg'lık poşetlere konulmuş ve torbalama numunenin hava ile temasını önleyecek şekilde yapılarak numunenin oksidasyonu önlenmiştir.

Tesisten temin edilen düşük tenörlü tüvenan cevher %0,70 Cu içerirken, yüksek tenörlü numune %2,63 Cu içermektedir. Cevhere ait ICP analizi sonuçları (Bureau Veritas Mineral Ankara laboratuvarı MA270 yöntemi) Çizelge 3.1-3.2'de verilmiştir. Cevherin piknometre ile belirlenen yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$ 'tür.

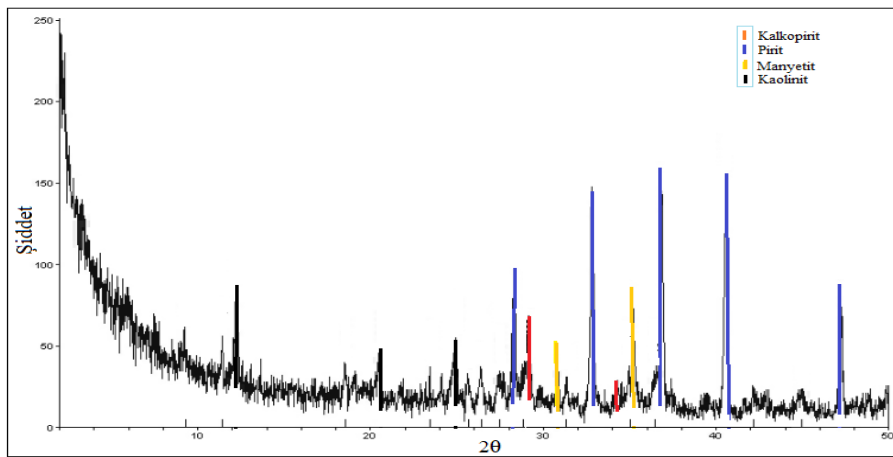
**Çizelge 3.1.** Yüksek tenörlü Siirt-Madenköy cevherine ait kimyasal analiz sonuçları

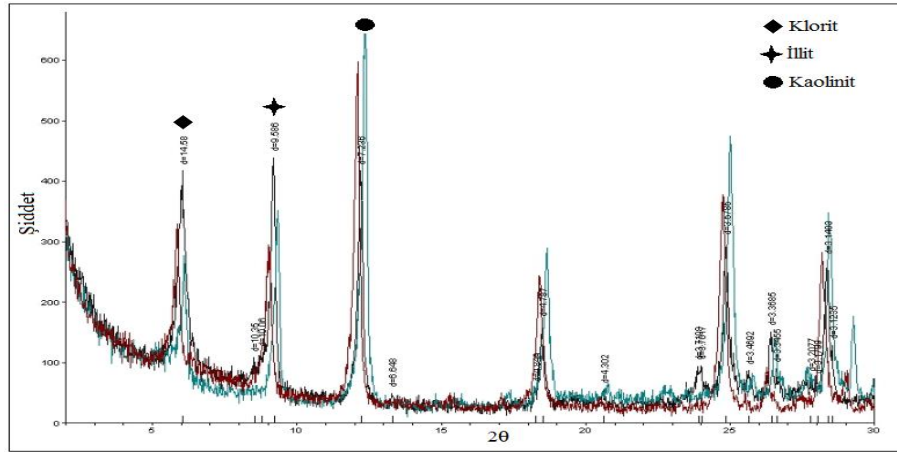
Element	İçerik (%)	Element	İçerik (g/t)
Cu	2,63	Se	71,0
Fe	38,38	Sr	53,0
S	>30	V	43,0
Zn	0,65	Cd	36,7
Pb	0,21	Bi	33,9
Al	1,21	Zr	23,3
Mg	0,79	Ag	22,6
Ca	0,52	Rb	7,6
Na	0,24	W	5,4
K	0,16	Sn	4,6
Ti	0,13	Y	3,9
As	0,08	Li	2,7
Co	0,05	Sc	2,0
Mn	0,02	Nb	1,9
Ba	0,02	U	0,7
Cr	0,02	La	0,5
Ni	0,02	Be	<0,5
Mo	0,01	Ta	<0,5
Sb	0,01	Ce	<0,5
P	0,01	Th	<0,5

**Çizelge 3.2.** Düşük tenörlü Siirt-Madenköy cevherine ait kimyasal analiz sonuçları

Element	İçerik (%)	Element	İçerik (g/t)
Cu	0,70	Hf	0,5
Fe	43,93	Sr	13
S	>30	V	19
Zn	0,022	Cd	1
Pb	0,009	Bi	19,4
Al	0,77	Zr	15,9
Mg	1,32	Ag	2,5
Ca	0,42	Rb	1,6
Na	0,10	W	4
K	0,05	Sn	1,3
Ti	0,087	Y	2,4
As	0,019	Li	2,8
Co	0,049	Sc	2
Mn	0,024	Nb	1,5
Ba	0,004	U	0,5
Cr	0,012	La	1
Ni	0,01	Be	<5
Mo	0,008	Ta	<0,5
Sb	0,002	Ce	<5
P	0,02	Th	<0,5

Düşük tenörlü cevherin Hacettepe Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde XRD ile kil fraksiyon analizi yaptırılmıştır (Şekil 3.3-3.4). Yarı nicel XRD analizleri sonucunda cevherin; kaolinit, illit ve klorit türü kil mineralleri ile kalkopirit, pirit ve manyetit içerdiği saptanmıştır. Baskın kil minerallerinin %47 kaolinit, %32 illit ve %21 klorit olduğu belirlenmiştir.

**Şekil 3.3.** Siirt-Madenköy cevherinin XRD grafiği



Şekil 3.4. Siirt-Madenköy cevherinin yarı nicel XRD grafiği

### 3.1.2. Kil mineralleri

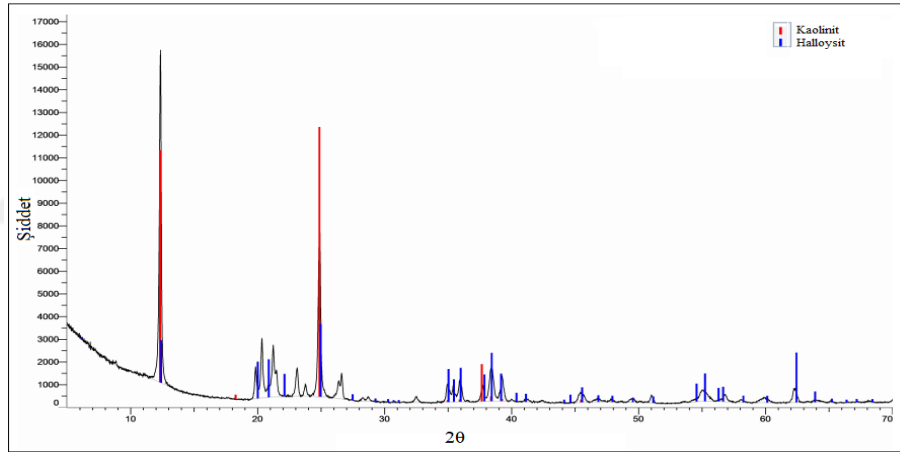
Tesiste zenginleştirilen cevher, kaolin ve illit türü kil mineralleri içermektedir. Ancak bunların yanı sıra farklı yapısal özelliklere sahip olmalarından (kasyon değişim kapasitesi, şişme özelliği, farklı kristal yapısı) ve genel olarak sülfürlü metal cevherlerinde en fazla bulunan kil minerallerinden birisi olmasından dolayı, deneysel çalışmalarda yapay karışım oluştururken montmorillonit türü kil minerali kullanılması da uygun görülmüştür.

Yapay karışım hazırlamak için kullanılacak olan kil mineralleri; kuru zenginleştirilmiş kaolin Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler Sanayi ve Tic. A.Ş.'den, illit Konya bölgesinde bulunan bir kil ocağından ve montmorillonit (sodyum montmorillonit) Karakaya Bentonit Sanayi Ticaret A.Ş.'den temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan kil minerallerine ait ICP analizi sonuçları (Bureau Veritas Mineral Ankara laboratuvarı LF300 yöntemi) literatürle uygunluk göstermektedir (Çizelge 3.3).

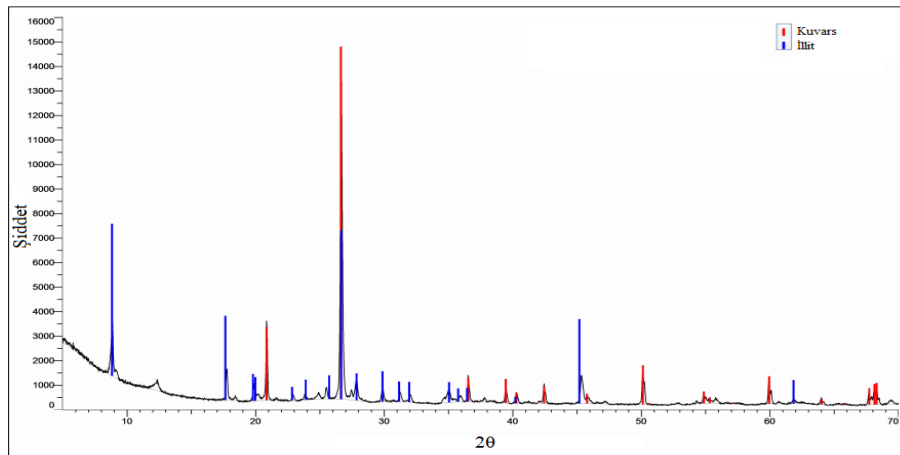
Kil minerallerinin, Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde Bruker D8 Advance X-Işını Difraktometresi cihazı ile yaptırılan analiz sonuçlarına göre; kaolinde ana mineral olarak kaolin bulunduğu ve ayrıca kaolin grubu kil minerallerinden olan halloysit de içerdiği belirlenmiştir (Şekil 3.5). İllitin kuvars içeriğinin yüksek olmasından dolayı illit piklerinin yanında kuvars pikleri içerdiği (Şekil 3.6) ve montmorillonitte ise piklerin iki farklı kimyasal bileşime sahip montmorillonit pikleri ile uyduğu görülmektedir (Şekil 3.7).

Çizelge 3.3. Kaolin, illit ve montmorillonite ait kimyasal analiz sonuçları

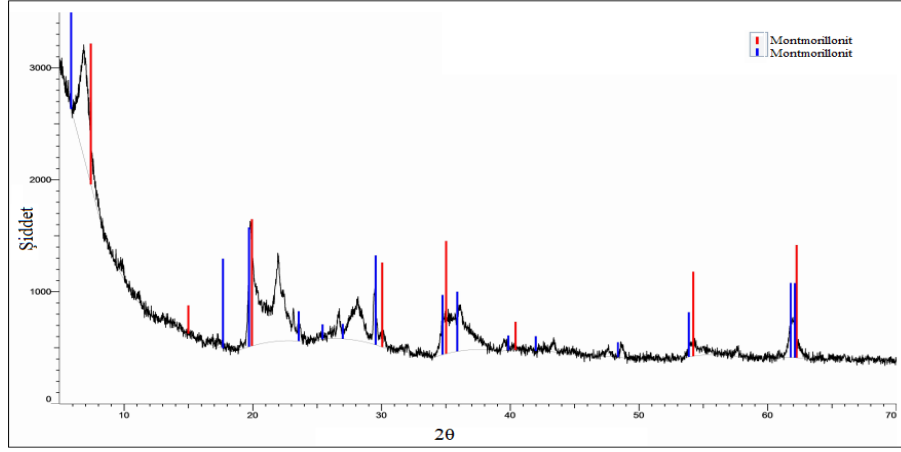
Element/ Mineral	İçerik (%)		
	Kaolin	İllit	Montmorillonit
SiO <sub>2</sub>	46,86	63,77	57,67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,54	23,51	16,45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,37	0,74	3,5
MgO	0,07	0,36	1,83
CaO	0,08	0,14	3,25
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,89	2,42
K <sub>2</sub> O	0,39	3,34	1,01
TiO <sub>2</sub>	0,77	1,08	0,31
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,13	0,13
MnO	<0,01	<0,01	0,11
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,014	0,021	<0,002
Ba	0,007	0,047	0,054
Zr	0,01	0,036	0,022
Sr	0,002	0,039	0,074
Y	0,001	0,003	0,002
Nb	0,002	0,003	0,001
Sc	0,001	0,001	0,001
KK	13,8	5,8	13,1



Şekil 3.5. Kaolinin XRD grafiği



Şekil 3.6. İllitin XRD grafiği

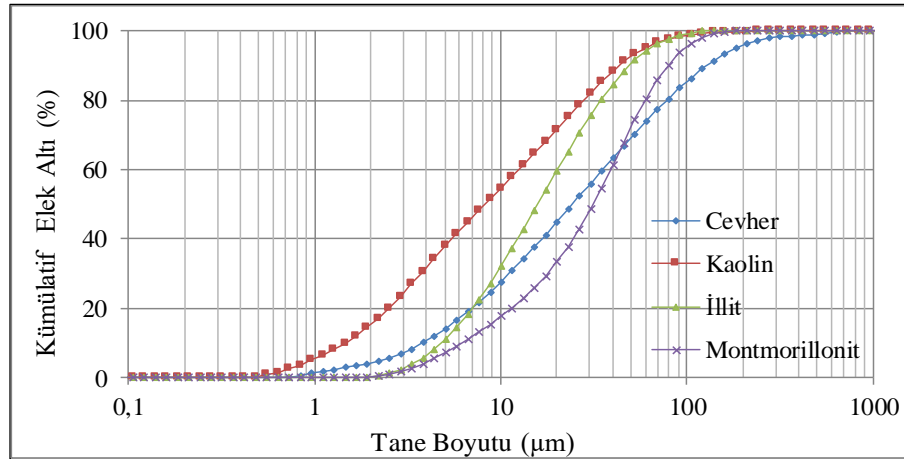


Şekil 3.7. Montmorillonitin XRD grafiği

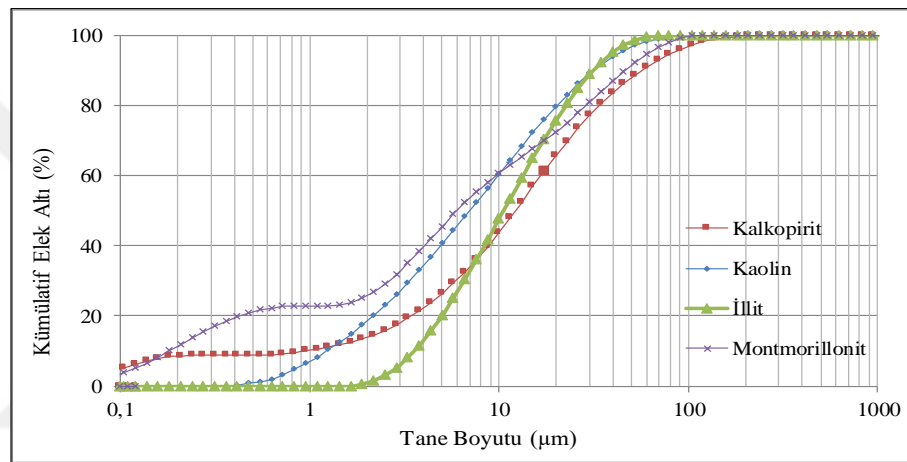
Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi laboratuvarında yaptırılan kation değişim kapasitesi analiz sonuçlarına göre kil minerallerinin kation değişim kapasitesi; kaolin için 17,03 meq/100 g, illit için 21,7 meq/100 g ve montmorillonit için 35,05 meq/100 g olarak belirlenmiştir.

### 3.1.3. Numunelerin tane boyut dağılımı

Cevher ve kil minerallerinin boyut dağılımını tespit etmek için, İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama laboratuvarında bulunan Malvern Mastersizer 2000 cihazı kullanılmıştır. Analizler yaş olarak gerçekleştirilmiş ve ölçümlerde distile su kullanılırken, montmorillonitin tane boyutu ölçümünde kil yeteri kadar suda dağılmadığı için distile su yerine aseton kullanılmıştır. Tesiste kullanılan düşük tenörlü cevherin ve flotasyon deneylerinde kullanılacak olan kil mineral örneklerinin tane boyut dağılımları Şekil 3.8’de verilmiştir.  $D_{80}$  tane boyutu; cevher için 79  $\mu\text{m}$ , kaolin için 28  $\mu\text{m}$ , illit için 34  $\mu\text{m}$  ve montmorillonit için ise 60  $\mu\text{m}$ ’dir. Zeta potansiyeli ölçümleri için kil mineralleri 15 dk ve kalkopirit ise 20 dk süreyle tane boyutu -38  $\mu\text{m}$  olacak şekilde çubuklu değirmen kullanılarak öğütülmüştür.  $D_{80}$  tane boyutu kalkopirit için 34  $\mu\text{m}$ , kaolin için 20  $\mu\text{m}$ , illit için 23  $\mu\text{m}$  ve montmorillonit için ise 30  $\mu\text{m}$ ’dir (Şekil 3.9).



Şekil 3.8. Düşük tenörlü kalkopirit cevherinin ve kil mineral örneklerinin tane boyut dağılımları



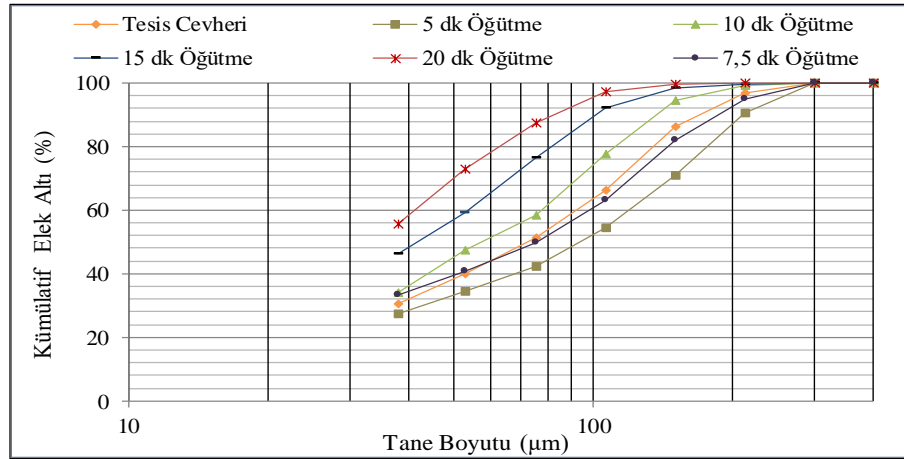
Şekil 3.9. Zeta potansiyeli ölçümlerinde kullanılan kalkopirit ve kil minerallerinin tane boyut dağılımları

Yüksek tenörlü parça numune, flotasyon deneylerine hazır hale getirmek için ilk olarak çeneli kırıcıda boyut küçültme işlemine tabi tutulmuştur. 1,18 mm'lik elekten elenen malzemenin elek üstü çubuklu değirmende 3 dk öğütülmüş ve öğütülen malzeme yeniden 1,18 mm'lik elekten elenmiştir. Elek altı malzeme 5-7,5-10-15-20 dk olmak üzere 5 farklı sürede öğütülerek yaş elek analizleri yapılmış ve tesiste kullanılan cevher boyutuna en yakın öğütme süresi 7,5 dk olarak belirlenmiştir (Şekil 3.10).

### 3.1.4. Kullanılan reaktifler

Yüksek tenörlü cevher ile gerçekleştirilen flotasyon deneylerinde farklı özelliklerde 5 toplayıcı, 3 bastırıcı/dağıtıcı ve 4 köpürtücü kullanılmış ve tüm kimyasalların listesi Çizelge 3.4'te sunulmuştur. Tez boyunca kullanılan kimyasalların bir kısmı üretici firmalardan temin edilirken, tesisin kullandığı reaktifler; toplayıcı (3418A), bastırıcı (sodyum silikat) ve köpürtücü (MIBC) tesisten temin edilmiştir.





Şekil 3.10. Farklı öğütme sürelerinde elde edilen yüksek tenörlü cevherin tane boyut dağılımları

Çizelge 3.4. Deneylerde kullanılan kimyasal malzemeler ve özellikleri

Reaktif Cinsi	Kimyasal Adı	Kimyasal Bileşimi	Saflik Derecesi (%)	Mol Ağırlığı (g/mol)	Üretici Firma
Toplayıcı	Sodyum izopropil ksantat (NaIPX)	$(CH_3)_2CHOCSNa$	99,5	202,37	ECS Kimya/ Kimsan Ltd.
	Potasyum amil ksantat (KAX)	$CH_3(CH_2)_4OCS_2K$	99,5	202,37	ECS Kimya/ Kimsan Ltd.
	Hostafloat HX-231	Tiyokarbomat	-	-	Clariant
	Aerofloat MX-515	İzopropanol, ditiyofosfat ve tiyonokarbomat karışımı	99	-	Cytec
	Aerophine 3418A	Sodyumdiizobütil ditiyofosfinat $C_8H_{18}PS_2.Na$	50	232	Cytec
Bastırıcı/ Dağıtıcı	Sodyum silikat	$Na_2O.nSiO_2$	99	122,06	TET
	Sodyum polifosfat	$(Na_5P_3O_{10})$	-	-	Merck
	Sodyum heksametafosfat	$(NaPO_3)_n$	-	-	-
Köpürtücü	Oreprep F-521, F-531	2-Metil 1 pentanol alifatik alkol karışımı	99	-	Cytec
	Oreprep F-583	2-Etil hekzanol	99	-	Cytec
	Dowfroth 250	Polipropilen glikol metil eter $CH_{34}OH$	-	250	Dow Kimyasalları
	Metil izobütil karbinol	$C_6H_{14}O$	98	102,18	Arkema/ Fransa
Asit/Baz	Hidroklorik asit	HCl	37	36,46	Merck
	Sülfürik asit	$H_2SO_4$	95-97	98,08	Merck
	Nitrik asit	$HNO_3$	65	63,01	Merck
	Sodyum hidroksit	NaOH	97	40	Merck
	Sönmüş kireç	$Ca(OH)_2$	-	-	-
Tuz	Sodyum klorür	NaCl	99,5	58,44	Merck

Tesisten alınan düşük tenörlü cevher ile gerçekleştirilen iyileştirme deneylerinde kullanılmak üzere, farklı firma ve ülkelerden bastırıcı/dağıtıcı temin edilmiştir (Çizelge 3.5).

**Çizelge 3.5.** İyileştirme deneylerinde kullanılan reaktifler ve özellikleri

Reaktif Cinsi	Adı	Kimyasal Bileşimi	Safılık Derecesi (%)	Mol Ağırlığı (g/mol)	Üretici Firma
Bastırıcı/ Dağıtıcı	Sodyum silikat	$\text{Na}_2\text{O.nSiO}_2$	99	122,06	TET
	DP3124	Ahşap bazlı biyopolimer	>90	Düşük Mol. Ağ.	Pionera Norveç
	DP3125	Ahşap bazlı biyopolimer	>90	Yüksek Mol. Ağ.	Pionera Norveç
	DK55	Petrol kalıntısı, katalitik fraksiyonlayıcı artığı ve sülfonatın formaldehit ile karışımı	99	-	Innospec Lim. İngiltere
	DK50	Asit reçine kopolimerinin sodyum tuzu	99	-	Innospec Lim. İngiltere
	CYQUEST 4000	Polimerik bastırıcı disodyum maleat ve sodyum klorit karışımı	99	-	Solvay
	AERO633	Polimerik bastırıcı P-Kresol ve M-Kresol karışımı	99	-	Solvay
	AERO7260	Polimerik bastırıcı	99	-	Solvay
	CMC	Karboksimetil selüloz	80	510,60	Akzo Nobel Kim.

### 3.1.5. Çeşme suyu analizi

Cevher zenginleştirme işlemlerinde taşıyıcı ve ortam olarak kullanılan suyun kalitesi (kimyasal içeriği), zenginleştirme işleminin performansını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, flotasyon deneylerinde kullanılan çeşme suyundan 1000 mL'lik steril şişe içerisinde uygun tekniklerle alınan numune soğuk zincir içerisinde İstanbul Bilim Sağlık ve Lab. Hiz. firmasına ve Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme bölümüne gönderilerek fiziksel ve kimyasal analizleri yaptırılmıştır (Çizelge 3.6).

**Çizelge 3.6.** Çeşme suyunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Bulanıklık (NTU)	0,25	Na (mg/L)	2,86
pH	7,50	Serbest Klor (mg/L)	0,32
İletkenlik (20°C) ( $\mu$ S/cm)	293	Zn (mg/L)	0,08
Ca <sup>+2</sup> (mg/L)	57,53	B (mg/L)	0,05
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	12	Fe (mg/L)	0,005
Mg <sup>+2</sup> (mg/L)	8,85	Mangan ( $\mu$ g/L)	4

### 3.2. Yöntem

DeneySEL çalışmalar; zeta potansiyeli ve temas açısı ölçümleri, optimum flotasyon koşullarının belirlendiği flotasyon deneyleri, kil minerallerinin flotasyon tenör/verim/köpük kararlılığına, flotasyon kinetiğine ve mekanik taşımaya etkisinin belirlendiği deneySEL çalışmalar ile düşük tenörlü tesis besleme numunesi için farklı bastırıcı ve dağıtıcıların kullanıldığı deneySEL çalışmalardan oluşmaktadır. Seçilen konsantrelerde; taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi, SEM-EDS analizi, toplam organik karbon analizi (TOC) ve FTIR analizi yaptırılarak, kil etki mekanizması detaylı olarak ortaya konulmaya çalışılmıştır.

#### 3.2.1. Zeta potansiyeli ölçümleri

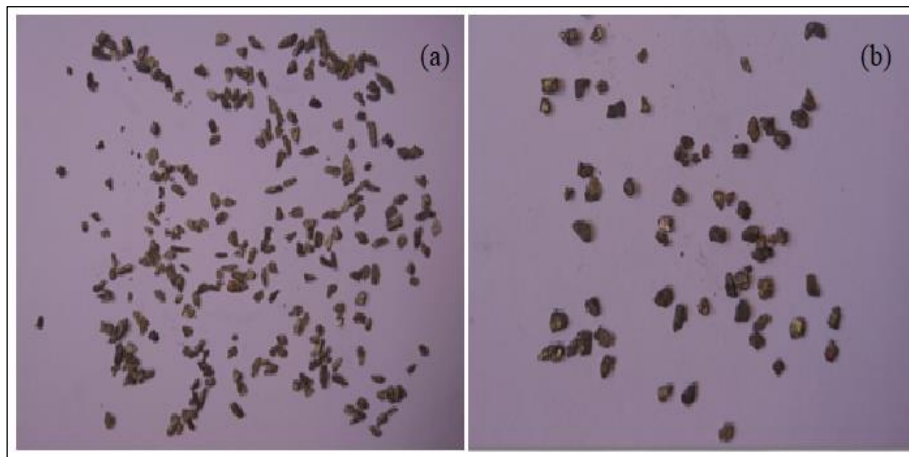
Zeta potansiyeli ölçümlerinde Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama laboratuvarında bulunan, Brookhaven marka ZetaPlus cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.11). Cihaz, pülpte ince boyutta bulunan tanelerin zeta potansiyelini “elektroforesiz yöntemi” ile ölçmektedir.



**Şekil 3.11.** Zeta potansiyeli ölçümünde kullanılan zeta-metre cihazı ve çözelti hücresi

Cihaz zeta potansiyeli değerlerini ‘‘Smoluchowski’’ eşitliğini kullanarak otomatik olarak hesaplamaktadır. Zeta potansiyeli ölçümlerinde, tesisten getirilen kalkopirit içeriği yüksek parça cevherlerden elde edilen ve  $-38 \mu\text{m}$  tane boyutuna öğütölen numune kullanılmıştır. Zeta potansiyeli ölçümleri arka plan elektrolit olan 10 mM NaCl çözeltisine mineral ilave edilerek geręekleřmiřtir. Ölçümlerden önce pH değeri ayarlanmış ve 1 g/L numune 25 mL NaCl çözeltisine ilave edilerek, 15 dk manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Zeta potansiyel ölçümü için bu stok çözeltiden alınan yaklaşık 7 mL numune, pleksiglasdan imal edilmiş hücreye konularak; 10 ölçüm yapılmış ve cihaz tarafından belirlenen ortalama değer ile standart sapma kaydedilmiştir. Her bir örnek için üç kez okuma yapılmış ve aritmetik ortalaması alınmıştır. pH değeri 2’den küçük ve pH değeri 12’den büyük olduğu durumda iletkenlik yüksek olduğundan dolayı zeta potansiyel ölçümleri yapılamamıştır. Örneklerin pH değeri, seyreltik NaOH ve HCl çözeltileri kullanılarak ayarlanmıştır. Zeta potansiyeli ölçümleri her bir mineral için ayrı ayrı ve kalkopirit mineralinin belirli oranlarda kil mineralleri ile karıştırılmasıyla geręekleřtirilmiřtir.

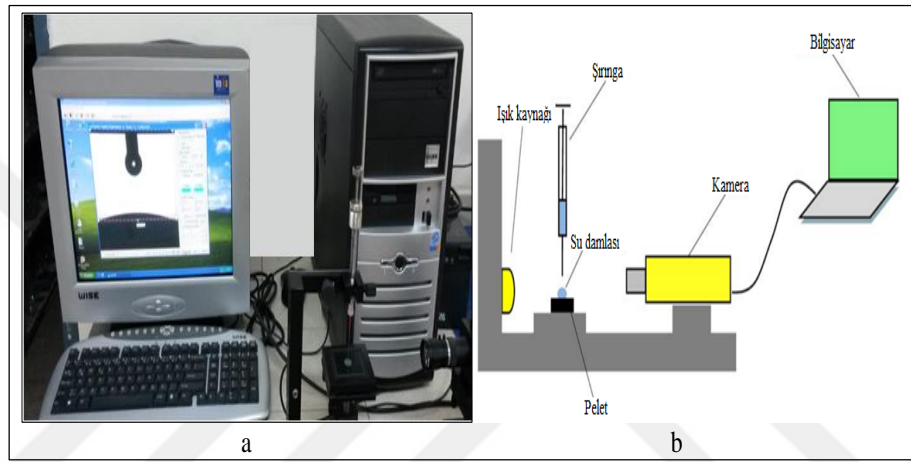
Zeta potansiyeli ölçümleri için, tesisten temin edilen kalkopirit içeriği yüksek parça cevher çeneli kırıcıda kırılmış ve  $-2,8+1 \text{ mm}$  tane boyutundaki malzemedan muhtemel kalkopirit taneleri cımbızla seçilmiştir. şekil 3.12a’da görölen yaprağımsı ve tabaka görünlömlü cevher ile şekil 3.12b’deki gibi kristal yapıdaki cevher ayrı ayrı toplanmıştır.  $-38 \mu\text{m}$  tane boyutuna öğütölen numunelerden yaprağımsı yapıda olan cevherin %15,24 Cu ve kristal şekilli olan cevherin ise %10,53 Cu içerdieği belirlenmiş ve bu nedenle zeta potansiyeli ölçümlerinde yaprağımsı yapıda olan numune kullanılmıştır.



şekil 3.12. Zeta potansiyeli ölçümlerinde kullanılan yaprağımsı-tabakalı (a) ve kristal yapıdaki (b) cevher

### 3.2.2. Temas açısı ölçümleri

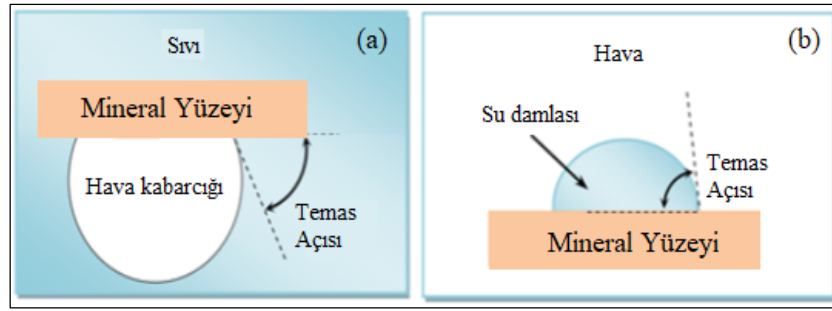
Temas açısı ölçümlerinde Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama laboratuvarında bulunan KSV CAM 101 model temas açısı ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.13a). Cihaz üzerinde mekanik kısım ve fotoğraf makinesi ile damla ve kabarcığın netliği ayarlanmaktadır. Damla ve kabarcığın fotoğrafı çekilmekte ve çekilen fotoğraf üzerinde temas açısı ölçülmektedir. Temas açısı cihazının şematik görünümü Şekil 3.13b’de verilmiştir.



Şekil 3.13. Temas açısı ölçümlerinde kullanılan (a) goniometre ve (b) temas açısı ölçüm yönteminin şematik görünümü

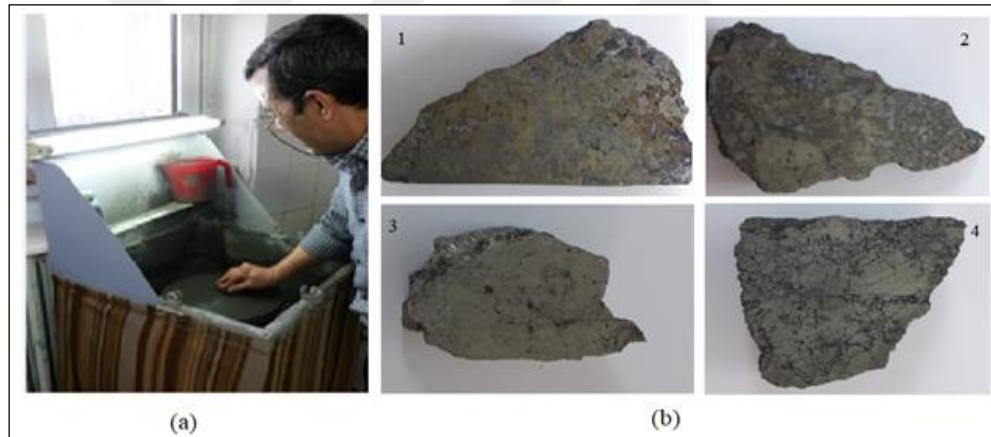
Temas açısı ( $\theta$ ) ölçümü katı minerallerin ıslanma özelliğinin (hidrofobitesinin) ölçümünde kullanılan bir yöntemdir ve yıllardır temas açısı ölçümü için birçok yöntem geliştirilmiştir. En sık kullanılan yöntemlerden ikisi; durağan damla (sessile drop) ve kabarcık yakalama yöntemidir (captive bubble).

Kabarcık yakalama yönteminde gerekli kimyasalların bulunduğu bir çözelti içine mineral konulmakta ve numunenin yüzeyine şırınga yardımıyla hava verilerek kabarcık oluşturulmaktadır. Böylece, kabarcığın mineral yüzeyine yapışması sağlanarak (Şekil 3.14a) temas açısı belirlenmektedir. Durağan damla yönteminde (Şekil 3.14b) ise, belirli ağırlıkta ve düzgün yüzeye sahip peletler hazırlanmaktadır. Temas açısı ölçülecek olan sıvı ortam şırıngaya çekilerek, mineral yüzeyine şırınga yardımıyla belirli hacimde damlatılmaktadır. Daha güvenilir sonuçlar elde edildiğinden dolayı temas açısı ölçümlerinde parlak kesiti yapılmış numune üzerinde kabarcık yakalama yöntemi kullanılmıştır.



**Şekil 3.14.** Temas açısı ölçüm yöntemlerinden (a) kabarcık yakalama ve (b) durağan damla yönteminin şematik görünümü (Szyszka, 2014)

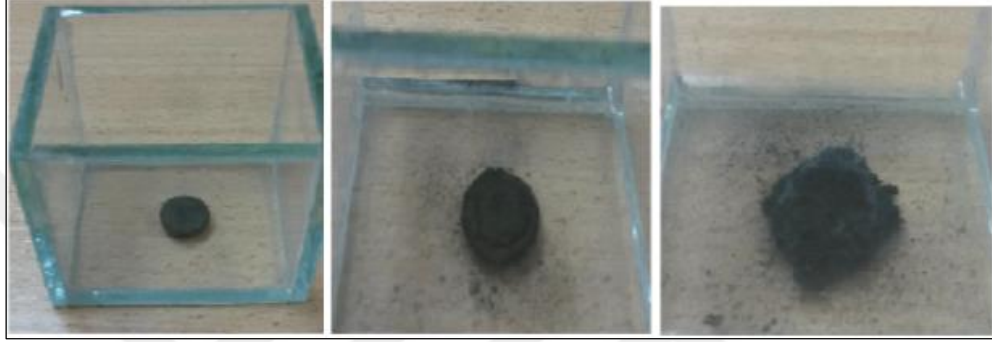
Ocaktan alınan parça numunelerden 4 tanesinin her iki yüzeyi Konya Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği laboratuvarında bulunan taş kesme makinesinde kesilerek düzgün yüzeyler döner parlatma cihazı ile parlatılmıştır (Şekil 3.15a). Yeteri kadar parlak kesit elde edilemediğinden dolayı yüzeyler, cam tezgâh üzerinde 600 ve 800  $\mu\text{m}$  tane boyutundaki alüminyum oksit tozu ile sulu olarak sürtülmüştür.



**Şekil 3.15.** Döner parlatma cihazı (a) ve parlak kesiti yapılan numuneler (b)

Konya Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü cevher mikroskopunda incelenen parlak kesitlerin, kalkopirit ve pirit yüzeyleri belirlenmiş ve temas açısı ölçümlerinde hem kalkopiritin hem de piritin ıslanabilirliği ölçülmüştür. Şekil 3.15b'deki 1 numaralı parlak kesitin hem kalkopirit hem de pirit yüzeyi içermesi ve iri mineral yüzeylerine sahip olmasından dolayı temas açısı ölçümlerinde bu kesit kullanılmıştır. Temas açısı ölçümü yapılacak olan ve parlak kesiti hazırlanan mineral, içerisinde gerekli kimyasalların bulunduğu pH değeri ayarlı çözelti ile dolu cam bir kap içine konulmuştur. Şırınga yardımıyla hava verilerek kabarcık oluşturulmuş ve kabarcığın ( $0,1 \mu\text{L}$ ) mineral üzerine yapışması sağlanmıştır. Bu ölçüm, mineral yüzeyindeki farklı noktalarda tekrarlanarak, temas açısı okumalarının ortalama değeri alınarak rapor edilmiştir.

Kil minerallerinin kalkopirit mineralinin temas açısına etkisinin belirlenebilmesi amacıyla, farklı oranlarda kil içeren kalkopirit minerali ile 0,4 g ağırlığında 2-3 mm yüksekliğinde ve 1,2 cm çapında silindirik peletler hazırlanmıştır. Peletler hazırlanırken hidrolik pres kullanılmış ve peletler 25 kN'luk yüke maruz kalmıştır. Çözelti içerisine konulan peletler, kısa süre içerisinde şırınga ile hava mineral yüzeyine tutturulamamış ve 30 saniye içinde Şekil 3.16'da en sağdaki fotoğrafta olduğu gibi tamamen dağılmıştır. Bu nedenle bu ölçümler gerçekleştirilememiştir.



Şekil 3.16. Peletin solüsyon içindeki dağılımı

### 3.2.3. Flotasyon deneyleri

Flotasyon deneyleri; flotasyon koşullarının optimizasyonu için gerçekleştirilen flotasyon deneyleri, yüksek tenörlü cevher ile killerin belirli oranda karıştırılmasıyla oluşturulan yapay karışımlarla gerçekleştirilen deneyler ve tesise ait düşük tenörlü tesis numunesi ile gerçekleştirilen deneyler olmak üzere 3 aşamada yapılmıştır. Flotasyon deneylerinde “Denver” tipi flotasyon makinası (Şekil 3.17) kullanılmıştır. Hava akış hızı akış ölçerden, karıştırma hızı ise cihazın hız ayarlama bölümünden ayarlanabilmektedir. Konsantrenin tenörünü belirlemek için Atomik absorpsiyon cihazı (GBC marka SensAA model) kullanılmıştır. Alınan tüm konsantre ve atık numuneleri filtreden geçirilerek kurutulmuş ve kimyasal analizleri yapılmıştır.

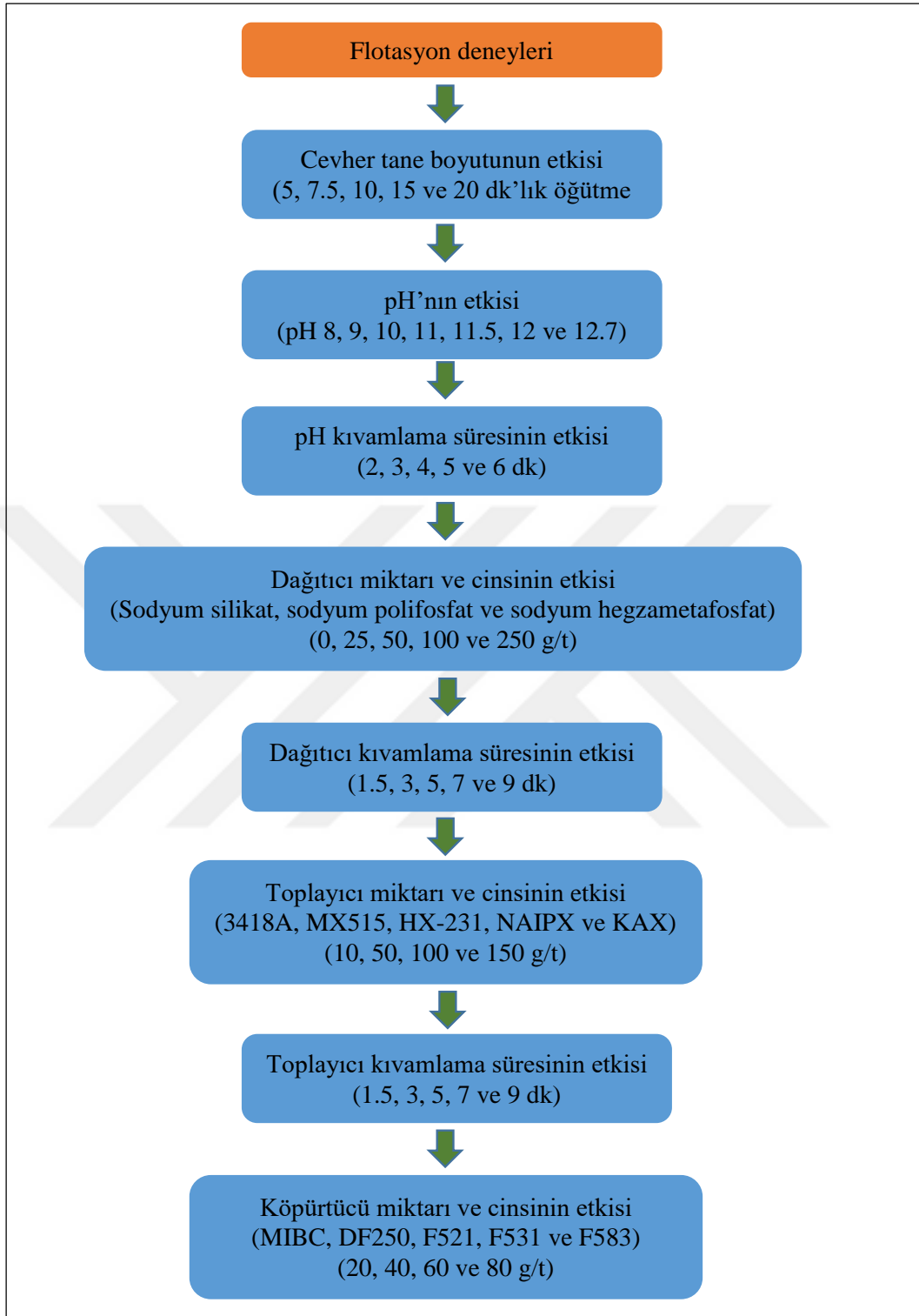


Şekil 3.17. Denver tipi flotasyon makinası

### 3.2.3.1. Yüksek tenörlü cevher ile gerçekleştirilen flotasyon deneyleri

Kalkopirit flotasyonunda kil minerallerinin etkisinin belirlenmesine geçmeden önce; yüksek kalkopirit içerikli konsantre üretimini sağlayan, en uygun flotasyon şartlarının belirlenmesi için flotasyon deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan su ve cevher karışımı olan pülp, homojen karışım için 2 dk karıştırıldıktan sonra sırasıyla; pH düzenleyici (kireç), bastırıcı, toplayıcı ve köpürtücü ilavesi yapılmış daha sonra sisteme hava verilerek belirli flotasyon sürelerinde köpük alımı gerçekleştirilmiştir. Tane boyutu, pH, pH kıvamlama süresi, bastırıcı/dağıtıcı cinsi ve miktarı, bastırıcı/dağıtıcı kıvamlama süresi, toplayıcı cinsi ve miktarı, toplayıcı kıvamlama süresi ile köpürtücü cinsi ve miktarı bu aşamada çalışılan deneysel parametreler olup, deneysel çalışmalar Şekil 3.18’de sunulan akım şeması çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Flotasyon deneyleri Çizelge 3.7’deki koşullar çerçevesinde yapılmıştır.





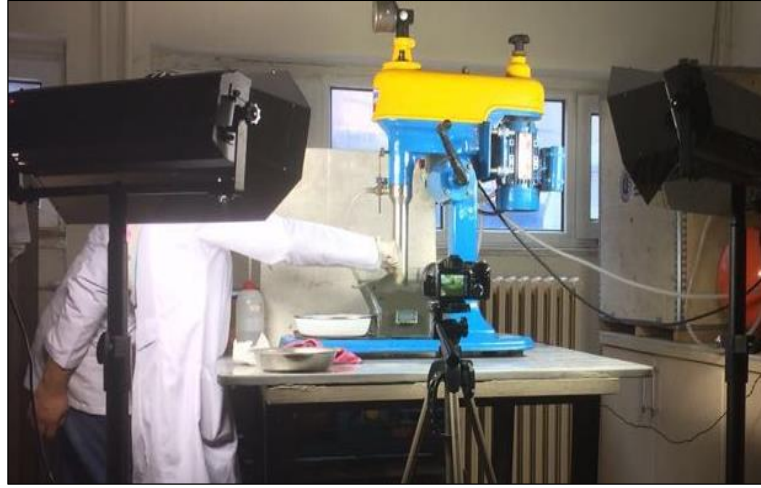
Şekil 3.18. Yüksek tenörlü cevher ile gerçekleştirilen flotasyon deneyleri akım şeması

**Çizelge 3.7.** Flotasyon deney koşulları

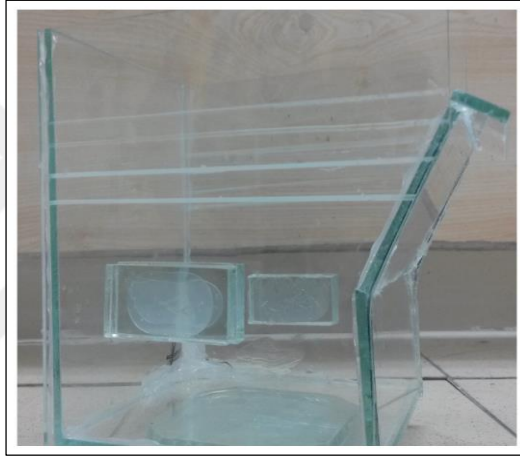
Değişkenler	Değerler
pH ve pH ayarlayıcı	8, 9, 10, 11, 11.5, 12 ve 12.7-Kireç
Dağıtıcı cinsi	Sodyum silikat, sodyum polifosfat, sodyum hegzametafosfat
Dağıtıcı miktarı	0, 25, 50, 100 ve 250 g/t
Toplayıcı cinsi	3418A, MX-515, HX-231, NaIPX ve KAX
Toplayıcı miktarı	10, 50, 100 ve 150 g/t
Köpürtücü cinsi	MIBC, DF-250, F-521, F-531 ve F-583
Köpürtücü miktarı	20, 40, 60, 80 ve 100 g/t
pH kıvamlama süresi	2, 3, 4, 5 ve 6 dk
Dağıtıcı kıvamlama süresi	1.5, 3, 5, 7 ve 9 dk
Toplayıcı kıvamlama süresi	1.5, 3, 5, 7 ve 9 dk
Sabit Değişkenler	Değerler
Katı oranı	% 10
Hava akış hızı	10 L/dk
Köpük derinliği	2 cm
Karıştırma hızı	1350 d/dk
Flotasyon (köpük alma) süresi	3 dk

### 3.2.3.2. Kil minerallerinin etkisinin araştırıldığı yapay karışımlar ile gerçekleştirilen flotasyon deneyleri

Bu aşamada, bir önceki deney setinde optimize edilen belirli deneysel koşullar (tane boyutu; pH; pH kıvamlama süresi; bastırıcı/dağıtıcı cinsi; bastırıcı/dağıtıcı kıvamlama süresi; toplayıcı cinsi/miktarı; toplayıcı kıvamlama süresi; köpürtücü cinsi) temel alınmıştır. Ayrıca deney sırasında köpük fazındaki kabarcık boyutlarının ölçülebilmesi için deney düzeneğinin sağ tarafına bir görüntüleme sistemi (video kamera ile ışık düzeneği) ilave edilmiştir (Şekil 3.19). Köpük görüntüsünün çevresel ışıklardan etkilenmeyecek şekilde alınması için hücrenin yaklaşık 1 m sağ tarafına 2 adet spot lamba yerleştirilerek homojen bir aydınlatma sağlanmıştır. Flotasyon deneylerinde 1,5 L hacimli camdan yapılmış hücre kullanılmıştır (Şekil 3.20). Kabarcıkların görünümünün net olması için hücre camdan imal edilmiştir. Hücrenin yan kenarlarına köpük derinliğinin ayarlanması için 1'er cm aralıklı dört adet çizgi çizilmiştir. Hem flotasyon sırasında köpük alınmaya başlandıkça pülp seviyesinin düşmesi, hem de hücrenin üst kenarlarıyla karıştırıcı yüzeyine sıçrayan tanelerin pülpe geri kazandırılması için hücreye pH'ı ayarlı su ilave edilmiştir.

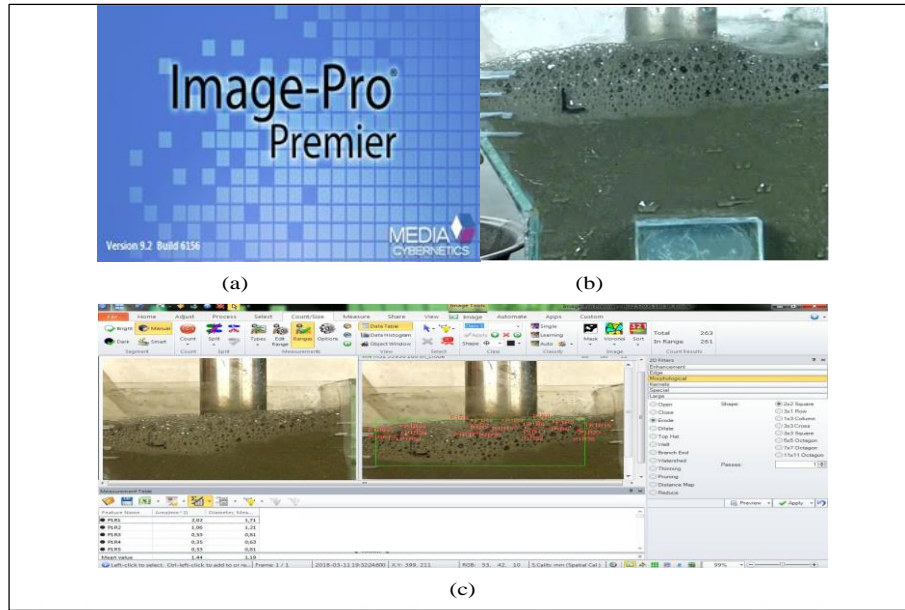


Şekil 3.19. Deney düzeneği



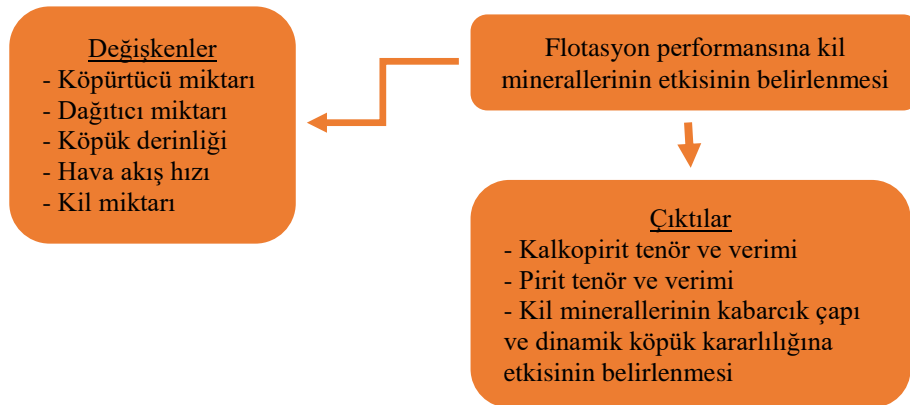
Şekil 3.20. Flotasyon deneylerinde kullanılan cam hücre

Gerçekleştirilen tüm deneylerde köpüğün videosu çekilerek bu videolardan seçilen resimlerden ortalama kabarcık boyutu Image-Pro Premier Software bilgisayar yazılımı (Şekil 3.21a) ile değerlendirilerek belirlenmiştir. Fotoğraf makinesi ile 250 kare/saniye olacak şekilde çekilen yavaşlatılmış video karelere bölünmüş ve belirlenen sürelerdeki görüntüler alınarak (Şekil 3.21b) programa yüklenmiştir. Program kalibre edildikten sonra, kabarcıkların netleme ayarı yapılmış ve ortalama kabarcık boyutu ölçülmüştür (Şekil 3.21c).



Şekil 3.21. Görüntü işleme programı (a), görüntü alınması (b) ve kabarcık boyutlarının belirlenmesi (c)

Şekil 3.22’de kil minerallerinin etkisini belirlemek için uygulanan iş akım şeması gösterilmektedir. Bu aşamada çalışılan deneysel parametreler: köpürtücü miktarı, dağıtıcı miktarı, hava akış hızı, köpük derinliği ve kil miktarıdır. Belirlenen tüm deneysel parametreler ile bağımlı değişkenler arasındaki karşılıklı etkileşimin belirlenebilmesi amacıyla istatistik analiz yazılım programı Minitab 16 kullanılarak bir deney programı tasarlanmıştır.



Şekil 3.22. Yapay cevher karışımları ile gerçekleştirilen flotasyon deneyleri akım şeması

Çalışılan beş deneysel değişken için üç farklı alt değişkenin kullanılması ile birlikte ( $3^5$ ) her bir kil minerali için 243 adet deneyin yapılması gerekmektedir. Deney sayısını azaltmak için deney tasarımı yöntemi kullanılarak iki kez yarılama uygulanmış ( $3^{5-2}$ ) ve her bir kil minerali için 32 adet deney yapılmıştır.

Killerin kalkopirit flotasyonuna etkisini belirlemek için kullanılan değişkenlerin alt seviyeleri ön araştırmaların sonuçlarına göre saptanmıştır. Oluşturulan modellerin deneysel verileri ne ölçüde karşıladığı varyans analizi ile belirlenmiştir. 3 farklı seviyede yapılacak deneylerin, düşük (-1), orta (0) ve yüksek (1) noktaları belirlenmiştir. Bu değerlere göre tasarımda kullanılacak değişken seviyeleri Çizelge 3.8’de verilmiştir. Deney koşulları Çizelge 3.9’da, belirlenen değişkenlerin ve seviyelerin kombinasyonları tasarım matrisi olarak Çizelge 3.10’da gösterilmiştir.

**Çizelge 3.8.** Değişkenler ve seviyeleri

Değişken Kodu	Değişkenler	Birimi	Seviye		
			Düşük	Orta	Yüksek
A	Köpürtücü Miktarı	g/t	80	100	120
B	Dağıtıcı Miktarı	g/t	100	200	300
C	Köpük Derinliği	cm	1	2	3
D	Hava Akış Hızı	L/dk	8	10	12
E	Kil Miktarı	%	5	10	15

**Çizelge 3.9.** Kil minerallerinin etkisinin belirlendiği deneylerde kullanılan deney şartları

Değişkenler	Değerler
Köpürtücü miktarı	80, 100 ve 120 g/t
Dağıtıcı miktarı	100, 200 ve 300 g/t
Köpük derinliği	1, 2 ve 3 cm
Hava akış hızı	8, 10 ve 12 L/dk
Kil miktarı	%5, 10 ve 15
Sabit Değişkenler	Değerler
pH ve pH ayarlayıcı	11,5 - Kireç
Dağıtıcı cinsi	Sodyum silikat
Toplayıcı cinsi	3418A
Toplayıcı miktarı	50 g/t
Köpürtücü cinsi	MIBC
pH kıvamlama süresi	5 dk
Dağıtıcı kıvamlama süresi	3 dk
Toplayıcı kıvamlama süresi	3 dk
Köpürtücü kıvamlama süresi	1 dk
Katı oranı	%10
Karıştırma hızı	1350 d/dk
Flotasyon (köpük alma) süresi	3 dk

Çizelge 3.10. Deney tasarımında kullanılan değişkenler ve seviyeleri

Deney No	A Köpürtücü Miktarı (g/t)	B Dağıtıcı Miktarı (g/t)	C Köpük Derinliği (cm)	D Hava Akış Hızı (L/dk)	E Kil Miktarı (%)	A	B	C	D	E
1	0	-1	0	0	0	100	100	2	10	10
2	0	0	0	0	0	100	200	2	10	10
3	0	0	0	-1	0	100	200	2	8	10
4	0	0	-1	0	0	100	200	1	10	10
5	1	1	1	-1	-1	120	300	3	8	5
6	-1	-1	-1	1	-1	80	100	1	12	5
7	0	0	1	0	0	100	200	3	10	10
8	0	0	0	0	1	100	200	2	10	15
9	1	-1	-1	-1	-1	120	100	1	8	5
10	-1	1	-1	-1	-1	80	300	1	8	5
11	0	0	0	1	0	100	200	2	12	10
12	-1	1	1	-1	1	80	300	3	8	15
13	-1	0	0	0	0	80	200	2	10	10
14	1	-1	-1	1	1	120	100	1	12	15
15	0	0	0	0	0	100	200	2	10	10
16	1	1	1	1	1	120	300	3	12	15
17	0	0	0	0	-1	100	200	2	10	5
18	1	0	0	0	0	120	200	2	10	10
19	1	1	-1	1	-1	120	300	1	12	5
20	-1	1	1	1	-1	80	300	3	12	5
21	0	1	0	0	0	100	300	2	10	10
22	0	0	0	0	0	100	200	2	10	10
23	0	0	0	0	0	100	200	2	10	10
24	0	0	0	0	0	100	200	2	10	10
25	1	1	-1	-1	1	120	300	1	8	15
26	-1	1	-1	1	1	80	300	1	12	15
27	-1	-1	1	-1	-1	80	100	3	8	5
28	1	-1	1	1	-1	120	100	3	12	5
29	1	-1	1	-1	1	120	100	3	8	15
30	-1	-1	-1	-1	1	80	100	1	8	15
31	-1	-1	1	1	1	80	100	3	12	15
32	0	0	0	0	0	100	200	2	10	10

Cevap Yüzeyi Yöntemleri'nden Merkezi Kompozit Tasarım ile tasarlanan deney sonuçlarının değerlendirilmesinde kalkopirit tenör ve verimi, pirit tenör ve verimi, dinamik köpük kararlılığı ( $\Sigma$ ) ve ortalama kabarcık çapı ( $D_{32}$ ) olmak üzere altı bağımlı değişken esas alınmıştır. Elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiş, değişkenlerin etkisi ve değişkenler arasında bulunabilecek iç etkileşimlerin doğru bir şekilde anlaşılması sağlanmıştır.

Kabarcık yapısı ve dinamik köpük kararlılığı flotasyonda seçimlilik ve verimi etkileyen etkenlerdendir. Bu nedenle gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ikinci olarak, bir önceki deney setindeki aynı koşullar altında (Çizelge 3.9), verilen deneysel program çerçevesinde (Çizelge 3.10) taşmayan köpük kolonu (Şekil 3.23) kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve her bir deney için maksimum köpük yüksekliği değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.23. Dinamik köpük kararlılığı deneyleri ve köpük kolonu

Köpük yüksekliği bir denge seviyesine ulaşana kadar sabit bir hava akış hızında flotasyon süresince kaydedilmiş ve yükseklik dinamik köpük kararlılığını hesaplamak için kullanılmıştır. Kabarcık hacminin hava akış debisine oranı olarak tanımlanan dinamik köpük kararlılığı faktörü ( $\Sigma$ ) ise Eşitlik 3.1 kullanılarak belirlenmiştir (Barbian ve ark., 2003; Norori-McCormac ve ark., 2017).

$$\Sigma = \frac{V_f}{Q} = \frac{H_{\max} A_k}{Q} \quad (3.1)$$

Burada:  $\Sigma$  dinamik köpük kararlılığı faktörünü (s),  $V_f$  köpük hacmini ( $\text{cm}^3$ ),  $Q$  gazın hacimsel debisini ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ),  $H_{\max}$  toplam köpük yüksekliğini (cm) ve  $A_k$  ise hücrenin kesit alanını ( $\text{cm}^2$ ) göstermektedir.

### 3.2.3.3. Flotasyon kinetiği deneyleri

Kaba flotasyon sonuçlarının değerlendirilmesi için kinetik modeller kullanılmaktadır. Literatürde flotasyon kinetik modellerinde kullanılan farklı yaklaşımlar bulunmaktadır (Stanojlović ve Sokolović, 2014). Genel olarak benzerlik gösteren bu modeller flotasyon hız sabitini tanımlamada kullanılan matematiksel ifadelerdir. Flotasyon hız sabiti flotasyon kinetiği deney verilerinden kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Hız sabitinin belirlenmesi için köpük derinliğinin değiştirildiği bir seri flotasyon deneyinin yapılması gerekmektedir. Farklı köpük derinliklerinde yapılan bu flotasyon kinetiği deney sonuçlarından yararlanarak köpük bölgesi hız sabiti belirlenmektedir (Çilek, 2006). Bu amaçla, optimize edilen flotasyon koşullarında her bir kil minerali için üç farklı kil oranında ve üç farklı köpük derinliğinde deneyler gerçekleştirilmiştir.

Her bir deneyde, 0.5, 1, 2, 3, 5 ve 7'nci dk'larda ayrı ayrı köpük alınarak altı ayrı konsantre toplanmıştır. Hücreye hava verildikten sonra, köpük tabakasının oluşması için 5 s beklenmiş ve sıyrmanın başladığı nokta köpük alma süresi olarak kararlaştırılmıştır. Elde edilen ürünler filtre edilmiş, kurutulmuş, tartılmış ve analiz sonucu tenör ve verim değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar birinci derece flotasyon kinetiği modeli kullanılarak değerlendirilmiştir (Eşitlik 3.2).

$$R=R_{\infty}(1-e^{-kt}) \quad (3.2)$$

Burada: R değerli mineral verimini (%),  $R_{\infty}$  maksimum değerli mineral verimini (%), k flotasyon hız sabitini ( $dk^{-1}$ ) ve t ise flotasyon süresini (dk) göstermektedir (Stanojlović ve Sokolović, 2014). Deneysel çalışma sonuçları; kalkopirit verim ve tenörü, ayırma etkinliği, hız sabiti,  $R^2$  ve maksimum değerli mineral verimi değerleri belirlenerek değerlendirilmiştir.

Kaba flotasyon deney süresinin belirlenmesinde, kaba konsantreye ne kadar değersiz mineral taşındığı oldukça önemlidir. En uygun flotasyon süresine, ayırma etkinliğinin (SE) en fazla olduğu değerde ulaşılmaktadır. Herhangi bir flotasyon süresi aralığında elde edilen değerli mineral veriminin ( $R_D$ ) değersiz mineral veriminden ( $R_A$ ) farkı olarak tanımlanan ayırma etkinliği (SE) aşağıdaki Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır (Çilek, 2006).



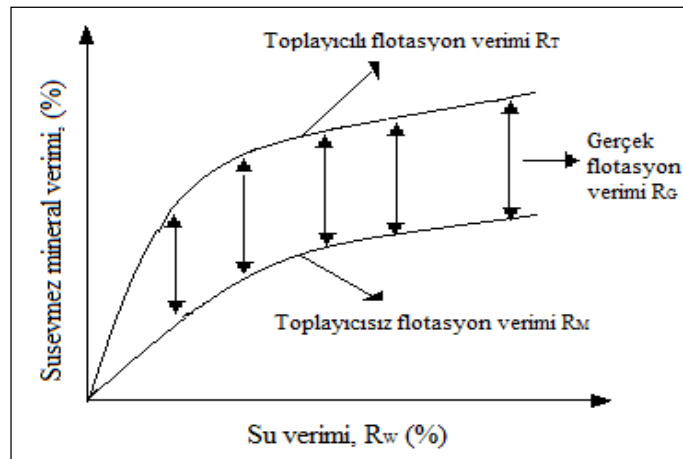
$$SE = R_D - R_A \quad (3.3)$$

### 3.2.3.4. Mekanik taşıma deneyleri

Değerli minerallerin yanı sıra değersiz mineraller de mekanik taşıma mekanizması ile konsantreye taşındıklarından, mekanik taşımanın çok etkin olduğu ince taneler içeren bir cevherin flotasyonu sonrasında üretilen konsantre veriminde artış olmaktadır. Kil minerallerinin mekanik taşımaya etkisinin belirlenmesi amacı ile gerçekleştirilen çalışmalarda, toplayıcı kullanılmadan ve toplayıcı kullanılarak deneyler yapılarak, toplam flotasyon verimi ( $R_T$ ) ve mekanik taşıma verimi ( $R_M$ ) farkından gerçek verim ( $R_G$ ) bulunmuştur (Eşitlik 3.4).

$$R_T = R_G + R_M \quad (3.4)$$

Şekil 3.24'te görüldüğü gibi, toplayıcı kullanılmadan yapılacak bir flotasyon işleminde, konsantrede elde edilecek susevmez mineraller sadece mekanik taşıma yolu ile konsantreye taşınmaktadır. Buna karşılık, gerçek flotasyon ise, susevmez hale getirilmiş minerallerin kabarcıklara yapışarak konsantreye taşınması ile gerçekleşmektedir. Böylece, toplayıcı kullanılarak yapılan flotasyondan elde edilen toplam verim ile toplayıcısız flotasyondan elde edilen verim arasındaki fark olan gerçek flotasyon verimi kolaylıkla belirlenebilmektedir (Çilek, 2006).



Şekil 3.24. Mekanik taşıma ve gerçek flotasyon verimlerinin belirlenmesi (Çilek, 2006)

Kalkopirit flotasyonunda kil minerallerinin mekanik taşımaya etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen flotasyon deneyleri, kil minerallerinin etkisinin belirlendiği deney sonuçlarına göre seçilen en uygun koşullarda gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.11). Kil tipi ve oranı çalışılan deneysel parametrelerdir. Mekanik taşıma deneylerinden elde edilen konsantreye FTIR ve SEM-EDS analizi, konsantre suyuna TOC analizi yaptırılmıştır.

**Çizelge 3.11.** Mekanik taşıma flotasyon deney şartları

Deney Şartları	Değerler
pH ve pH ayarlayıcı	11,5 - Kireç
Dağıtıcı cinsi ve miktarı	Sodyum silikat, 200 g/t
Toplayıcı cinsi ve miktarı	3418A, 50 g/t
Köpürtücü cinsi ve miktarı	MIBC, 100 g/t
pH kıvamlama süresi	5 dk
Dağıtıcı kıvamlama süresi	3 dk
Toplayıcı kıvamlama süresi	3 dk
Köpürtücü kıvamlama süresi	1 dk
Köpük derinliği	2 cm
Hava akış hızı	10 L/dk
Katı oranı	% 10
Karıştırma hızı	1350 d/dk
Flotasyon (köpük alma) süresi	3 dk
Değişkenler	Değerler
Kil türü	Kaolin, illit, montmorillonit
Kil Miktarı	%5, 10, 15

### 3.2.3.4.1. FTIR spektrometri analizi

FTIR spektroskopisi yöntemi, mineral yüzeyinde oluşan tepkimelerin ve organik bileşiklerin belirlenmesinde önemli bir kolaylık sağlamaktadır. FTIR spektrumlarından kimyasal konsantrasyon ve içerilen fonksiyonel gruplar gibi pek çok bilgi elde etmek mümkündür. Bu yöntemde atomlar arası titreşimin neden olduğu pikler  $400-4000\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı aralığında kaydedilerek FTIR spektrumları elde edilmektedir. Bir malzeme yüzeyine adsorbe olan reaktif maddelerin atomları arasındaki bağların titreşim frekansı birbirinden farklı olduğundan dolayı, elde edilen spektrumlar her madde için farklılık göstermektedir (Termes ve Richardson, 1986).

Flotasyon deneylerinden elde edilen konsantre kurutulmuş ve homojen bir şekilde karıştırılmıştır. FTIR Spektroskopisi çalışmaları Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma Uygulama Merkezi'nde bulunan Bruker marka Wertex70 modeli FTIR spektrofotometre ile yapılmıştır. Bu cihazda numuneden geçirilen ışımın dalga boyu değiştirilmekte ve değişik dalga boylarında numune tarafından adsorplanan ışın miktarı ölçülmektedir. Moleküllerdeki çeşitli bağların titreşim frekansları ölçülüp, moleküldeki fonksiyonel gruplar hakkında bilgi edinilmektedir. Cihazın spektral aralığı  $15 \text{ cm}^{-1}$  (uzak kızılötesi) ile  $28000 \text{ cm}^{-1}$  (morötesi)'dir.

#### 3.2.3.4.2. TOC analizi

Toplam organik karbon (TOC) analizi, Aksaray Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde Shimadzu TOC-V Cpn&TN cihazı ile Standart Metot 5310-B Yanma-Kızılötesi Işınlar Yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. TOC derişimini belirlemek amacıyla katı maddeden arındırılmış olan numune, homojen bir hale getirilmiş ve gerekli oranlarda seyreltme yapılmıştır. TOC ölçüm cihazında, oksitlemeye yardımcı bir katalizörün yer aldığı fırın bölgesine numune mikro ölçekte enjekte edilmiştir. Yüksek sıcaklığın etkisiyle su buharlaşmakta ve organik karbonlar  $\text{CO}_2$  gazına ve su buharına dönüşmektedir. Organik ve inorganik karbonun oksitlenmesinden oluşan karbondioksit taşıyıcı gaz ile taşınmakta ve kızıl ötesi ışınlar yardımıyla ölçülmektedir. Belirtilen bu işlemlerde toplam karbon ölçüldüğü için, inorganik karbonun da ayrı olarak ölçülmesi ve aradaki farktan toplam organik karbon miktarının belirlenmesi gerekmektedir. İnorganik karbon, fosforik asit kaplı bir kuvars çubuğun içinde yer aldığı ayrı bir bölmeye enjekte yapılması ile bulunmaktadır. Asidik koşullarda tüm inorganik karbonlar karbondioksite dönüşürken, oluşan karbondioksit ölçülmekte ve organik karbon oksitlenmezken, sadece inorganik karbon ölçülmektedir.

Mekanik taşıma deneylerinde toplayıcı ilaveli yapılan flotasyon deneyleri sonucu alınan konsantre filtre edilerek, katıdan arındırılmış çözelti TOC analizine tabi tutulmuştur. TOC analizindeki amaç, flotasyon deneyleri sonunda çözeltide kalan ve kalkopirit yüzeyine adsorplanmamış hidrokarbonu belirleyerek kil cinsi ve oranının toplayıcı adsorpsiyonuna etkisini ortaya koymaktır. TOC analizleri, flotasyon deneyleri sonucunda elde edilen konsantre suları dışında, tüm kimyasalları içeren cevhersiz ve cevherli flotasyon başlangıç koşulları için de gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.3.4.3. SEM ve SEM-EDS analizi

Kalkopirit flotasyonunda kil minerallerinin mekanik taşıma ve şlam kaplamaya etkisini incelemek amacıyla mekanik taşıma flotasyon deneylerinden elde edilen konsantre üzerinde SEM ve SEM-EDS analizleri yaptırılmıştır. Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma Uygulama Merkezi'nde bulunan Bruker marka Zeiss EVO LS 10 Se Dedektör cihazı ile numunelerin farklı bölgelerinden 250 X ile 30.000 X arasında değişen büyüklüklerde SEM görüntüleri alınmıştır.

Analizlerde kullanılan yüzey altınla kaplanmıştır. Her bir numune için 5 farklı büyüklükte görüntü alınmış ve seçilen 4 nokta üzerinde SEM-EDS analizi yapılmıştır. SEM-EDS analizi ile seçilen noktalarda yapıda bulunan iyon çeşitleri (Cu, Fe, S, Si, Al, Mg, Na, K, Ca ve O) % olarak belirlenmiştir.

### 3.2.3.5. Düşük tenörlü tesis cevheri ile gerçekleştirilen flotasyon deneyleri

Şlam kaplama ve mekanik taşımayı önlemek için hem fiziksel hem de kimyasal çözüm önerileri uygulanmaktadır. İnorganik dağıtıcılar, polimer dağıtıcılar ve özel olarak tasarlanmış kil bağlayıcıların kullanılması çözüm önerileri olarak sıklıkla çalışmalara konu olmuştur.

Bu bölümde; cevher içerisindeki bulunan killer ve diğer yan kayaçların etkisini azaltıp kaba flotasyonda elde edilen konsantre tenörü ve verimini artırmak, tesiste bastırıcı/dağıtıcı olarak kullanılan sodyum silikat ile karşılaştırma yapmak ve sodyum silikat yerine kullanılacak bastırıcı/dağıtıcı türleri belirlemek için tesisten alınan düşük tenörlü cevher üzerinde farklı firma ve ülkelerden getirilen bastırıcı/dağıtıcılar ile flotasyon deneyleri yapılmıştır. Tesise önerilebilecek uygun bastırıcı/dağıtıcı cinsi ve miktarının belirlenebilmesi amacıyla 9 farklı reaktifin kullanılmasıyla gerçekleştirilen deneylerin koşulları Çizelge 3.12'de verilmiştir.

**Çizelge 3.12.** Düşük tenörlü tesis numunesi ile gerçekleştirilen flotasyon deney şartları

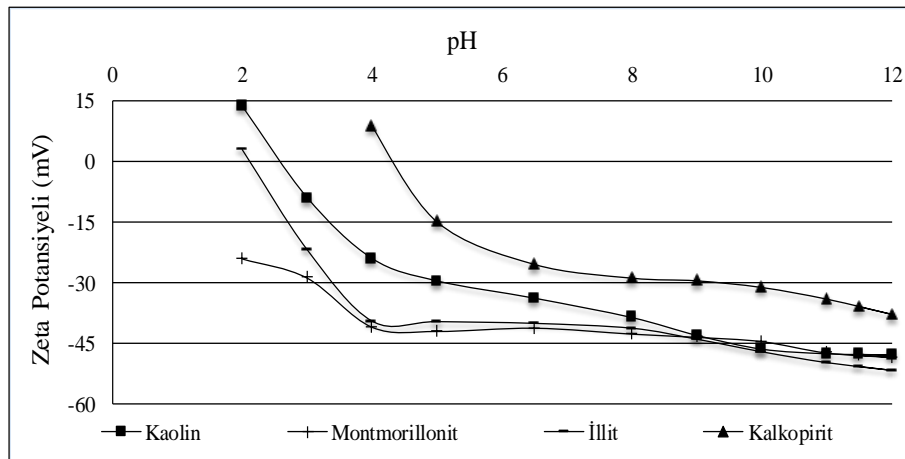
Deney Şartları	Değerler
pH ve pH ayarlayıcı	11,5 - Kireç
Toplayıcı cinsi ve miktarı	3418A, 50 g/t
Köpürtücü cinsi ve miktarı	MIBC, 100 g/t
pH kıvamlama süresi	5 dk
Dağıtıcı kıvamlama süresi	3 dk
Toplayıcı kıvamlama süresi	3 dk
Köpürtücü kıvamlama süresi	1 dk
Köpük derinliği	2 cm
Hava akış hızı	10 L/dk
Katı oranı	% 10
Karıştırma hızı	1350 d/dk
Flotasyon (köpük alma) süresi	3 dk
Değişkenler	Değerler
Dağıtıcı cinsi	Sodyum silikat, DP3124, DP3125, DK50, DK55, CYQUEST 4000, AERO633, AERO7260, CMC
Dağıtıcı miktarı	50, 100, 250 g/t

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Minerallerin Elektrokinetik Özelliklerinin Belirlenmesi

#### 4.1.1. Kalkopirit ve kil minerallerinin pH'a bağlı zeta potansiyeli değerleri

Zeta potansiyeli ölçümleri mineral tanelerinin yüzey yükü özelliklerini belirlemek ve taneler arasındaki etkileşim mekanizmasını anlamak için önemlidir. Çalışılan minerallerin (kalkopirit, kaolin, montmorillonit ve illit) zeta potansiyellerinin pH'a bağlı olarak değişimi Şekil 4.1'de verilmiştir. Montmorillonit için sıfır yük noktası (syn) tespit edilememiştir. Kalkopirit, kaolin ve illit için tespit edilen syn sırasıyla 4,5-2,5-2,1'dir. Bu değerlerin altındaki pH değerlerinde mineral yüzeyleri pozitif, üzerindeki pH değerlerinde ise negatif yüzey yüküne sahiptir. Kalkopiritin zeta potansiyeli pH 5,5-12 arasında artan pH ile -20 mV'dan -40 mV'a kadar azalırken, pH 4,5'in altında pozitif yüzey şarjı göstermiştir. Yani, bu noktada (syn) mineralden çözeltiliye veya çözeltiliden mineral yüzeyine iyon geçişi (iyon alış verişi) olmamaktadır. Montmorillonit dışında tüm mineraller için artan ortam pH değeri ile birlikte tanelerin zeta potansiyeli daha da negatif olmaktadır. Montmorillonitte pH 4'ten sonra zeta potansiyeli değeri yaklaşık olarak sabitlenmektedir. Elde edilen zeta potansiyel eğrileri literatürdeki zeta potansiyel eğrileriyle benzerlik göstermektedir (Guan ve ark., 2009; Peng ve Zhao, 2011; Reyes-Bozo ve ark., 2011; Farrokhpay ve Ndlovu, 2013; Ndlovu ve ark., 2014).

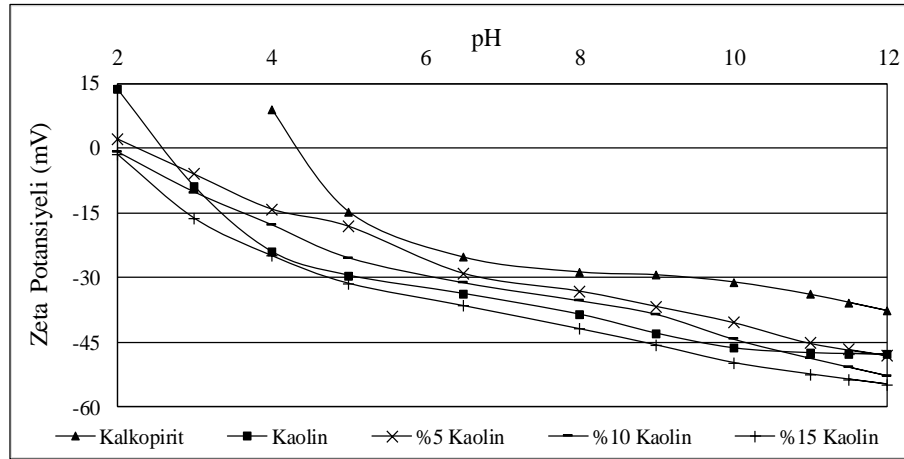


Şekil 4.1. Kalkopirit ve kil minerallerinin pH'a bağlı olarak zeta potansiyeli değişimi

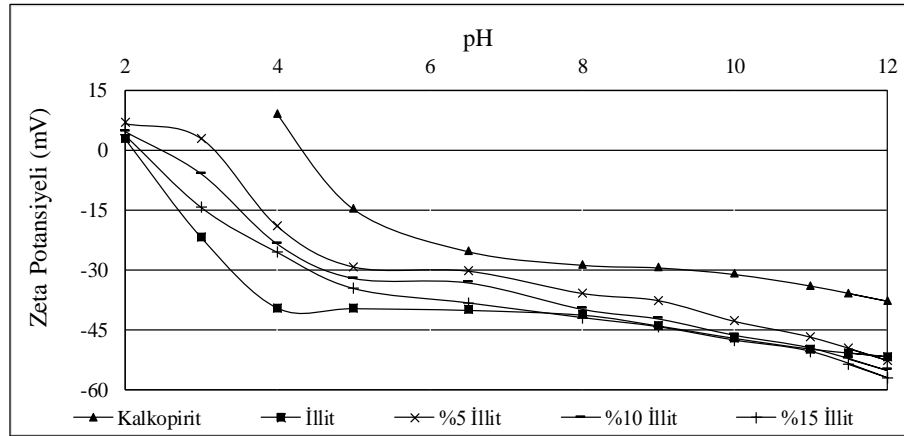
Ortamdaki hidrojen iyonu konsantrasyonu arttığında mineral yüzeyine  $H_3O^+$  iyonları adsorblanmakta ve yüzey yükünün negatifliği azalmaktadır. pH arttıkça ( $pH > 7$ ) ortamdaki  $OH^-$  iyonlarının konsantrasyonu artmakta ve mineral yüzeyindeki  $H_3O^+$  iyonlarının azalmasını sağlamaktadır, böylece yüzey yükü negatifliği artmaktadır.

#### 4.1.2. Farklı tür ve miktarda kil içeren kalkopirit mineralinin pH'a bağlı zeta potansiyeli değerleri

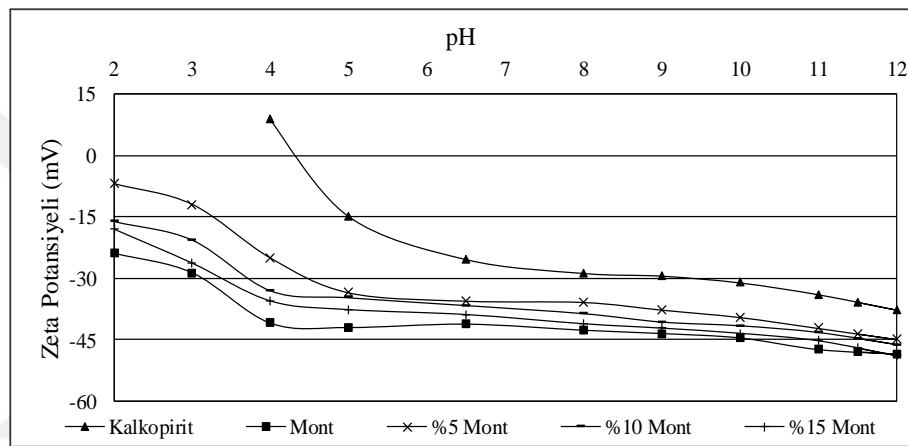
Farklı oranlarda (%5, 10 ve 15) kil minerali içeren kalkopirit mineralinin, pH'a bağlı zeta potansiyeli değişimleri Şekil 4.2-4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.2'de kalkopirit mineraline %5'lik kaolin ilavesi ile zeta potansiyeli tüm pH değerlerinde azalmakta, %10 kaolin ilavesi ile kalkopirit mineralinin pH 10-12 değerlerinde kaoline yakın yüzey yüküne sahip olduğu görülmektedir. %15 kaolin ilavesi ise kalkopiritin zeta potansiyeli değerleri, yüzeylerinin kaolin ile kaplanmış gibi sonuç vermesine neden olmuştur. Şekil 4.3-4.4'te illit ve montmorillonitin %15 ilavesi ile kalkopirit minerali illit ve montmorillonit yüzeyi gibi hareket etmektedir. Bu durum, kil tanelerinin kalkopirit tanelerinin yüzeylerine hem asidik hem de bazik pH değerlerinde, muhtemelen bir kaplama etkisi oluşturduğu anlamına gelmektedir (Basnayaka ve ark., 2017).



Şekil 4.2. Kaolin ilavesinin kalkopiritin zeta potansiyeline etkisi



Şekil 4.3. İllit ilavesinin kalkopiritin zeta potansiyeline etkisi



Şekil 4.4. Montmorillonit ilavesinin kalkopiritin zeta potansiyeline etkisi

Başlangıçta alkali pH'larda -30 ve -40 mV aralığında yüzey yüküne sahip olan kalkopirit örneği, 3 farklı kil minerallerinin ilavesiyle daha da negatif yük kazanmaktadır. Kil miktarı ilavesi arttıkça karışımın zeta potansiyelinin kile benzer yüzey yüküne sahip olduğu bulunmuştur. Her ne kadar kalkopirit ile kil alkali pH değerlerinde negatif yük sergilemelerine rağmen, yük dengesinden dolayı her kil mineralinin üzerinde pozitif yükler de vardır, özellikle montmorillonit tipi tabakalı killerin kenarlarının pozitif yüzeylerinin ise negatif yük taşıdığı bilinmektedir (Gülgönül ve ark., 1995). Bu özelliğinden dolayı killerin negatif yüklü kalkopirit üzerine elektrostatik çekim ile yapıştığı anlaşılmaktadır. Silikatlar yer kabuğunda en bol bulunan minerallerdir ve kolayca ıslanan, suyun  $H^+$  iyonları ile bağ kurmakta çok istekli davranan bileşiklerdir. Kil minerallerinin bazal yüzeyleri sabit negatif yük taşımaktadır. Bu nedenle, pH'a bağlı kil minerallerinin yükleri, kenardaki hidroksil gruplarının varlığının bir sonucudur. Kil minerallerinin zeta potansiyeli değerlerinin belirlenmesi çoğunlukla bazal yüzeylerdeki yüzey yüklerinden olmaktadır (Peng ve Zhao, 2011).

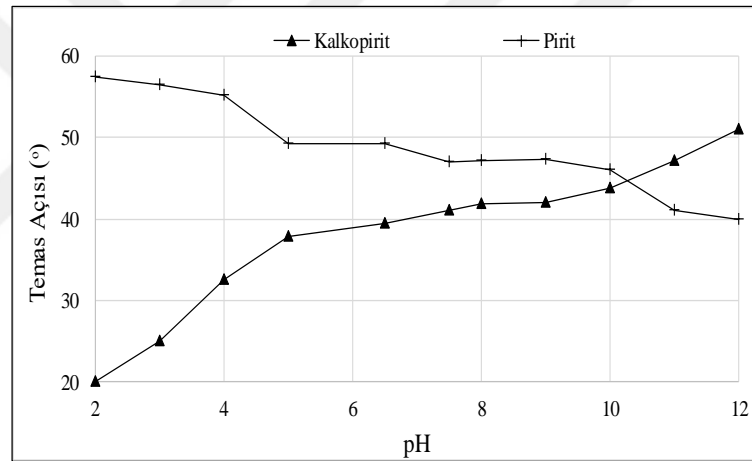


## 4.2. Temas Açısı Sonuçları

Temas açısı mineral yüzeylerinin ıslanma karakteristiği hakkında veri sağlamada yararlı bir göstergedir. Bu nedenle ortam pH değerinin ve 3418A toplayıcısının (pH değeri 10, 11 ve 12’de) minerallerin temas açısına etkisi belirlenmiştir.

### 4.2.1. Ortam pH değerinin minerallerin temas açısına etkisi

Farklı pH ortamlarında kalkopirit ve pirit minerallerinin ölçülen temas açısı değerleri Şekil 4.5’te verilmiştir. Kalkopiritin temas açısının asidik ortamda çok düşük olduğu, piritin ise asidik ortamda temas açısının arttığı gözlenmiştir. Temas açısı kalkopirit için pH değeri arttıkça artmıştır.



Şekil 4.5. Ortam pH değerinin kalkopirit ve pirit minerallerinin temas açısına etkisi

Pirit yüzeyleri, asidik koşullar altında daha yüksek bir hidrofobiklik göstermiştir. Pirit yüzeyi oksitlenmiş ve bu en çok  $\text{pH} < 6.0$ 'da belirgindir (Monte ve ark., 1997). Yüksek pH, pirit yüzeyindeki sülfür anyonunun suyun içindeki  $\text{OH}^-$  anyonu ile yer değiştirerek yüzeyin yüksek değerlerde eksi işaret kazanmasına ve oksitlenmesine neden olmaktadır. Bu durumda cevherin içerdiği bakır sülfür mineralinde yüksek pH'a bağlı bir etkileşim olmadığından bakır minerali hidrofobik yapılarak seçimli olarak yüzdürülmektedir. Bu nedenle pirit içeren sülfür cevherlerinde ortam pH'ı ve pH kıvamlama süresi piriti bastırmak için en etkili değişkenlerdir (Atak, 1990).

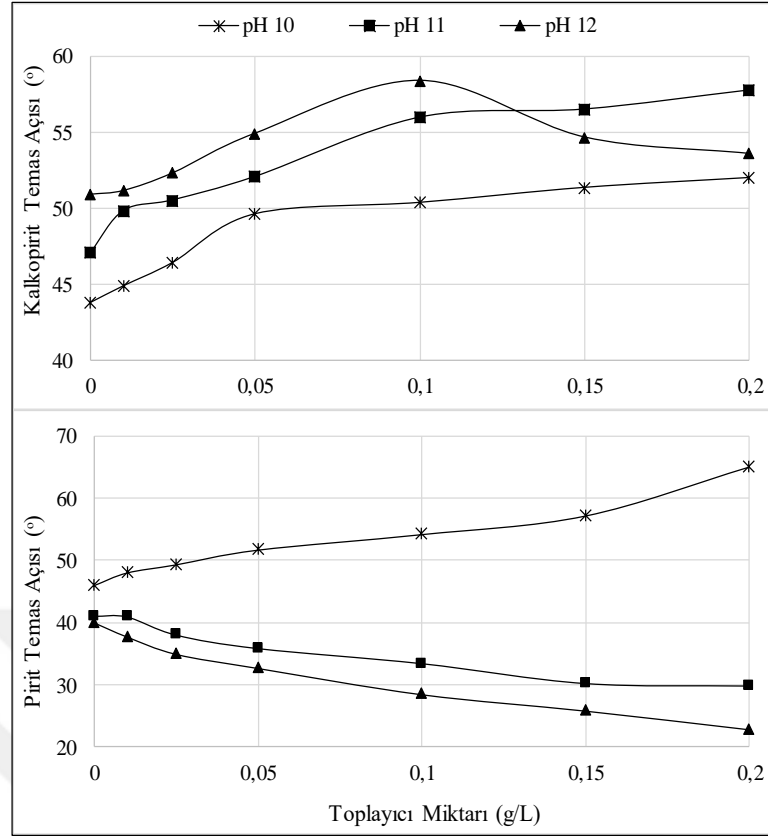
#### 4.2.2. Toplayıcı miktarının minerallerin temas açısına etkisi

En uygun toplayıcı olarak belirlenen 3418A'nın temas açısına etkileri bazik (pH 10, 11 ve 12) ortamda, 100 mL'lik distile suya %1'lik toplayıcı çözeltilerinden 0,01-0,2 g/L ilave edilerek ve 3 dk karıştırılarak incelenmiştir. Şırınga ile hem kalkopirit hem de pirit yüzeyine hava kabarcığı tutturulup, temas açıları ölçülmüştür.

pH değeri arttıkça kalkopiritin temas açısı genel itibarıyla artmıştır (Çizelge 4.1 ve Şekil 4.6). 3418A kalkopirit yüzeyinin hidrofobikliğini artırmış ve maksimum temas açısı 58,4° pH 12 de 0,1 g/L toplayıcı konsantrasyonunda elde edilmiştir, ancak toplayıcı konsantrasyonunda daha fazla artış, temas açısında azalmaya neden olmuştur. Bu durumun çok katlı adsorpsiyondan kaynaklandığı düşünülmektedir. Alkali pH değerlerinde, 3418A varlığında kalkopirit yüzeyinin hidrofobik olduğu ve pH seviyesi düştükçe piritin temas açısı değerinin yükseldiği görülmektedir. Piritin pH 10'da artan toplayıcı konsantrasyonu ile temas açısı artarken pH 11 ve 12'de artan konsantrasyonla düşmüştür.

**Çizelge 4.1.** 3418A toplayıcısının kalkopirit/pirit minerallerinin temas açısı üzerine etkisi

Kalkopiritin Temas Açısı (°)							
pH	Toplayıcı Miktarı (g/L)						
	0	0,01	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2
10	43,8	44,9	46,45	49,66	50,41	51,4	52,05
11	47,12	49,86	50,56	52,1	55,99	56,52	57,77
12	50,98	51,23	52,38	54,96	58,4	54,71	53,64
Piritin Temas Açısı (°)							
pH	Toplayıcı Miktarı (g/L)						
	0	0,01	0,025	0,05	0,1	0,15	0,2
10	45,99	47,99	49,29	51,63	54,1	57,06	64,85
11	41,01	40,9	37,99	35,82	33,4	30,2	29,8
12	39,97	37,71	34,92	32,66	28,45	25,82	22,83



Şekil 4.6. 3418A toplayıcısının kalkopirit/pirit minerallerinin temas açısına etkisi

### 4.3. Flotasyon Deneyleri

#### 4.3.1. Yüksek tenörlü cevher ile gerçekleştirilen flotasyon deney sonuçları

Kil minerallerinin kalkopirit flotasyonuna etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen deneyler öncesinde, tesisten temin edilen yüksek tenörlü kalkopirit numunesi ile flotasyon deneyleri gerçekleştirilerek optimum tenör ve verimi sağlayan flotasyon koşulları belirlenmiştir. Tane boyutu, pH, pH kıvamlama süresi, bastırıcı/dağıtıcı cinsi/miktarı-kıvamlama süresi, toplayıcı cinsi/miktarı-kıvamlama süresi ve köpürtücü cinsi/miktarı bu aşamada çalışılan deneysel parametrelerdir. Gerçekleştirilen deneyler kapsamında kalkopirit cevherinin kaba flotasyon şartları optimize edilmiş ve killerin etkisinin belirlendiği deneysel çalışmalar bu aşamada optimize edilen deneysel koşullar altında gerçekleştirilmiştir.

#### 4.3.1.1. Tane boyutunun kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi

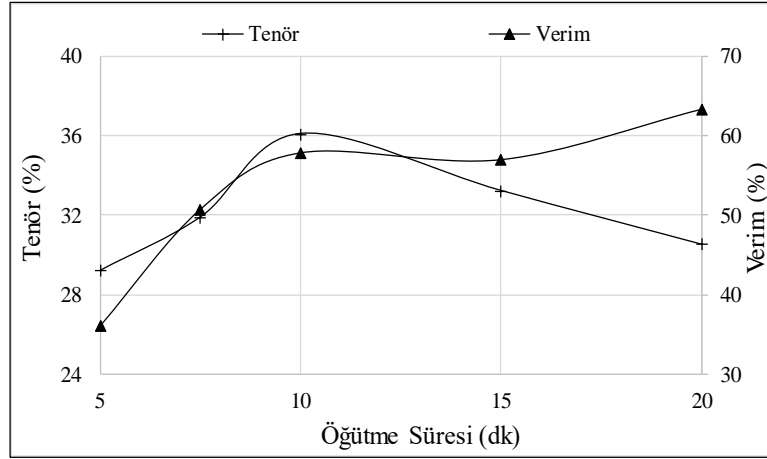
Besleme boyutunun flotasyonda önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir ve yüksek verim ile kabul edilebilir konsantre tenörü elde etmek için öğütme kilit noktadır. Öğütme süresinin uzatılması, mineral tanelerinin yüzey alanını artırmaktadır. Çok ince taneler mekanik taşıma eğiliminde olduğu için, öğütme için en büyük zorluk, en iyi serbestleşme derecesi ve en iyi tane boyut dağılımını sağlayan ve aynı zamanda ince tanelerin oluşumunu en aza indirgeyen koşulların belirlenmesidir.

Bu çalışmada, tane boyut dağılımının kalkopirit flotasyonuna olan etkisi farklı öğütme süreleri göz önüne alınarak incelenmiştir. Cevher farklı sürelerde (5, 7.5, 10, 15 ve 20 dk) öğütülerek elde edilen numune ile flotasyon deneyleri yapılmış ve bu aşamada deneylerde kullanılan kimyasal miktarları tesise göre baz alınmıştır. En yüksek kalkopirit tenörü %36,10 ile 10 dk öğütme yapılan cevher ile elde edilmiştir. Bu süreden sonra verim artmakta, ancak tenör değerlerinde düşme gözlenmektedir (Çizelge 4.2, Şekil 4.7).

Çizelge 4.2. Farklı öğütme sürelerinde yapılan flotasyon deney sonuçları (pH:11, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 50 g/t 3418A, 80 g/t MIBC)

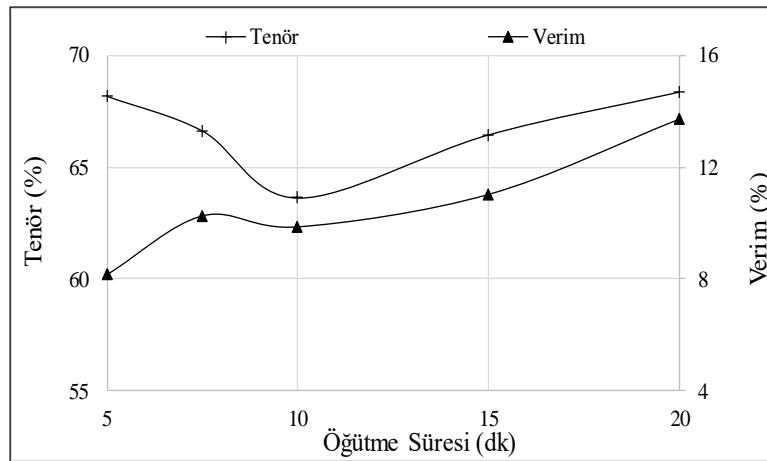
Öğütme Süresi (dk)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
5	Konsantre	9,40	10,12	40,62	29,23	68,15	2,62	36,18	8,17	1,77
	Artık	90,60	1,85	38,64	5,35	79,53	15,12	63,82	91,83	98,23
7,5	Konsantre	12,09	11,05	40,71	31,91	66,60	1,49	50,77	10,26	1,29
	Artık	87,91	1,47	38,57	4,25	80,09	15,66	49,23	89,74	98,71
10	Konsantre	12,16	12,50	40,60	36,10	63,63	0,28	57,81	9,86	0,24
	Artık	87,84	1,26	38,58	3,65	80,51	15,84	42,19	90,14	99,76
15	Konsantre	13,02	11,50	41,04	33,22	66,44	0,33	56,95	11,03	0,31
	Artık	86,98	1,30	38,50	3,76	80,26	15,99	43,05	88,97	99,69
20	Konsantre	15,74	10,57	41,10	30,52	68,34	1,13	63,27	13,71	1,28
	Artık	84,26	1,15	38,41	3,31	80,35	16,34	36,73	86,29	98,72
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00

Kalkopirit mineralinin tenör ve verimine etkisi incelendiğinde, düşük öğütme sürelerinde değerli mineral taneleri yeteri kadar serbestleşmemiştir. Bu durum 5 dk öğütme sonucu elde edilen numune ile gerçekleştirilen flotasyon deneyi sonucunda görülmektedir. Tesiste flotasyona tabi tutulan cevherin tane boyut dağılımına en yakın olan 7,5 dk'lık öğütme ile elde edilen cevher ile gerçekleştirilen flotasyon deneyleri sonucunda %31,91 tenör ve %50,77 verimli kalkopirit elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Öğütme süresinin kalkopirit tenör ve verimine etkisi

Yüksek öğütme sürelerinde (20 dk) ise verim artmış, ancak tenör düşmüştür. Bu durumun, tane boyutunun küçülmesiyle birlikte artan yüzey alanı nedeniyle toplayıcı konsantrasyonunun yetersiz kalmasından veya artan ince boyutlu malzemenin kabarcıklar arasında mekanik taşıma ile konsantreye alınmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bu aşamada gerçekleştirilen flotasyon deneyleri sonucunda en uygun öğütme süresi 10 dk olarak belirlenmiştir. Besleme cevheri yaklaşık %80'e yakın pirit içermektedir (Çizelge 4.2). Öğütme süresinin artmasıyla pirit minerali için hem tenör hem de verim açısından artış olmuştur (Şekil 4.8).



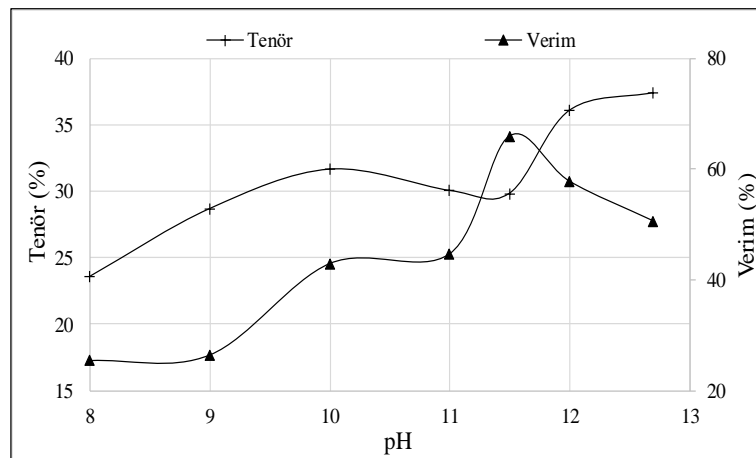
Şekil 4.8. Öğütme süresinin pirit tenör ve verimine etkisi

#### 4.3.1.2. pH değerinin kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi

Flotasyonda pH çok önemli bir rol oynamaktadır. Bir mineralin yüzey özellikleri ve davranışı, her türlü reaktifin adsorpsiyonunu düzenleyen sıvı fazın pH değerine bağlıdır. 7 farklı pH değerinin (8, 9, 10, 11, 11.5, 12 ve 12.70) kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisinin belirlendiği flotasyon deneylerinde, pH ayarlamak için sönmüş kireç (kireç sütü) kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda pH 11,5'te kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.3-Şekil 4.9).

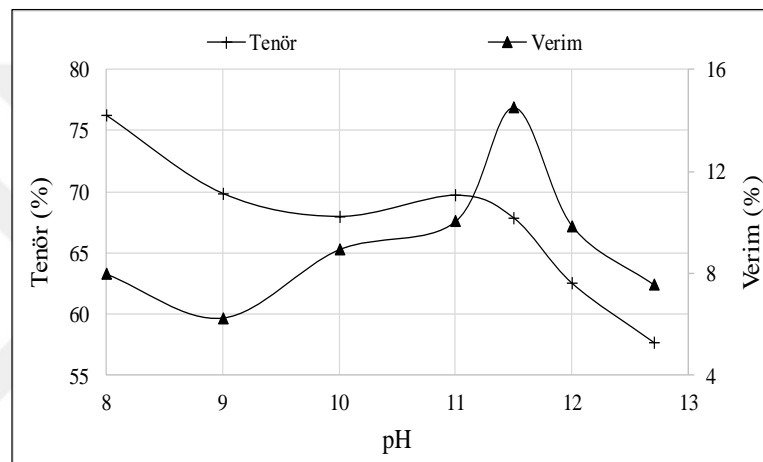
**Çizelge 4.3.** Farklı pH değerlerinde yapılan flotasyon deney sonuçları  
(100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 50 g/t 3418A, 80 g/t MIBC)

pH	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
8	Konsantre	8,21	8,17	42,67	23,58	76,26	0,16	25,50	7,98	0,09
	Artık	91,79	2,13	38,49	6,17	78,65	15,18	74,50	92,02	99,91
9	Konsantre	7,02	9,94	41,26	28,69	69,88	1,43	26,52	6,25	0,72
	Artık	92,98	2,08	38,65	6,00	79,10	14,89	73,48	93,75	99,28
10	Konsantre	10,31	10,96	41,28	31,66	67,99	0,35	42,98	8,94	0,26
	Artık	89,69	1,67	38,55	4,83	79,66	15,51	57,02	91,06	99,74
11	Konsantre	11,31	10,41	41,60	30,05	69,72	0,23	44,73	10,05	0,18
	Artık	88,69	1,64	38,48	4,73	79,57	15,70	55,27	89,95	99,82
11,5	Konsantre	16,79	10,34	40,67	29,85	67,85	2,30	65,97	14,52	2,77
	Artık	83,21	1,08	38,46	3,11	80,60	16,30	34,03	85,48	97,23
12	Konsantre	12,16	12,50	40,09	36,10	62,53	1,38	57,81	9,86	0,24
	Artık	87,84	1,26	38,58	3,65	80,51	15,84	42,19	90,14	99,76
12,7	Konsantre	10,28	12,96	38,25	37,43	57,71	4,86	50,65	7,56	3,58
	Artık	89,72	1,45	38,90	4,18	80,83	14,99	49,35	92,44	96,42
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00



**Şekil 4.9.** Pülp pH değerinin kalkopirit tenör ve verimine etkisi

Sadece bakır cevherlerinin flotasyonunda değil, aynı zamanda diğer sülfürlü cevherlerin flotasyonunda da sorun çıkaran minerallerden olan pirit, alkali ortamda bastırılırken, asidik ortamda yüzebilirliği önemli ölçüde artmaktadır (Bulatovic, 2007). Cevherde hem pirit hem de kalkopiritin bulunmasından dolayı, flotasyonda seçicilik özelliğinin kullanılması (seçimli flotasyon) önem kazanmaktadır. Baziklik arttıkça kalkopirit yüzeyi daha fazla hidrofobiklik kazanmakta ve konsantreye gelen mineral miktarı daha fazla olmaktadır. pH 11,5'ten sonra kalkopirit verimi azalmakta, kalkopirit tenörü ise artmaya başlamaktadır. Pirit mineralinde ise pH 11,5'ten sonra hem tenör hem de verim değerlerinde düşüş gözlenmekte yani pirit minerali bastırılmaktadır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Pülp pH değerinin pirit tenör ve verimine etkisi

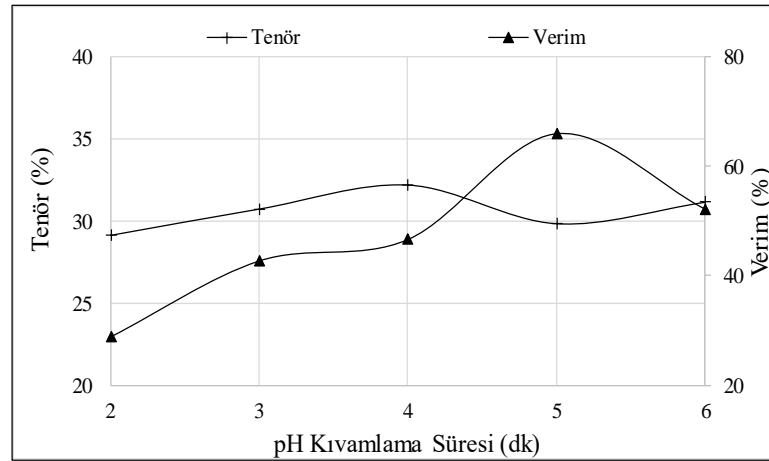
Güçlü alkali koşullar altında pirit verimindeki düşüş (Şekil 4.9), pirit yüzeyinde bir hidrofilik ferrik hidroksit filminin oluşmasından kaynaklanmaktadır (Deng ve ark., 2017). Yüksek pH değerlerinde hidroksil iyon aktivitesinin yüksek olması nedeniyle pirit yüzeyi oksitlenmekte ve hidrofilik karakterli demir hidroksit veya oksit bileşikleri ile kaplanmaktadır (Chander ve Briceno, 1987; Ekmekçi ve Demirel, 1997). Hedef mineral olarak seçilen kalkopirit yüzeyinde ise pH değerine bağlı bir etkileşim olmadığından, kullanılacak toplayıcı sadece bakır mineralini susevmez yaparak seçimli flotasyonu gerçekleştirmektedir (Çilek, 2006). Sonuç olarak, bundan sonraki deneylerde en iyi pH değeri 11,5 olarak kabul edilmiştir.

#### 4.3.1.3. pH kıvamlama süresinin kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi

Flotasyon deneylerinde pH kıvamlama süresinin etkisi 2, 3, 4, 5 ve 6 dk'lık sürelerde araştırılmıştır. Çizelge 4.4'te verilen flotasyon sonuçları incelendiğinde, 5 dk pH kıvamlama süresinde kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerlerinin elde edildiği (Şekil 4.11) ve 5 dk üstündeki kıvamlama süresinde pirit tenör ve veriminin düştüğü gözlenmiştir (Şekil 4.12).

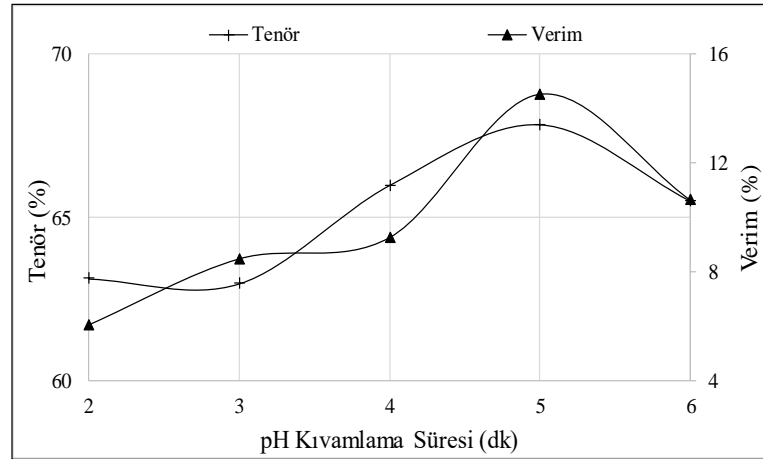
**Çizelge 4.4.** Farklı pH kıvamlama sürelerinde yapılan flotasyon deney sonuçları (pH 11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 50 g/t 3418A, 80 g/t MIBC)

Kıvamlama Süresi (dk)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
2	Konsantre	7,50	10,09	38,25	29,14	63,11	7,74	28,79	6,04	4,17
	Artık	92,50	2,02	38,88	5,85	79,70	14,45	71,21	93,96	95,83
3	Konsantre	10,55	10,64	38,66	30,74	62,96	6,30	42,68	8,46	4,76
	Artık	89,45	1,69	38,85	4,87	80,28	14,85	57,32	91,54	95,24
4	Konsantre	10,99	11,15	40,51	32,20	65,98	1,82	46,60	9,24	1,43
	Artık	89,01	1,58	38,62	4,56	80,00	15,45	53,40	90,76	98,57
5	Konsantre	16,79	10,34	40,67	29,85	67,85	2,30	65,97	14,52	2,77
	Artık	83,21	1,08	38,46	3,11	80,60	16,30	34,03	85,48	97,23
6	Konsantre	12,73	10,79	39,97	31,15	65,51	3,35	52,20	10,63	3,05
	Artık	87,27	1,44	38,66	4,16	80,35	15,49	47,80	89,37	96,95
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00



**Şekil 4.11.** pH kıvamlama süresinin kalkopirit tenör ve verimine etkisi





Şekil 4.12. pH kıvamlama süresinin pirit tenör ve verimine etkisi

#### 4.3.1.4. Bastırıcı/dağıtıcı cinsi ve miktarının kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi

Flotasyonda kullanılan toplayıcının hedef mineralin yüzeyini susevmez yaparken diğer minerallerin yüzeyine etki etmesi istenmemektedir. Bu nedenle toplayıcı adsorpsiyonu mümkün olan diğer minerallerin yüzeyine toplayıcı adsorpsiyonunun engellenmesi ve toplayıcı adsorpsiyonunu zayıflatan gang minerallerinin yüzeyinin hidrofilikliğini artırmak için inorganik ve organik bastırıcı kimyasallar eklenmektedir. Ayrıca flotasyon süresince pülp içinde küçük boyutlu tanelerin topaklanması ve iri boyutlu tanelerin yüzeyinin kaplanması istenilmeyen bir durumdur. Pülp içinde tanelerin birbirinden uzak halde olması istenilmekte ve bunun için dağıtıcılar kullanılmaktadır. Bu amaçla flotasyon deneylerinde sodyum silikat, sodyum polifosfat ve sodyum hegzametafosfat kullanılarak, uygun bastırıcı/dağıtıcı ve miktarı belirlenmiştir.

Sodyum silikat inorganik bir bastırıcıdır, sülfürlü ve bazı sülfürlü olmayan minerallerinin flotasyonunda gang mineralleri için bastırıcı/dağıtıcı olarak kullanılmaktadır. Flotasyon deneyleri sonucunda 100 g/t sodyum silikat miktarında kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.5- Şekil 4.13a1-a2). Bu miktarın üzerinde verimde düşme gerçekleşirken, tenörde artış olmuştur. Şekil 4.13a2'de sodyum silikat miktarının artmasının pirit mineralinin bastırılmasını sağladığı görülmektedir. Sodyum silikatın dağıtıcı mı yoksa bastırıcı olarak mı kullanılacağı  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranına bağlı olarak değişmektedir. Bu oran 1,6-3,75 arasında değişirken, arttıkça bastırıcı etkisi artmaktadır (Çilek, 2006). Kullanılan sodyum silikatın  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı ise 2'dir ve bu yüzden sodyum silikat hem dağıtıcı hem de bastırıcı özelliği göstermektedir.

100 g/t üzerinde sodyum silikatın, dağıtıcı özelliğinin yanında bastırıcı özelliği de gösterdiği anlaşılmaktadır. Sodyum silikat veya cam suyu cevher hazırlamada gangı dağıtmada/bastırmada en sık kullanılan bir kimyasaldır. Metalik olmayan fosfat flotasyonunda silikatlı ve karbonatlı gang minerallerini bastırmada en sık kullanılan bastırıcıdır. Demir flotasyonunda geniş pH değeri aralığında kaoliniti dağıtmada kullanılmaktadır. Sodyum silikat sulu çözelti içerisindeyken;  $\text{pH} < 9,4$  iken  $\text{Si}(\text{OH})_4$  (yüksüz silika jel),  $12,6 > \text{pH} > 9,4$  aralığında  $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$  ve  $\text{pH} > 12,6$  iken  $\text{SiO}_2(\text{OH})_2^-$  yükü kazanmaktadır. Bu negatif yükler gang minerallerini dağıtma ve bastırmada yardımcı olmaktadır (Feng ve ark., 2012). Yüksek oranda sodyum silikat kullanılması durumunda, gerek pülp içerisindeki aktif oksijen miktarını tükettiği, gerekse mineral yüzeylerine toplayıcı adsorbsiyonunu engellediği belirtilmektedir (Şen ve Çilingir, 2009; Bayoğlu, 2013). Nitekim değişik miktarlarda  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  kullanıldığı deneylerde, 100 g/ton  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  değerinden sonra kalkopirit veriminde kısmi düşüşün meydana geldiği görülmektedir.

Sodyum polifosfatın etkisinin araştırıldığı ve Çizelge 4.6'da verilen flotasyon sonuçları incelendiğinde, 100 g/t sodyum polifosfat miktarında kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.13b1/b2). Sodyum polifosfat konsantrasyonu arttıkça kalkopirit tenörü artmıştır. Sodyum silikata göre daha fazla değerli mineral yüzdürülürken, kalkopirit verimi yeteri kadar artmamıştır. Polifosfat reaktifleri, cevher hazırlamada dağıtıcı ve reolojik değiştiriciler olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Farrokhpay ve ark., 2012).

Sodyum hegzametafosfat, genellikle kalsit ve kuvars gibi bazı gang minerallerini bastırmak için kullanılmaktadır. Dağıtıcı olarak kullanılan sodyum hegzametafosfat ile elde edilen flotasyon sonuçları (Çizelge 4.7) incelendiğinde, 100 g/t sodyum hegzametafosfat miktarında kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.13c1/c2). Sodyum hegzametafosfatın ortamdaki dağılmış tanelerin negatif zeta potansiyelini artırarak ve böylece ortamdaki taneler arasındaki elektriksel çift tabakanın itme kuvvetini artırarak bir dağıtıcı olarak hareket ettiği kabul edilmektedir (Song ve ark., 2009).

**Çizelge 4.5.** Farklı sodyum silikat miktarlarında yapılan flotasyon deney sonuçları  
(pH 11.5, 50 g/t 3418A, 80 g/t MIBC)

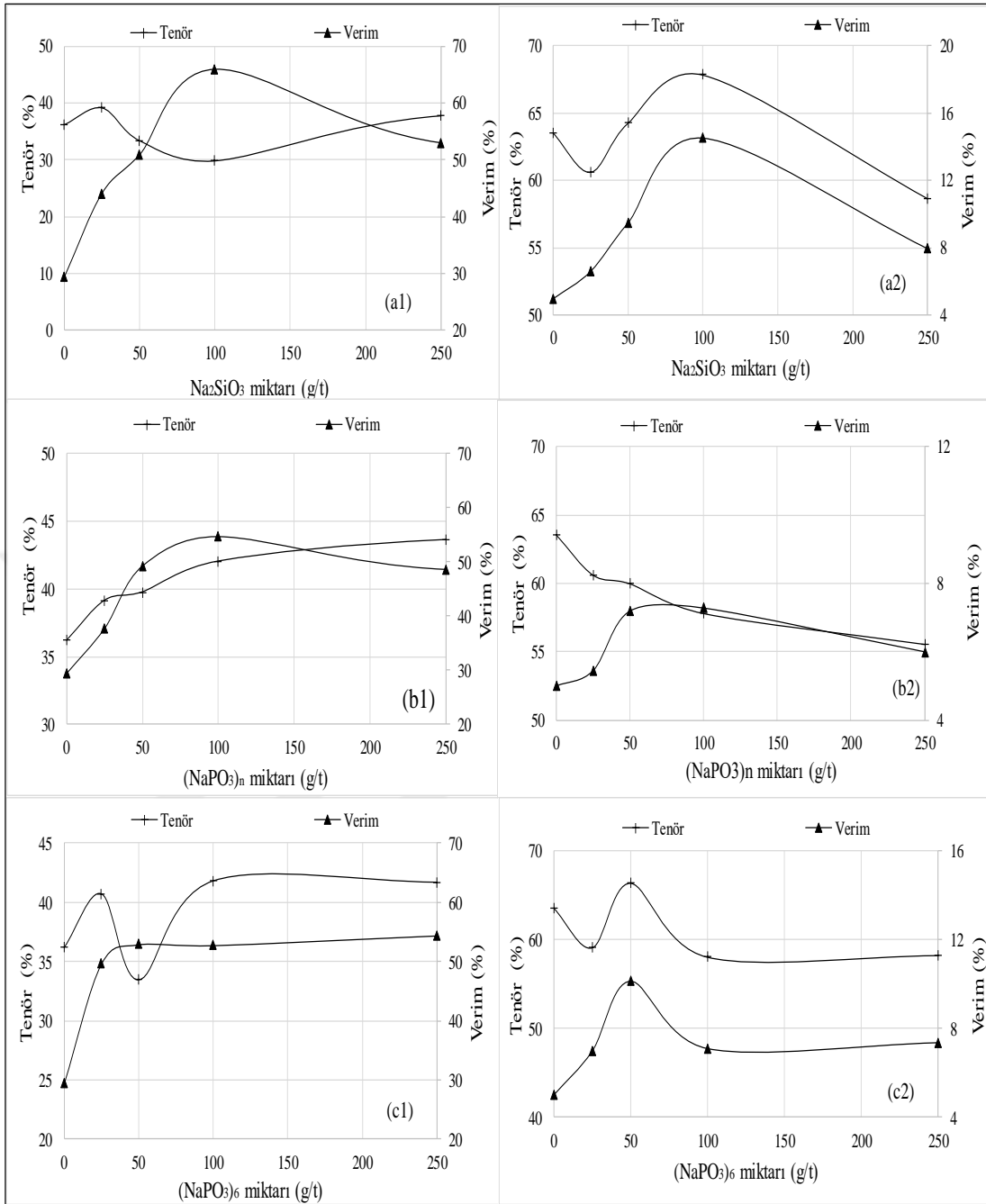
Dağıtıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
0	Konsantre	6,16	12,54	40,59	36,22	63,54	0,25	29,36	4,99	0,11
	Artık	93,84	1,98	38,71	5,72	79,44	14,85	70,64	95,01	99,89
25	Konsantre	8,55	13,56	40,13	39,16	60,60	0,23	44,11	6,61	0,14
	Artık	91,45	1,61	38,71	4,64	80,13	15,23	55,89	93,39	99,86
50	Konsantre	11,58	11,56	40,07	33,39	64,25	2,36	50,92	9,48	1,96
	Artık	88,42	1,46	38,67	4,22	80,32	15,47	49,08	90,52	98,04
100	Konsantre	16,79	10,34	40,67	29,85	67,85	2,30	65,97	14,52	2,77
	Artık	83,21	1,08	38,46	3,11	80,60	16,30	34,03	85,48	97,23
250	Konsantre	10,66	13,08	38,79	37,77	58,65	3,58	53,01	7,97	2,74
	Artık	89,34	1,38	38,83	3,99	80,82	15,18	46,99	92,03	97,26
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00

**Çizelge 4.6.** Farklı sodyum polifosfat miktarlarında yapılan flotasyon deney sonuçları  
(pH 11.5, 50 g/t 3418A, 80 g/t MIBC)

Dağıtıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
0	Konsantre	6,16	12,54	40,59	36,22	63,54	0,25	29,36	4,99	0,11
	Artık	93,84	1,98	38,71	5,72	79,44	14,85	70,64	95,01	99,89
25	Konsantre	7,31	13,56	40,12	39,16	60,59	0,24	37,72	5,44	0,13
	Artık	92,69	1,77	38,80	5,10	80,02	14,88	62,28	94,56	99,87
50	Konsantre	9,41	13,78	40,02	39,78	59,96	0,26	49,30	7,19	0,17
	Artık	90,59	1,47	38,71	4,25	80,38	15,37	50,70	92,81	99,83
100	Konsantre	9,88	14,56	39,70	42,06	57,78	0,16	54,72	7,28	0,11
	Artık	90,12	1,32	38,74	3,82	80,72	15,46	45,28	92,72	99,89
250	Konsantre	8,46	15,11	39,13	43,65	55,53	0,82	48,63	5,99	0,50
	Artık	91,54	1,48	38,80	4,26	80,58	15,16	51,37	94,01	99,50
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00

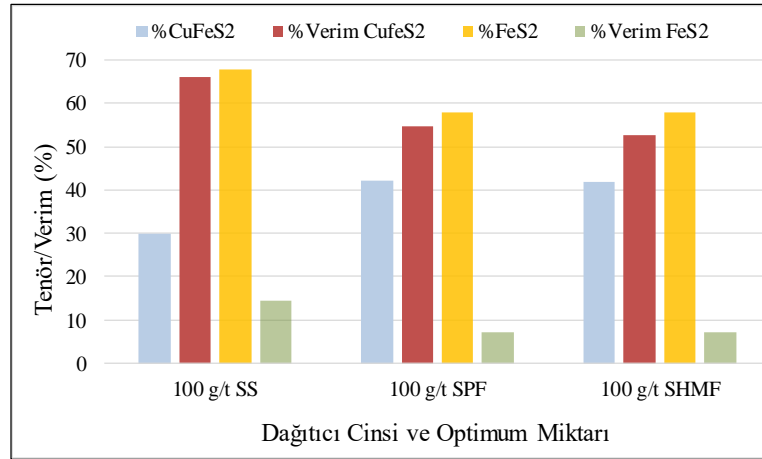
**Çizelge 4.7.** Farklı sodyum hegzametafosfat miktarlarında yapılan flotasyon deney sonuçları  
(pH 11.5, 50 g/t 3418A, 80 g/t MIBC)

Dağıtıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
0	Konsantre	6,16	12,54	40,59	36,22	63,54	0,25	29,36	4,99	0,11
	Artık	93,84	1,98	38,71	5,72	79,44	14,85	70,64	95,01	99,89
25	Konsantre	9,27	14,09	39,88	40,68	59,09	0,23	49,65	6,98	0,15
	Artık	90,73	1,46	38,72	4,22	80,44	15,35	50,35	93,02	99,85
50	Konsantre	12,00	11,59	41,07	33,48	66,35	0,18	52,88	10,15	0,15
	Artık	88,00	1,41	38,52	4,07	80,11	15,83	47,12	89,85	99,85
100	Konsantre	9,59	14,47	39,72	41,78	58,02	0,19	52,73	7,09	0,13
	Artık	90,41	1,37	38,74	3,97	80,62	15,41	47,27	92,91	99,87
250	Konsantre	9,92	14,43	39,78	41,67	58,21	0,12	54,39	7,36	0,09
	Artık	90,08	1,33	38,73	3,85	80,68	15,47	45,61	92,64	99,91
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00



**Şekil 4.13.** Sodyum silikat (a1-kalkopirit, a2-pirit), sodyum polifosfat (b1-kalkopirit, b2-pirit), sodyum hegzametafosfat (c1-kalkopirit, c2-pirit) miktarlarının tenör ve verime etkisi

Şekil 4.14'te tüm bastırıcı/dağıtıcı için belirlenen optimum konsantrasyonlarda elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Konsantrenin kalkopirit tenörü ve verimi açısından, konsantreye gelen bakır miktarı en iyi sodyum silikat ile elde edilmiş ve diğer değişkenlerin belirlenmesinde sodyum silikat kullanılmıştır.



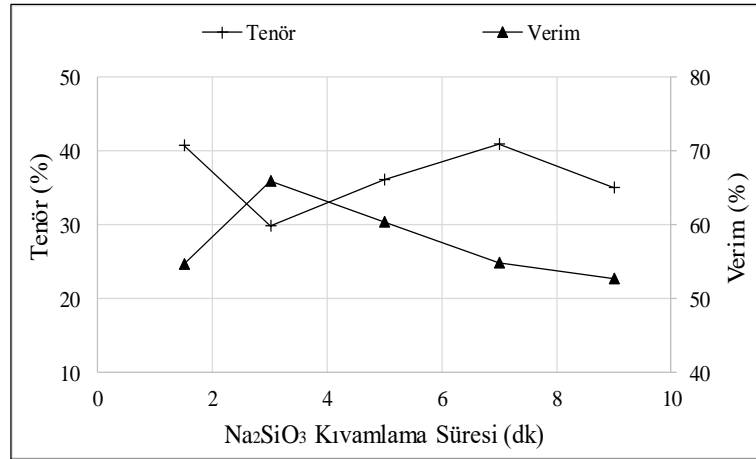
Şekil 4.14. Optimum bastırıcı/dağıtıcı konsantrasyonlarında elde edilen sonuçların karşılaştırılması

#### 4.3.1.5. Sodyum silikat kıvamlama süresinin kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi

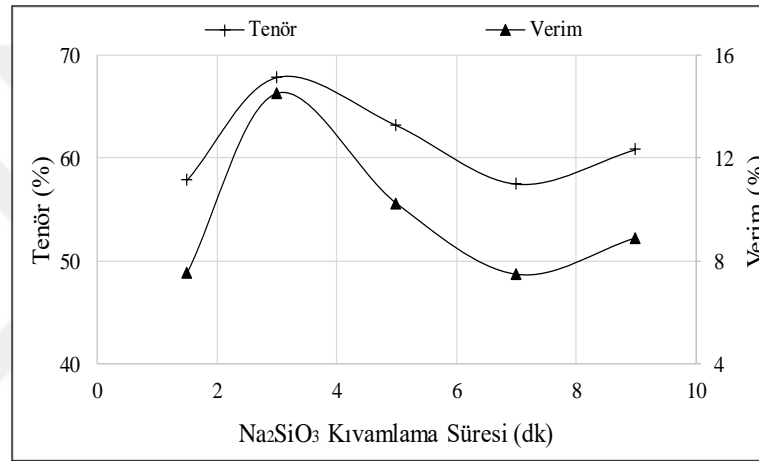
Flotasyon deneylerinde sodyum silikat kıvamlama süresinin etkisi 1.5, 3, 5, 7 ve 9 dk'lık sürelerde araştırılmıştır. Çizelge 4.8'de verilen flotasyon sonuçlarına göre 3 dk kıvamlama süresinde kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.15-4.16). 3 dk kıvamlama süresi sonrasında bir dalgalanma olmuş, 5 dk sonrası kalkopirit verimi düşmüştür. Pülpte oluşan şlam topaklanmalarının, uzun süreli kıvamlama süreleri ile kırıldığı ve bu durumun bastırma etkisini azalttığı anlaşılmaktadır. 3. dk'dan sonra muhtemelen şlamın reaktif adsorpsiyonunu engellediği için flotasyon verimlerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu nedenle bu çalışmadaki tüm deneylerde kıvamlama süresi 3 dk olarak alınmıştır.

Çizelge 4.8. Farklı dağıtıcı kıvamlama sürelerinde yapılan flotasyon deney sonuçları (pH 11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 50 g/t 3418A, 80 g/t MIBC)

Kıvamlama Süresi (dk)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
1,5	Konsantre	10,16	14,14	39,35	40,83	57,85	1,32	54,59	7,49	0,96
	Artık	89,84	1,33	38,77	3,84	80,79	15,38	45,41	92,51	99,04
3	Konsantre	16,79	10,34	40,67	29,85	67,85	2,30	65,97	14,52	2,77
	Artık	83,21	1,08	38,46	3,11	80,60	16,30	34,03	85,48	97,23
5	Konsantre	12,70	12,53	40,43	36,18	63,19	0,62	60,48	10,23	0,57
	Artık	87,30	1,19	38,60	3,44	80,68	15,89	39,52	89,77	99,43
7	Konsantre	10,17	14,19	39,23	40,97	57,50	1,54	54,86	7,45	1,12
	Artık	89,83	1,32	38,78	3,82	80,83	15,35	45,14	92,55	98,88
9	Konsantre	11,44	12,13	38,98	35,04	60,83	4,13	52,77	8,87	3,39
	Artık	88,56	1,40	38,81	4,05	80,73	15,22	47,23	91,13	96,61
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00



Şekil 4.15. Dağıtıcı kıvamlama süresinin kalkopirit tenör ve verimine etkisi



Şekil 4.16. Dağıtıcı kıvamlama süresinin pirit tenör ve verimine etkisi

#### 4.3.1.6. Toplayıcı cinsi ve miktarının kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi

Toplayıcı cinsinin tayini için; 3418A (Cytec), MX-515 (Cytec), HX-231(Clariant), NaIPX (Kimsan) ve KAX (Kimsan) kullanılarak flotasyon deneyleri yapılmıştır. Toplayıcıların bozulmaları çok kısa sürede gerçekleştiği için toplayıcılar flotasyon öncesi %1 stok çözelti olacak şekilde günlük olarak hazırlanmıştır.

Kimyasal bileşiminde sodyum diizobütil ditiyofosfinat bulunan Aerophine 3418A ile 50 g/t toplayıcı miktarında kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.9, Şekil 4.17a). Toplayıcı miktarının artması ile birlikte verimde artış olurken, kalkopirit tenöründe ise düşüş gözlenmektedir. Bunun nedeni toplayıcıların bağlı taneleri de susevmez yapma eğiliminde olduğu kanısına varılmaktadır. Pirit tenör ve verimi toplayıcı miktarının artması ile artış göstermektedir.

Kimyasal bileşimi izopropanol, ditiyofosfat ve tiyonokarbomat karışımı olan MX-515 ile 50 g/t toplayıcı miktarında (Çizelge 4.10, Şekil 4.17b) ve tiyokarbomat türü bir toplayıcı olan HX-231 ile 50 g/t toplayıcı miktarında kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.11, Şekil 4.17c).

Ksantat türü toplayıcılar ile kalkopirit cevheri pH 5-11,5 değerleri arasında kolaylıkla yüzmektedir (Bulatovic, 2007). Ksantat türü toplayıcı olan; sodyum izo propil ksantat (NaIPX) ile 50 g/t NaIPX miktarında (Çizelge 4.12, Şekil 4.17d) ve potasyum amil ksantat (KAX) ile 50 g/t KAX miktarında kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.13, Şekil 4.17e).

**Çizelge 4.9.** Farklı 3418A miktarlarında yapılan flotasyon deney sonuçları  
(pH 11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 80 g/t MIBC)

Toplayıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
10	Konsantre	6,48	14,00	39,83	40,43	59,13	0,44	34,49	4,88	0,20
	Artık	93,52	1,84	38,76	5,32	79,80	14,88	65,51	95,12	99,80
50	Konsantre	16,79	10,34	40,67	29,85	67,85	2,30	65,97	14,52	2,77
	Artık	83,21	1,08	38,46	3,11	80,60	16,30	34,03	85,48	97,23
100	Konsantre	19,82	9,01	38,06	26,01	64,77	9,22	67,86	16,36	13,10
	Artık	80,18	1,05	39,02	3,04	81,84	15,12	32,14	83,64	86,90
150	Konsantre	37,33	5,36	37,71	15,49	70,89	13,62	76,12	33,73	36,46
	Artık	62,67	1,00	39,50	2,89	82,97	14,14	23,88	66,27	63,54
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00

**Çizelge 4.10.** Farklı MX-515 miktarlarında yapılan flotasyon deney sonuçları  
(pH 11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 80 g/t MIBC)

Toplayıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
10	Konsantre	6,71	14,21	39,79	41,05	58,64	0,31	36,28	5,02	0,15
	Artık	93,29	1,80	38,76	5,19	79,88	14,93	63,72	94,98	99,85
50	Konsantre	15,96	9,58	41,99	27,68	72,12	0,20	58,17	14,68	0,22
	Artık	84,04	1,31	38,23	3,78	79,66	16,56	41,83	85,32	99,78
100	Konsantre	29,57	5,93	43,66	17,13	82,59	0,28	66,67	31,13	0,60
	Artık	70,43	1,24	36,80	3,59	76,72	19,68	33,33	68,87	99,40
150	Konsantre	35,16	5,49	43,89	15,85	83,92	0,23	73,36	37,61	0,58
	Artık	64,84	1,08	36,09	3,12	75,49	21,39	26,64	62,39	99,42
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00

**Çizelge 4.11.** Farklı HX-231 miktarlarında yapılan flotasyon deney sonuçları  
(pH 11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 80 g/t MIBC)

Toplayıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
10	Konsantre	4,62	17,24	38,43	49,78	50,01	0,21	30,26	2,94	0,07
	Artık	95,38	1,92	38,85	5,55	79,83	14,61	69,74	97,06	99,93
50	Konsantre	10,96	12,62	40,61	36,44	63,43	0,13	52,57	8,86	0,10
	Artık	89,04	1,40	38,61	4,05	80,31	15,65	47,43	91,14	99,90
100	Konsantre	18,48	8,66	42,42	25,00	74,79	0,22	60,81	17,61	0,29
	Artık	81,52	1,26	38,02	3,65	79,29	17,06	39,19	82,39	99,71
150	Konsantre	17,61	9,01	42,32	26,03	73,89	0,07	60,37	16,59	0,09
	Artık	82,39	1,27	38,08	3,65	79,43	16,91	39,63	83,41	99,91
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00

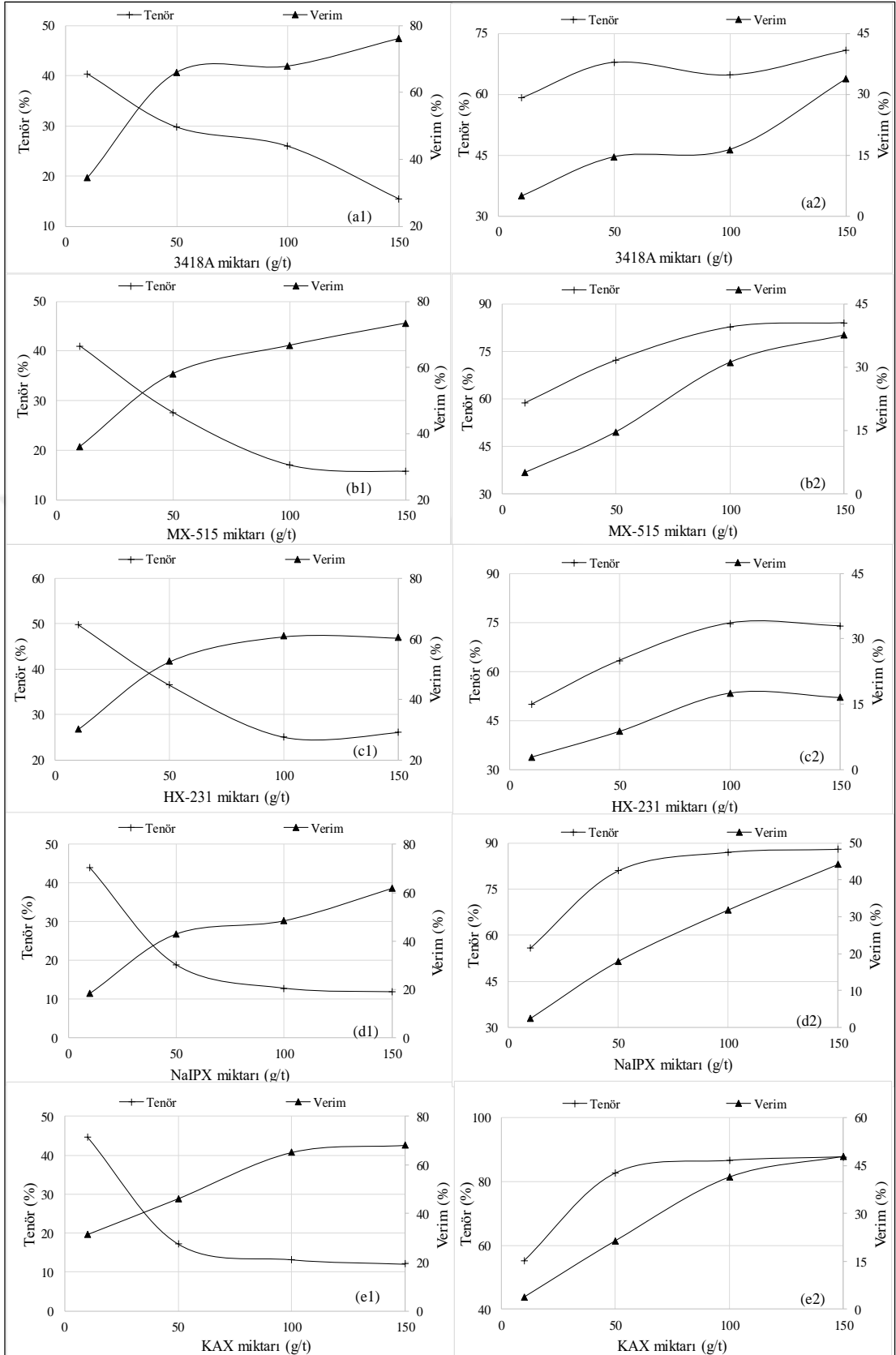
**Çizelge 4.12.** Farklı NaIPX miktarlarında yapılan flotasyon deney sonuçları  
(pH 11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 80 g/t MIBC)

Toplayıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
10	Konsantre	3,19	15,24	39,38	44,01	55,82	0,17	18,50	2,27	0,04
	Artık	96,81	2,21	38,81	6,39	79,20	14,40	81,50	97,73	99,96
50	Konsantre	17,28	6,53	43,36	18,86	80,82	0,32	42,91	17,80	0,40
	Artık	82,72	1,81	37,88	5,24	77,96	16,79	57,09	82,20	99,60
100	Konsantre	28,68	4,44	44,32	12,81	86,85	0,34	48,36	31,74	0,70
	Artık	71,32	1,90	36,62	5,50	75,08	19,42	51,64	68,26	99,30
150	Konsantre	39,42	4,12	44,50	11,89	87,82	0,29	61,72	44,12	0,81
	Artık	60,58	1,66	35,14	4,80	72,36	22,84	38,28	55,88	99,19
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00

**Çizelge 4.13.** Farklı KAX miktarlarında yapılan flotasyon deney sonuçları  
(pH 11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 80 g/t MIBC)

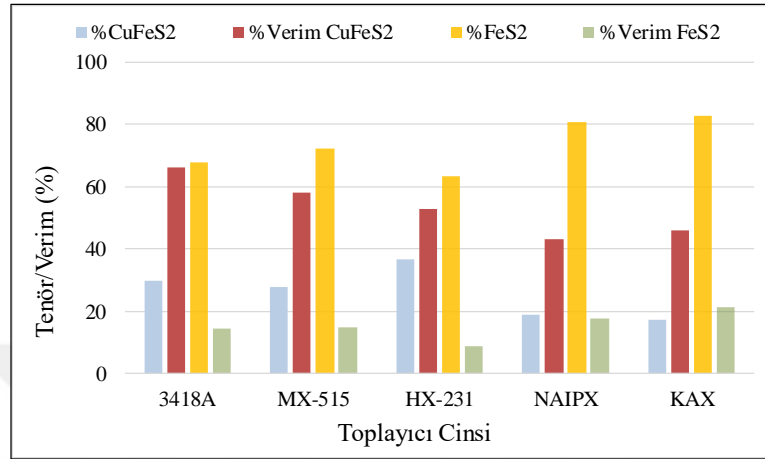
Toplayıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
10	Konsantre	5,33	15,46	39,26	44,65	55,15	0,20	31,31	3,74	0,08
	Artık	94,67	1,91	38,81	5,51	79,77	14,72	68,69	96,26	99,92
50	Konsantre	20,35	5,95	43,72	17,20	82,69	0,12	46,07	21,45	0,17
	Artık	79,65	1,78	37,58	5,14	77,38	17,48	53,93	78,55	99,83
100	Konsantre	37,55	4,56	44,35	13,17	86,68	0,16	65,10	41,49	0,42
	Artık	62,45	1,47	35,51	4,25	73,51	22,24	34,90	58,51	99,58
150	Konsantre	42,94	4,17	44,52	12,04	87,78	0,18	68,04	48,04	0,56
	Artık	57,06	1,47	34,55	4,25	71,44	24,31	31,96	51,96	99,44
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00





Şekil 4.17. 3418A (a1-kalkopirit, a2-pirit), MX-515 (b1-kalkopirit, b2-pirit), HX-231 (c1-kalkopirit, c2-pirit), NaIPX (d1-kalkopirit, d2-pirit) ve KAX (e1-kalkopirit, e2-pirit) miktarlarının tenör ve verime etkisi

Şekil 4.18’de toplayıcıların belirlenen optimum konsantrasyonlarda kalkopirit/pirit tenörüne ve verimine etkisi, birbirleri arasında değerlendirilmiştir. Sonuçlar 3418A'nın kalkopirit flotasyonunda diğer toplayıcılara göre en iyi seçiciliğe ve en güçlü flotasyon özelliğine sahip olduğunu göstermiştir.



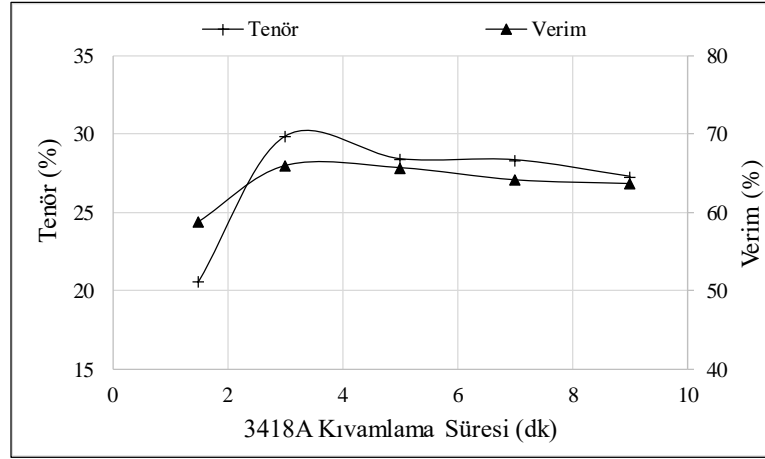
Şekil 4.18. Toplayıcıların 50 g/t konsantrasyonunda elde edilen flotasyon sonuçları

#### 4.3.1.7. 3418A kıvamlama süresinin kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi

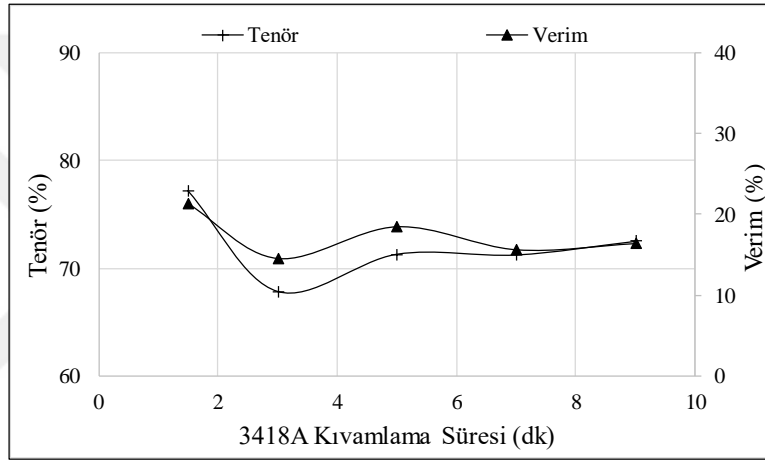
Flotasyon deneylerinde toplayıcı kıvamlama süresinin etkisi 1,5, 3, 5, 7 ve 9 dk’lık sürelerde araştırılmıştır. Çizelge 4.14’teki sonuçlara göre, 3 dk toplayıcı kıvamlama süresinde kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.19-4.20). 3 dk kıvamlama süresi sonrası verimde pek fazla değişim olmazken, tenör açısından dalgalanmalar söz konusudur.

Çizelge 4.14. 3418A ile farklı kıvamlama sürelerinde yapılan flotasyon deney sonuçları (pH 11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 50 g/t 3418A, 80 g/t MIBC)

Kıvamlama Süresi (dk)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
1,5	Konsantre	21,70	7,13	42,20	20,58	77,21	2,21	58,81	21,36	3,43
	Artık	78,30	1,38	37,90	4,00	78,80	17,20	41,19	78,64	96,57
3	Konsantre	16,79	10,34	40,67	29,85	67,85	2,30	65,97	14,52	2,77
	Artık	83,21	1,08	38,46	3,11	80,60	16,30	34,03	85,48	97,23
5	Konsantre	17,56	9,84	41,84	28,42	71,31	0,27	65,70	18,47	2,85
	Artık	79,93	1,05	38,17	3,02	80,03	16,95	34,30	81,53	97,15
7	Konsantre	17,18	9,82	41,79	28,35	71,24	0,41	64,14	15,60	0,50
	Artık	82,82	1,14	38,22	3,29	79,95	16,76	35,86	84,40	99,50
9	Konsantre	17,72	9,45	42,06	27,29	72,51	0,20	63,67	16,38	0,25
	Artık	82,28	1,16	38,14	3,35	79,74	16,91	36,33	83,62	99,75
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00



Şekil 4.19. 3418A kıvamlama süresinin kalkopirit tenör ve verimine etkisi



Şekil 4.20. 3418A kıvamlama süresinin pirit tenör ve verimine etkisi

#### 4.3.1.8. Köpürtücü cinsi ve miktarının kalkopirit mineralinin flotasyonuna etkisi

Flotasyonun gerçekleşmesi için sisteme eklenen son kimyasal köpürtücülerdir. Köpürtücü cinsinin tayini için; MIBC, DF-250, F-521, F-531 ve F-583 olmak üzere beş farklı özellikte köpürtücü kullanılarak flotasyon deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 4.15'te ve Şekil 4.21a'da MIBC için köpürtücü miktarının flotasyon başarısına etkisinde, 80 g/t MIBC miktarında kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edildiği görülmektedir. Köpürtücü miktarının 80 g/t miktarını aşması sonucu oluşan aşırı köpük hacmi hızlı köpük taşmasına ve böylece bu hızlı köpük akışı sırasında kabarcıklara yapışmış olan susevmez minerallerin yanı sıra kabarcıkların arasındaki su ile birlikte bulunan susever minerallerin konsantreye taşınma oranının artmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı artan köpürtücü miktarı kalkopirit tenöründe önemli bir düşüş göstermiştir.

Birçok tesiste kullanılan köpürtücülerden, kimyasal bileşimi polipropilen glikol metil eter olan Dowfroth 250 (DF-250) miktarının flotasyon başarısına etkisi Çizelge 4.16 ve Şekil 4.21b'de görülmektedir. Flotasyon sonuçlarına göre 40 g/t DF-250 miktarında kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edilmiştir.

Kimyasal bileşimi 2-metil 1 pentanol alifatik alkol karışımı olan F-521 ile yapılan flotasyon sonuçlarına (Çizelge 4.17) göre ise 40 g/t miktarında kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.21c). Bu köpürtücü ile kabarcıkların oluşması ve kabarcıkların yüzeye doğru çıkma ve hücreden taşma hızı diğer köpürtücülere göre daha hızlı olmuştur. Bu durumun köpük kararlılığının sağlanamamasından ve hava akış hızından kaynaklandığı düşünülmektedir.

F-531 adlı köpürtücü ile yapılan flotasyon deney sonuçları Çizelge 4.18'de ve Şekil 4.21d'de verilmiştir. Flotasyon sonuçları incelendiğinde, F-531 adlı köpürtücünün kalkopirit için uygun olmadığı belirlenmiştir. Son olarak kimyasal bileşimi 2-etil heksanol olan F-583 ile 60 g/t köpürtücü miktarında kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edildiği görülmektedir (Çizelge 4.19 ve Şekil 4.21e).

**Çizelge 4.15.** Farklı MIBC miktarlarında yapılan flotasyon deney sonuçları (pH 11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 50 g/t 3418A)

Köpürtücü Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
20	Konsantre	3,83	9,10	42,19	26,28	73,45	0,27	13,24	3,58	0,07
	Artık	96,17	2,37	38,70	6,85	78,66	14,49	86,76	96,42	99,93
40	Konsantre	8,79	12,02	40,89	34,70	65,15	0,15	40,15	7,30	0,09
	Artık	91,21	1,73	38,63	4,98	79,74	15,28	59,85	92,70	99,91
60	Konsantre	16,43	9,56	41,99	27,60	72,16	0,24	59,72	15,11	0,28
	Artık	83,57	1,27	38,21	3,66	79,70	16,64	40,28	84,89	99,72
80	Konsantre	16,79	10,34	40,67	29,85	67,85	2,30	65,97	14,52	2,77
	Artık	83,21	1,08	38,46	3,11	80,60	16,30	34,03	85,48	97,23
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00

**Çizelge 4.16.** Farklı DF-250 miktarlarında yapılan flotasyon deney sonuçları (pH 11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 50 g/t 3418A)

Köpürtücü Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
20	Konsantre	6,95	14,42	39,76	41,66	58,18	0,16	38,14	5,16	0,08
	Artık	93,05	1,75	38,76	5,05	79,97	14,98	61,86	94,84	99,92
40	Konsantre	13,52	10,71	41,45	30,94	68,82	0,24	55,06	11,86	0,23
	Artık	86,48	1,37	38,42	3,95	79,96	16,09	44,94	88,14	99,77
60	Konsantre	22,36	8,35	42,60	24,11	75,76	0,13	70,97	21,59	0,21
	Artık	77,64	0,98	37,74	2,84	79,23	17,93	29,03	78,41	99,79
80	Konsantre	27,98	7,25	43,11	20,94	78,92	0,14	77,11	28,14	0,29
	Artık	72,02	0,84	37,17	2,41	78,28	19,31	22,89	71,86	99,71
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00

Çizelge 4.17. Farklı F-521 miktarlarında yapılan flotasyon deney sonuçları  
(pH 11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 50 g/t 3418A)

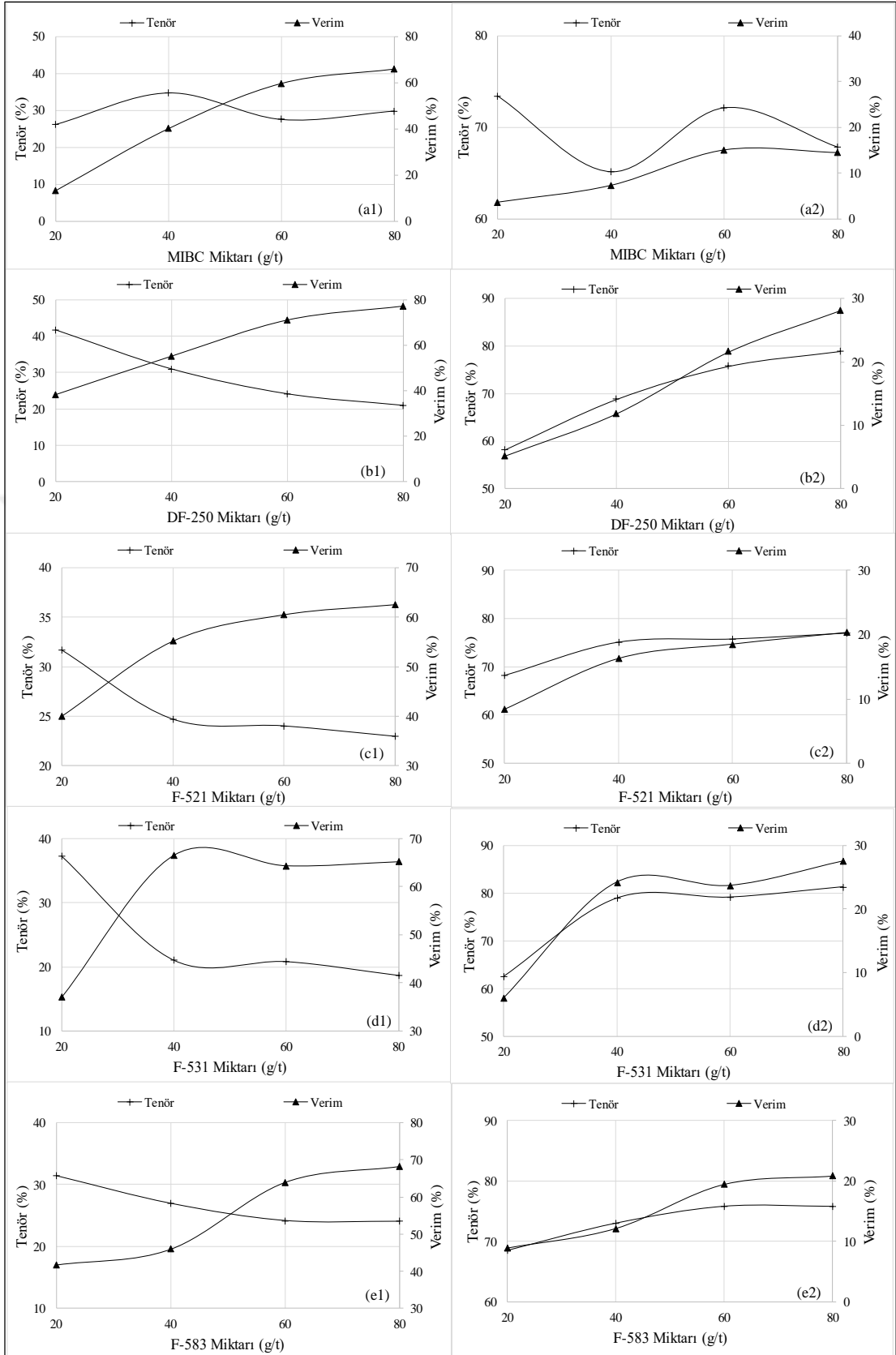
Köpürtücü Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
20	Konsantre	9,60	10,97	41,42	31,69	68,27	0,04	40,07	8,36	0,03
	Artık	90,40	1,74	38,55	5,04	79,54	15,43	59,93	91,64	99,97
40	Konsantre	16,97	8,56	42,46	24,71	75,07	0,22	55,22	16,24	0,27
	Artık	83,03	1,42	38,09	4,10	79,15	16,75	44,78	83,76	99,73
60	Konsantre	19,14	8,32	42,56	24,03	75,72	0,25	60,56	18,47	0,35
	Artık	80,86	1,28	37,95	3,71	79,11	17,19	39,44	81,53	99,65
80	Konsantre	20,69	7,96	42,79	22,98	76,91	0,12	62,60	20,28	0,17
	Artık	79,31	1,24	37,80	3,58	78,86	17,56	37,40	79,72	99,83
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00

Çizelge 4.18. Farklı F-531 miktarlarında yapılan flotasyon deney sonuçları  
(pH 11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 50 g/t 3418A)

Köpürtücü Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
20	Konsantre	7,55	12,89	40,45	37,23	62,57	0,20	36,98	6,02	0,11
	Artık	92,45	1,79	38,70	5,18	79,75	15,07	63,02	93,98	99,89
40	Konsantre	24,09	7,26	43,12	20,97	78,92	0,11	66,50	24,23	0,19
	Artık	75,91	1,16	37,47	3,35	78,31	18,34	33,50	75,77	99,81
60	Konsantre	23,51	7,19	43,16	20,77	79,14	0,09	64,29	23,71	0,15
	Artık	76,49	1,23	37,50	3,55	78,25	18,21	35,71	76,29	99,85
80	Konsantre	26,58	6,45	43,50	18,61	81,29	0,10	65,14	27,54	0,19
	Artık	73,42	1,25	37,14	3,61	77,43	18,96	34,86	72,46	99,81
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00

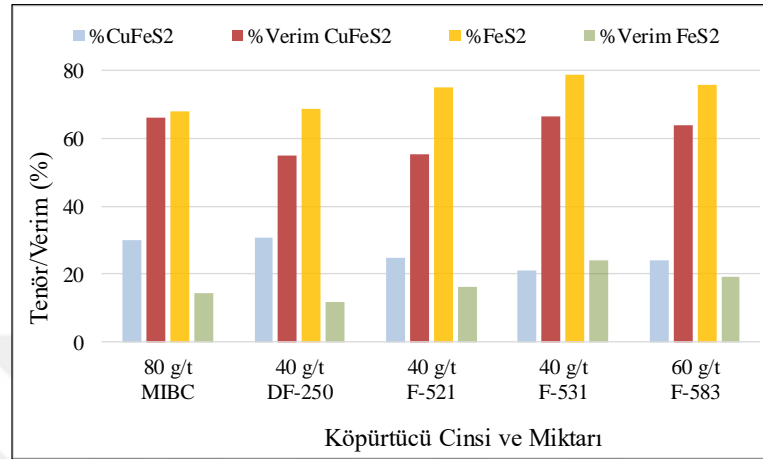
Çizelge 4.19. Farklı F-583 miktarlarında yapılan flotasyon deney sonuçları  
(pH 11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 50 g/t 3418A)

Köpürtücü Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
20	Konsantre	10,10	10,86	41,40	31,38	68,42	0,20	41,74	8,81	0,15
	Artık	89,90	1,70	38,54	4,92	79,58	15,49	58,26	91,19	99,85
40	Konsantre	12,97	9,32	42,14	26,92	72,93	0,14	45,98	12,06	0,13
	Artık	87,03	1,63	38,34	4,72	79,28	16,00	54,02	87,94	99,87
60	Konsantre	20,09	8,36	42,60	24,15	75,74	0,12	63,88	19,40	0,17
	Artık	79,91	1,19	37,88	3,43	79,14	17,43	36,12	80,60	99,83
80	Konsantre	21,54	8,32	42,56	24,03	75,72	0,25	68,14	20,79	0,39
	Artık	78,46	1,07	37,81	3,08	79,21	17,71	31,86	79,21	99,61
Besleme		100,00	2,63	38,83	7,60	78,46	13,95	100,00	100,00	100,00



Şekil 4.21. MIBC (a1-kalkopirit, a2-pirit), DF-250 (b1-kalkopirit, b2-pirit), F-521 (c1-kalkopirit, c2-pirit), F-531 (d1-kalkopirit, d2-pirit), F-583 (e1-kalkopirit, e2-pirit) miktarlarının tenör ve verime etkisi

Optimum köpürtücü konsantrasyonlarında elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilmiş ve en iyi sonuçların elde edildiği MIBC'nin flotasyon deneylerinde köpürtücü olarak kullanılmasına karar verilmiştir (Şekil 4.22). Kalkopirit flotasyonunda köpürtücüler MIBC>DF-250>F-583>F-531>F-521 önem sırasında etki göstermiştir.



Şekil 4.22. Farklı tür köpürtücülerin farklı miktarlarda elde edilen flotasyon sonuçları

Genel olarak tüm köpürtücülerde, artan köpürtücü miktarı ile birlikte, kalkopirit verimi artarken tenörde önemli miktarda düşüş gözlenmiştir. Güler ve ark. (1999) selestit-kalsit flotasyonunda köpürtücülerin etkisini araştırdıkları çalışmada benzer sonuçlar elde etmiştir. Yüksek köpürtücü miktarları, çok kararlı ve hızlı taşan bir köpük yapısının oluşmasına ve buna bağlı olarak gang minerallerinin su ile konsantreye taşınmasına neden olmaktadır. Bu durumda konsantre tenörü düşerken verim artmaktadır. Düşük köpürtücü miktarında ise daha kırılabilir bir köpük yapısı elde edilmektedir. Bu durumda, köpükteki kabarcıkların birleşme olasılıkları ve daha sonra patlayarak hava kabarcıklarına tutunmuş mineral tanelerinin pülpe geri dönme olasılıkları artmaktadır. Böylece düşük köpürtücü miktarında kalkopirit verimi azalırken, su ile taşınan gang minerallerinin daha az olması nedeniyle kalkopirit tenöründe artış gözlenmiştir. Ayrıca, farklı köpürtücüler ile elde edilen köpük yapıları doğal olarak farklıdır. Küçük kabarcıklardan oluşan köpük yapısı yüksek verim-düşük tenör, büyük kabarcıklardan oluşan köpük yapısı ise yüksek konsantre tenörü sağlarken doğal olarak verimde azalmaya neden olmaktadır.

Flotasyon deneyleri sonucunda; %29,85 kalkopirit tenörlü-%65,97 kalkopirit verimli, %67,85 pirit tenörlü-%14,52 pirit verimli konsantre elde edilmiştir. Çizelge 4.20'de flotasyon deneylerinde belirlenen optimum sonuçlar verilmiştir.

**Çizelge 4.20.** Yüksek tenörlü cevher ile gerçekleştirilen flotasyon deney sonuçları

Değişkenler	Değerler
Öğütme Süresi	10 dk
pH	11,5
pH kıvamlama süresi	5 dk
Dağıtıcı cinsi ve miktarı	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , 100 g/t
Dağıtıcı kıvamlama süresi	3 dk
Toplayıcı cinsi ve miktarı	3418A, 50 g/t
Toplayıcı kıvamlama süresi	3 dk
Köpürtücü cinsi ve miktarı	MIBC, 80 g/t

### 4.3.2. Kil minerallerinin flotasyona etkileri

#### 4.3.2.1. Kil minerallerinin kalkopirit flotasyon performansına etkisi ve modellenmesi

##### 4.3.2.1.1. Montmorillonitin kalkopirit flotasyonunda etkisi ve modellenmesi

Bu aşamada belirlenen deneysel parametreler (köpürtücü miktarı, dağıtıcı miktarı, köpük derinliği, hava akış hızı ve kil miktarı) ile bağımlı değişkenler (kalkopirit tenörü/verimi, pirit tenörü/verimi, dinamik köpük kararlılığı ve ortalama kabarcık çapı) arasındaki karşılıklı etkileşimin belirlenebilmesi amacıyla istatistik programı Minitab 16 kullanılmıştır. Tasarlanan deney programı (Çizelge 3.10) çerçevesinde toplam 32 adet klasik flotasyon deney ve 32 adet köpük kolonu deneyi gerçekleştirilmiştir. Yapılan 64 deneye ait sonuçlar Çizelge 4.21’de ve değişim analizleri (ANOVA) Çizelge 4.22-27’de verilmiştir. Varyans analizinde güven aralığı %95 olarak seçilmiş ve bu yüzden elde edilen analiz sonuçlarında p değeri 0,05’ten küçük olan terimler istatistiksel açıdan anlamlı kabul edilmiştir. Ayrıca analiz çizelgelerinde etki kestirimi değerleri (T) ile bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenlere etkisi (artırma/azaltma eğilimi) verilmiştir. Yüksek tenörlü kalkopirit cevheri ile flotasyon deneylerinde; %29,85 kalkopirit tenörlü ve %65,97 kalkopirit verimli (%67,85 pirit tenörü ve %14,52 pirit verimi) konsantre kazanılmıştır.



Montmorillonit ilavesi ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ise: en düşük kalkopirit tenörü %15 kil miktarı, 12 L/dk hava akış hızı, 1 cm köpük derinliği, 300 g/t dağıtıcı miktarı ve 80 g/t köpürtücü miktarı koşullarında %15,26 olarak elde edilirken, en yüksek kalkopirit tenörü ise %5 kil miktarı, 8 L/dk hava akış hızı, 3 cm köpük derinliği, 300 g/t dağıtıcı miktarı ve 120 g/t köpürtücü miktarı koşullarında %37,96 olarak elde edilmiştir. En düşük kalkopirit verimi %5 kil miktarı, 8 L/dk hava akış hızı, 3 cm köpük derinliği, 100 g/t dağıtıcı miktarı ve 80 g/t köpürtücü miktarı koşullarında %33,95 olarak elde edilirken, en yüksek kalkopirit verimi ise %10 kil miktarı, 10 L/dk hava akış hızı, 2 cm köpük derinliği, 200 g/t dağıtıcı miktarı ve 100 g/t köpürtücü miktarı koşullarında %66,31 olarak elde edilmiştir.

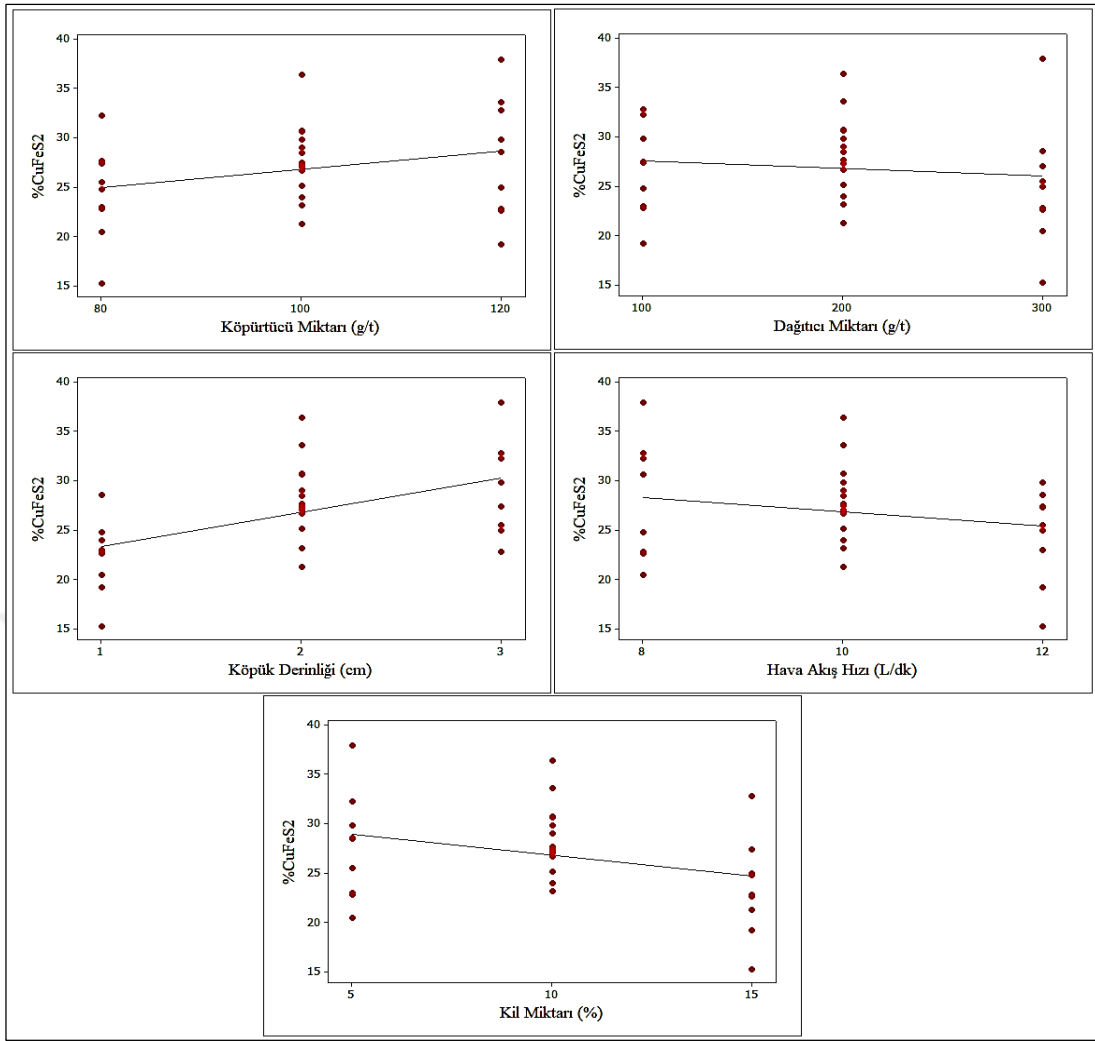
**Çizelge 4.21.** Flotasyonda montmorillonitin kalkopirit/pirit tenör-verimine, dinamik köpük kararlılığına ve ortalama kabarcık çapına etkisi

Deney No	Kalkopirit (%)	Kalkopirit Verim (%)	Pirit (%)	Pirit Verim (%)	Dinamik Köpük Kararlılığı (s)	Ortalama Kabarcık Çapı (mm)
1	27,46	65,82	72,30	16,78	4,60	1,15
2	36,42	52,67	63,41	8,88	4,30	1,13
3	30,63	52,07	69,26	11,40	4,50	0,96
4	23,95	57,51	75,97	17,67	3,80	0,98
5	37,96	47,51	61,89	7,50	5,38	1,12
6	23,02	59,66	76,88	19,29	3,17	1,05
7	29,83	53,04	70,05	12,06	4,80	1,04
8	21,27	64,46	78,59	23,06	4,60	1,05
9	22,78	59,99	77,11	19,66	3,88	1,02
10	20,43	59,81	79,51	22,54	3,88	1,12
11	28,99	52,99	70,87	12,54	4,42	1,29
12	22,80	65,92	77,04	21,57	6,00	1,17
13	27,67	55,50	72,17	14,01	4,30	1,14
14	19,19	65,20	80,73	26,56	4,75	1,01
15	25,15	46,09	74,77	13,27	3,80	1,06
16	24,96	62,74	74,79	18,20	4,42	1,15
17	28,46	48,99	71,38	11,90	4,80	1,17
18	33,64	58,96	66,15	11,22	5,20	1,03
19	28,54	56,81	71,34	13,75	4,50	1,12
20	25,50	60,34	74,35	17,03	4,34	1,02
21	27,07	58,98	72,87	15,37	4,00	1,09
22	23,17	66,31	76,78	21,28	3,80	1,09
23	30,76	57,47	68,90	12,46	4,20	1,07
24	26,67	54,58	73,02	14,47	3,50	0,99
25	22,64	65,32	77,27	21,59	5,75	1,12
26	15,26	45,46	84,76	24,48	3,50	1,14
27	32,25	33,95	67,43	6,87	5,13	1,16
28	29,79	54,21	70,19	12,37	4,34	1,12
29	32,77	60,64	66,94	11,99	5,63	1,11
30	24,75	60,45	75,14	17,77	4,88	0,98
31	27,44	54,90	72,49	14,04	3,25	1,03
32	27,28	61,75	72,02	15,78	3,50	1,16

Çizelge 4.22’de kalkopirit tenörü için en önemli değişkenin köpük derinliği olduğu, bunu sırasıyla kil miktarı ve köpürtücü miktarı takip etmekte, ancak bu iki değişkenin daha az etkili olduğu görülmektedir. İkili etkileşimlerde ise köpürtücü miktarı-dağıtıcı miktarı önemli etkiye sahiptir. Bunların dışındaki diğer tüm değişkenler %95 güvenlik sınırı altında kalarak daha az etkili olmuştur. Şekil 4.23’te değişkenlerin kalkopirit tenörüne etkileri verilmiştir. Köpük derinliği ve köpürtücü miktarının artmasıyla kalkopirit tenörü artmaktadır. Köpük derinliği arttıkça mekanik taşıma azalmakta ve bu nedenle konsantreye istenmeyen değersiz minerallerin taşınması engellenerek konsantre tenörü artmaktadır. Kabarcıklar arasındaki besleme suyunun pülp içine yeterince akabilmesi yeterli bir süre köpüğün bekletilmesi, yani köpük derinliğinin artırılması ile sağlanabilmektedir (Özer, 2007). Kil miktarı ve hava akış hızının artmasıyla tenör düşmüştür. Bunun nedeni köpüğün yeterli bir süre hücrede durmamasıyla, çok ince boyuttaki susever minerallerin kabarcıkların arasındaki sıvı filmle beraber köpük bölgesine mekanik olarak taşınmasıdır.

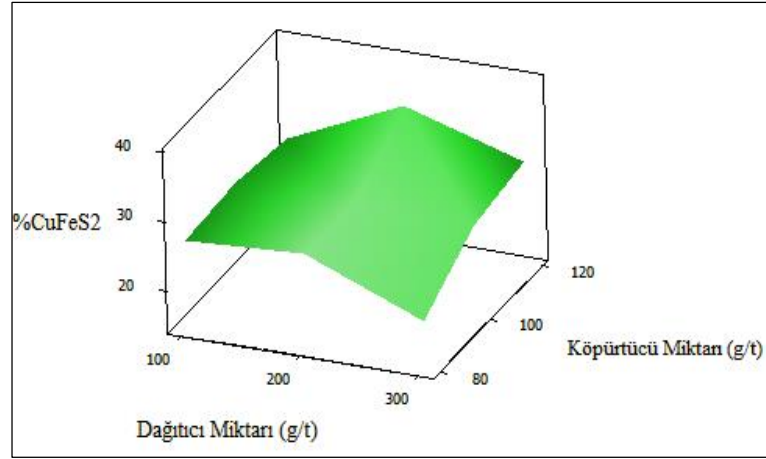
Çizelge 4.22. Montmorillonit etkisinde %CuFeS<sub>2</sub> için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	628,39	31,42	29,96	2,86	2,65	0,04
A	1	61,11	61,11	2,36	5,56	4,84	0,04
B	1	11,34	11,34	-1,02	1,03		0,33
C	1	218,65	218,65	4,46	19,89		0,00
D	1	37,59	37,59	-1,85	3,42		0,09
E	1	78,75	78,75	-2,68	7,16		0,02
A <sup>2</sup>	1	16,85	13,90	1,12	1,26		0,29
B <sup>2</sup>	1	27,00	2,54	-0,48	0,23		0,64
C <sup>2</sup>	1	13,95	4,76	-0,66	0,43		0,52
D <sup>2</sup>	1	0,03	1,11	0,32	0,10		0,76
E <sup>2</sup>	1	28,64	28,64	-1,61	2,61		0,14
AB	1	68,18	68,18	2,49	6,20		0,03
AC	1	3,81	3,81	0,59	0,35		0,57
AD	1	1,37	1,37	-0,35	0,12		0,73
AE	1	4,56	4,56	-0,64	0,41		0,53
BC	1	4,15	4,15	-0,61	0,38		0,55
BD	1	0,79	0,79	0,27	0,07		0,79
BE	1	33,26	33,26	-1,74	3,03		0,11
CD	1	11,36	11,36	-1,02	1,03		0,33
CE	1	1,32	1,32	-0,35	0,12		0,74
DE	1	5,69	5,69	-0,72	0,52	0,49	
Hata	11	120,91	10,99			R <sup>2</sup>	83,86
Toplam	31	749,30					



**Şekil 4.23.** Montmorillonit miktarı ve diğer değişkenlerin kalkopirit tenörüne etkileri

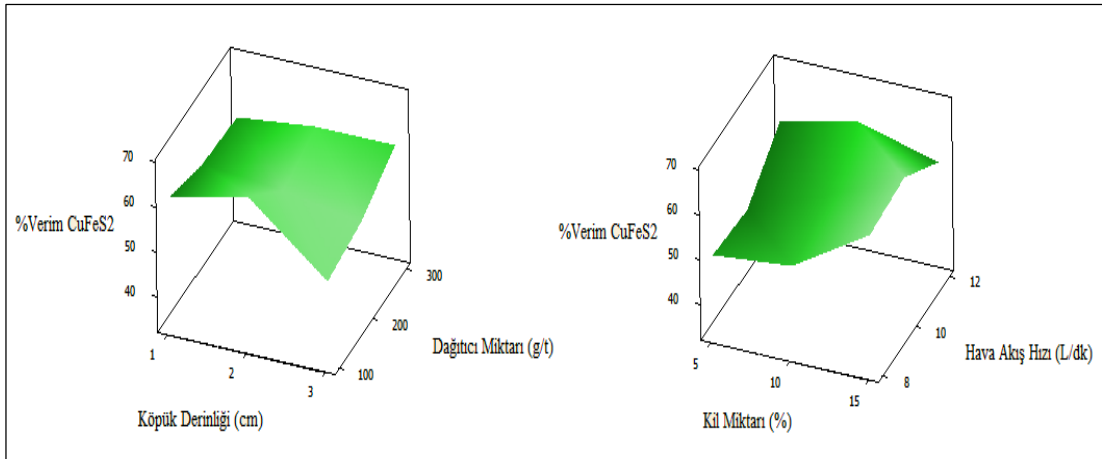
Etkisi anlamlı çıkan köpürtücü miktarı-dağıtıcı miktarı etkileşimine ait üç boyutlu yanıt yüzeyi grafiğinde (Şekil 4.24) yatay eksenler değişkenlerin seviyelerini, dikey eksen kalkopirit tenörünü ifade etmektedir. Grafikte düşük köpürtücü miktarda, dağıtıcı miktarının artmasıyla tenörün azalış eğiliminde olduğu görülmektedir. Yüksek köpürtücü miktarda ise dağıtıcı miktarını artırmak tenörü önce artırıp sonra azaltan parabolik bir etki yaratmıştır. Farklı köpürtücü ve dağıtıcı miktardaki artışın tenörde farklı eğilimlere yol açması, etkileşimin sonucudur. Ayrıca grafiğe göre; en düşük kalkopirit tenörü, köpürtücü miktarının en düşük olduğu dağıtıcı miktarının en yüksek olduğu seviyede elde edilmiştir. Etkisi istatistiksel olarak anlamsız ( $p>0,05$ ) çıkan diğer değişkenler modelden çıkartılmıştır. Buna göre elde edilen model denklemi Eşitlik 4.1’de verilmiştir. Yapılan değerlendirmelere göre köpük derinliği, kil miktarı ve köpürtücü miktarının ve köpürtücü miktarı-dağıtıcı miktarının etkileşimleri kalkopirit tenörü üzerinde en etkin değişkenler olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.24. Montmorillonit ilavesiyle dağıtıcı miktarı-köpürtücü miktarının kalkopirit tenörüne etkisi

$$Y = 28,39 + 1,84A + 3,49C - 2,09E + 2,06AB \quad (4.1)$$

Kalkopirit verimini etkileyen en önemli flotasyon değişkeni ise kil miktarıdır (Çizelge 4.23). İkili etkileşimlerde ise dağıtıcı miktarı-köpük derinliği ve hava akış hızı-kil miktarı önemli etkiye sahiptir. Etkisi anlamlı çıkan köpük derinliği-dağıtıcı miktarı etkileşimine ait üç boyutlu yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde (Şekil 4.25) yüksek köpük derinliğinde ve düşük dağıtıcı miktarında verimin azalış eğiliminde olduğu görülmektedir. Yüksek kil miktarında ise hava akış hızını artırmak kalkopirit verimini mekanik taşıma nedeniyle artıran bir etki yaratmıştır.



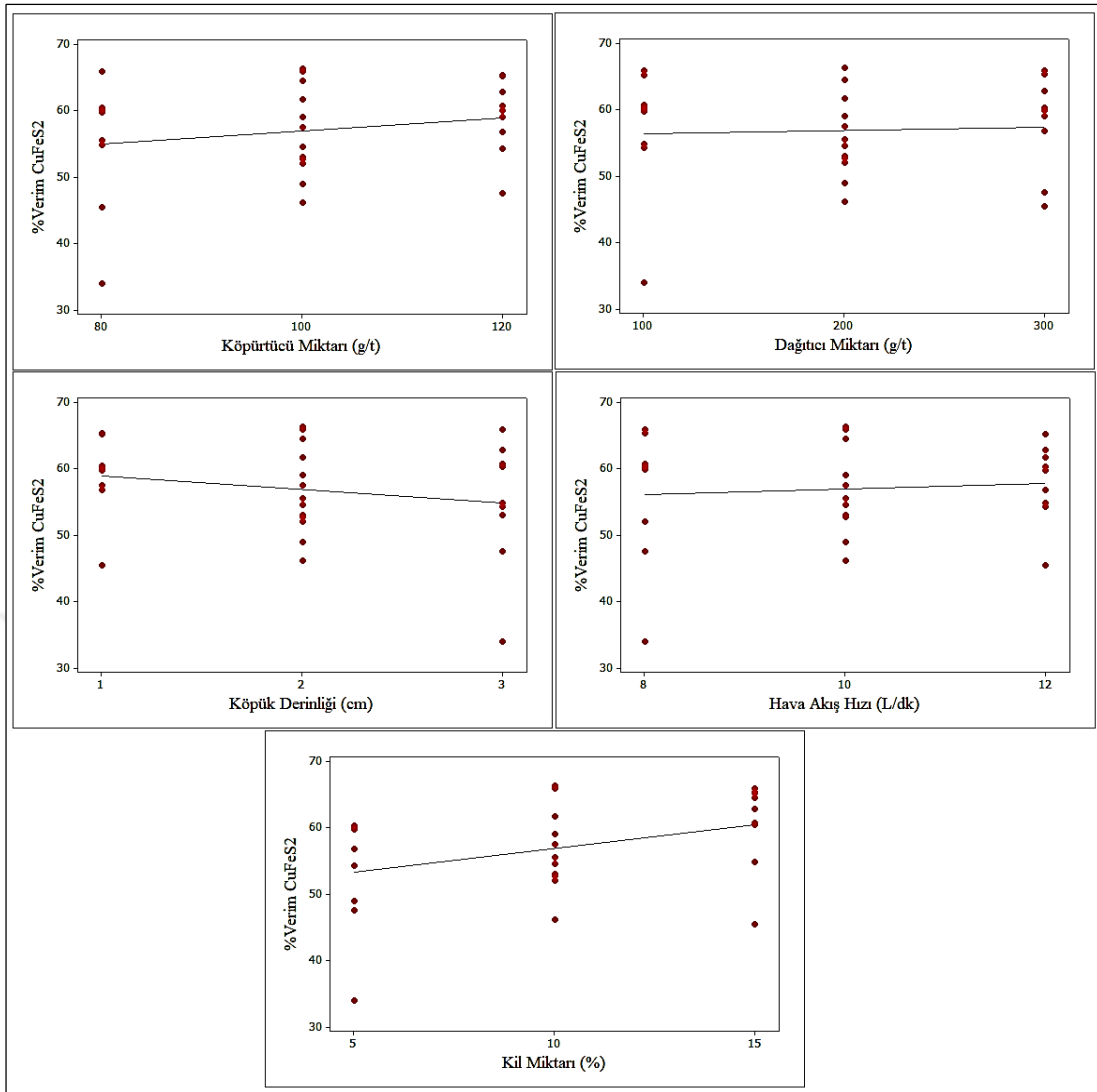
Şekil 4.25. Montmorillonit ilavesiyle ikili etkileşimlerin kalkopirit verimine etkisi

**Çizelge 4.23.** Montmorillonit etkisinde % Verim  $\text{CuFeS}_2$  için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	1235,61	61,78	34,68	1,90	2,65	0,14
A	1	69,60	69,60	1,46	2,14	4,84	0,17
B	1	3,61	3,61	0,33	0,11		0,75
C	1	76,06	76,06	-1,53	2,34		0,15
D	1	13,19	13,19	0,64	0,41		0,54
E	1	226,38	226,38	2,64	6,97		0,02
A <sup>2</sup>	1	1,60	0,28	-0,09	0,01		0,93
B <sup>2</sup>	1	36,13	57,44	1,33	1,77		0,21
C <sup>2</sup>	1	21,27	12,81	-0,63	0,39		0,54
D <sup>2</sup>	1	1,88	1,07	-0,18	0,03		0,86
E <sup>2</sup>	1	1,73	1,74	-0,23	0,05		0,82
AB	1	57,13	57,14	-1,33	1,76		0,21
AC	1	8,92	8,92	-0,52	0,27		0,61
AD	1	1,73	1,73	0,23	0,05		0,82
AE	1	31,39	31,39	0,98	0,97		0,35
BC	1	160,79	160,79	2,23	4,95		0,04
BD	1	64,56	64,56	-1,41	1,99		0,19
BE	1	21,18	21,18	-0,81	0,65		0,44
CD	1	113,37	113,37	1,87	3,49		0,09
CE	1	144,23	144,23	2,11	4,44		0,06
DE	1	180,86	180,86	-2,36	5,57		0,04
Hata	11	357,09	32,46			R <sup>2</sup>	77,58
Toplam	31	1592,70					

Şekil 4.26’da montmorillonit miktarı ve diğer değişkenlerin kalkopirit verimine etkisi görülmektedir. Kil miktarı, köpürtücü miktarı ve hava akış hızının artmasıyla kalkopirit verimi artmış ve köpük derinliğinin artmasıyla kalkopirit verimi düşmüştür. Dağıtıcı miktarındaki artış kalkopirit verimi üzerinde yeteri kadar etkili olmamıştır. Wang ve ark. (2016) montmorillonitin bakır flotasyonuna etkisini araştırdığı çalışmada, montmorillonitin miktarı arttıkça pülp viskozitesini artırdığını ve bundan dolayı flotasyon verimini ve köpük miktarını düşürdüğünü belirlemiştir. Pülp yüksek viskoz olduğu zaman sürekli bir jele benzer yapı haline gelmiştir. Kalkopirit verimi için elde edilen model denklemi Eşitlik 4.2’de verilmiştir.

$$Y = 56,48 + 3,55E + 3,17BC - 3,36DE \quad (4.2)$$



Şekil 4.26. Montmorillonit miktarı ve diğer değişkenlerin kalkopirit verimine etkileri

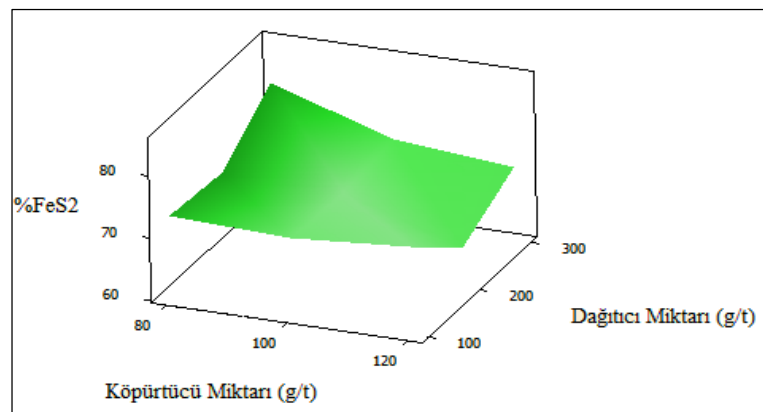
Pirit tenörünü etkileyen en önemli flotasyon değişkeni köpük derinliğidir (Çizelge 4.24). Köpük derinliğini sırasıyla kil miktarı ve köpürtücü miktarı izlemektedir. İkili etkileşimlerde ise köpürtücü miktarı-dağıtıcı miktarı önemli etkiye sahiptir. Kil miktarının ve diğer değişkenlerin etkisiyle pirit tenörünün %80'lere kadar çıktığı deneylerde kalkopirit tenörü %20'den de aşağıya düşmüştür. Eşitlik 4.3'te pirit tenörü için elde edilen model denklemi verilmiştir.

$$Y = 71,42 - 1,85A - 3,53C + 2,09E - 2,09AB \quad (4.3)$$

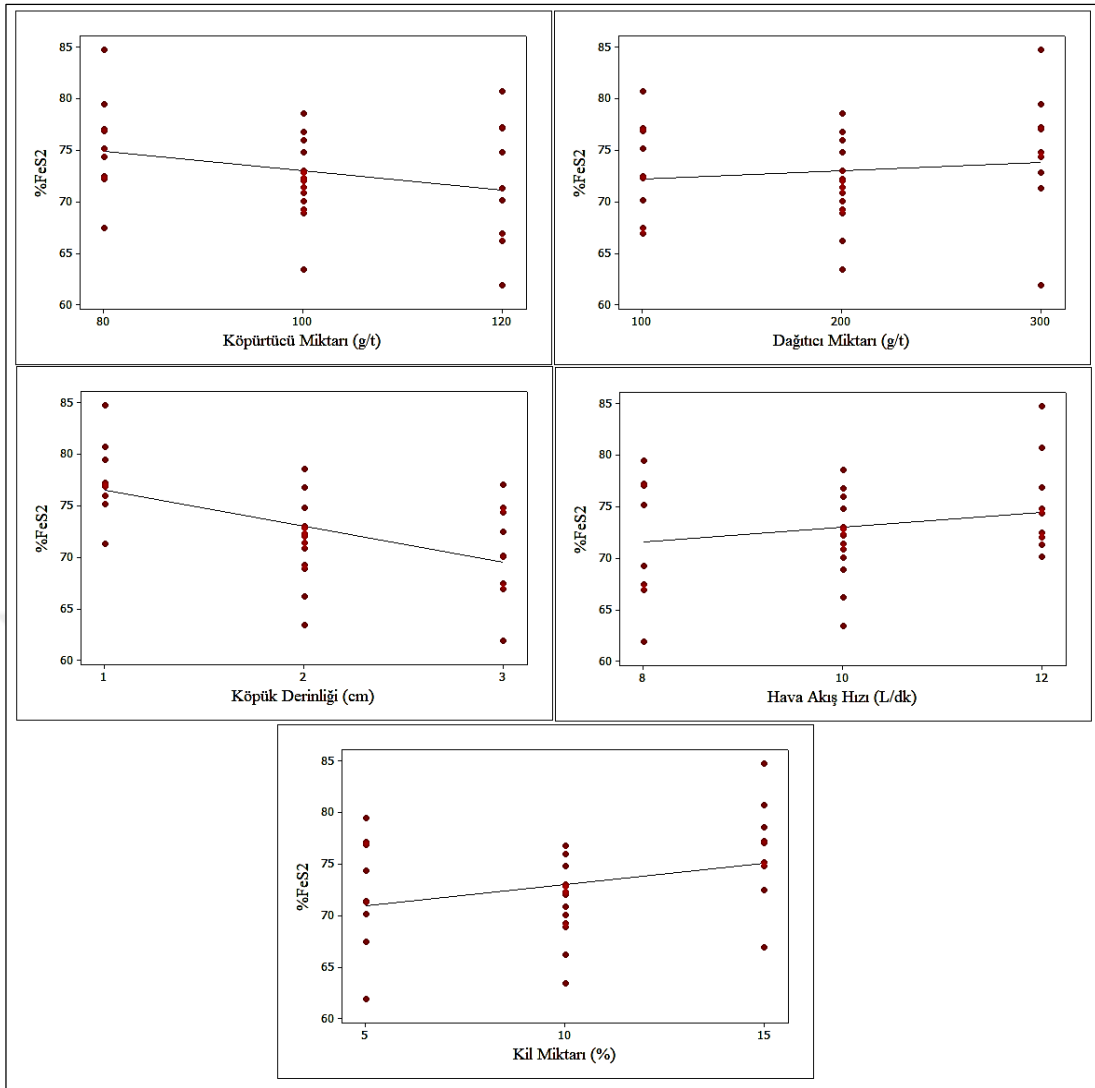
Çizelge 4.24. Montmorillonit etkisinde %FeS<sub>2</sub> için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	640,88	32,04	74,75	2,87	2,65	0,04
A	1	61,80	61,80	-2,35	5,53	4,84	0,04
B	1	11,87	11,87	1,03	1,06		0,33
C	1	224,34	224,34	-4,48	20,07		0,00
D	1	37,42	37,42	1,83	3,35		0,10
E	1	78,88	78,88	2,66	7,06		0,02
A <sup>2</sup>	1	18,17	13,58	-1,10	1,21		0,29
B <sup>2</sup>	1	28,00	2,85	0,51	0,25		0,62
C <sup>2</sup>	1	14,87	5,55	0,71	0,50		0,50
D <sup>2</sup>	1	0,01	1,86	-0,41	0,17		0,69
E <sup>2</sup>	1	29,73	29,73	1,63	2,66		0,13
AB	1	69,74	69,74	-2,50	6,24		0,03
AC	1	3,66	3,66	-0,57	0,33		0,58
AD	1	1,26	1,26	0,34	0,11		0,74
AE	1	3,95	3,95	0,59	0,35		0,56
BC	1	4,00	4,00	0,60	0,36		0,56
BD	1	1,07	1,07	-0,31	0,10		0,76
BE	1	33,27	33,27	1,73	2,98		0,11
CD	1	11,94	11,94	1,03	1,07		0,32
CE	1	1,18	1,18	0,32	0,11		0,75
DE	1	5,73	5,73	0,72	0,51		0,49
Hata	11	122,95	11,18			R <sup>2</sup>	83,90
Toplam	31	763,83					

Şekil 4.27’de köpürtücü miktarı-dağıtıcı miktarı etkileşimine ait üç boyutlu yanıt yüzeyi grafiğinde 200 g/t dağıtıcı miktarda ve yüksek köpürtücü miktarda en düşük pirit tenörü elde edilmiştir. Şekil 4.28’de montmorillonit miktarının ve diğer değişkenlerin pirit tenörüne etkisi görülmektedir. Kil miktarının, dağıtıcı miktarının ve hava akış hızının artmasıyla pirit tenörü artmış ve köpük derinliği ile köpürtücü miktarının artmasıyla pirit tenörü düşmüştür. Kalkopirit flotasyonunda pirit mineralinin bastırılması yani konsantrede pirit tenör-veriminin düşük olması istenmektedir. Olumlu yönde katkı sağlayan değişkenler sadece köpürtücü miktarı ve köpük derinliği olmuştur.



Şekil 4.27. Montmorillonit ilavesiyle köpürtücü miktarı-dağıtıcı miktarının pirit tenörüne etkisi



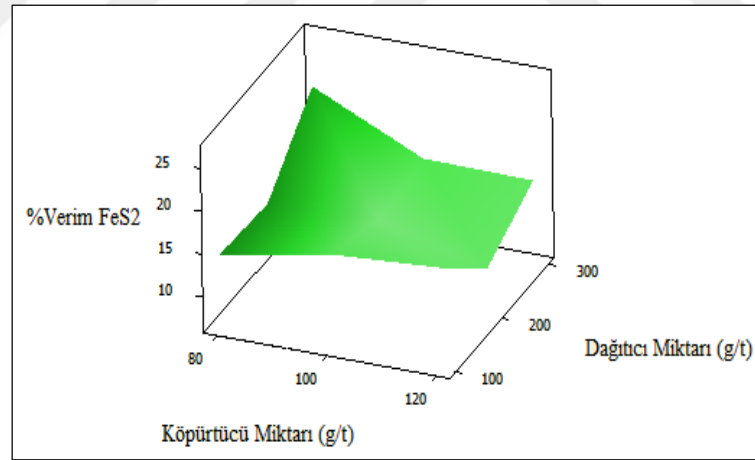
Şekil 4.28. Montmorillonit miktarı ve diğer değişkenlerin pirit tenörüne etkileri

Pirit verimi için pirit tenöründe olduğu gibi köpük derinliği ve kil miktarı önemli etkiye sahip iken, ikili etkileşimde köpürtücü miktarı-dağıtıcı miktarı önemli etkiye sahiptir (Çizelge 4.25). Şekil 4.29’da köpürtücü miktarı-dağıtıcı miktarı etkileşimine ait üç boyutlu yanıt yüzeyi grafiğinde 200 g/t dağıtıcı miktarında ve yüksek köpürtücü miktarında en düşük pirit verimi elde edilmiştir ve Şekil 4.28’e benzer sonuçlar elde edilirken, köpürtücü miktarının pirit tenör ve verimini azaltarak önemli bir değişken olduğu belirlenmiştir.



Çizelge 4.25. Montmorillonit etkisinde % Verim FeS<sub>2</sub> için Varyans analizi

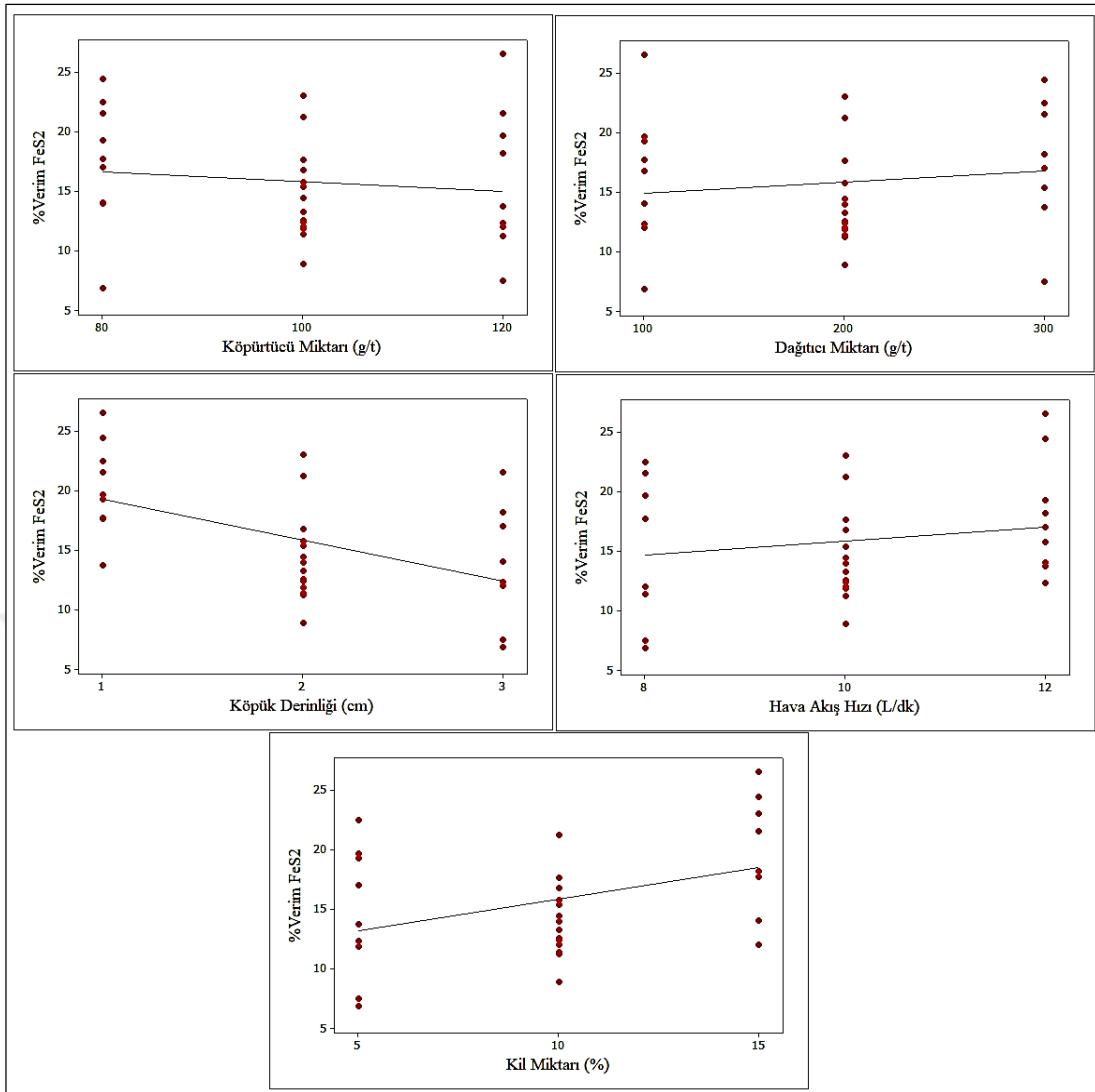
Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	647,53	32,38	15,31	3,12	2,65	0,03
A	1	12,13	12,13	-1,08	1,17	4,84	0,30
B	1	15,47	15,47	1,22	1,49		0,25
C	1	211,30	211,30	-4,52	20,38		0,00
D	1	23,59	23,59	1,51	2,28		0,16
E	1	129,91	129,91	3,54	12,53		0,01
A <sup>2</sup>	1	28,85	6,94	-0,82	0,67		0,43
B <sup>2</sup>	1	33,02	7,76	0,87	0,75		0,41
C <sup>2</sup>	1	4,87	0,79	0,28	0,08		0,79
D <sup>2</sup>	1	0,00	1,23	-0,34	0,12		0,74
E <sup>2</sup>	1	24,89	24,89	1,55	2,40		0,15
AB	1	86,42	86,42	-2,89	8,34		0,02
AC	1	3,00	3,00	-0,54	0,29		0,60
AD	1	1,03	1,03	0,32	0,10		0,76
AE	1	10,45	10,45	1,00	1,01		0,34
BC	1	24,89	24,89	1,55	2,40		0,15
BD	1	15,40	15,40	-1,22	1,49		0,25
BE	1	10,29	10,29	1,00	0,99		0,34
CD	1	7,80	7,80	0,87	0,75		0,40
CE	1	2,97	2,97	0,54	0,29		0,60
DE	1	1,26	1,26	0,35	0,12		0,73
Hata	11	114,03	10,37			R <sup>2</sup>	85,03
Toplam	31	761,56					



Şekil 4.29. Montmorillonit ilavesiyle köpürtücü miktarı-dağıtıcı miktarının pirit verimine etkisi

Montmorillonit miktarının ve diğer değişkenlerin pirit verimini nasıl etkilediği Şekil 4.30'da görülmektedir. Özellikle kil miktarı, dağıtıcı miktarı ve hava akış hızının artmasıyla pirit verimi artmıştır. Pirit verimi için elde edilen model denklemi Eşitlik 4.4'te verilmiştir.

$$Y = 14,09 - 3,43C + 2,69E - 2,32AB \quad (4.4)$$

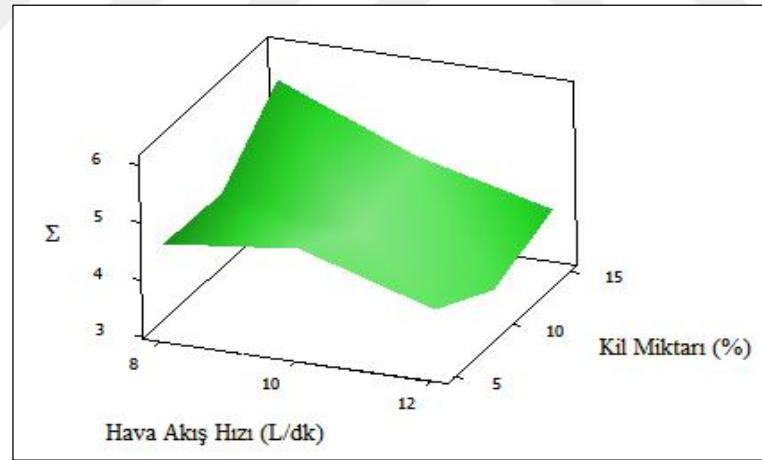


Şekil 4.30. Montmorillonit miktarı ve diğer değişkenlerin pirit verimine etkileri

Dinamik köpük kararlılığında (Çizelge 4.26), hava akış hızının önemi dikkat çekmektedir. Etki önem sırasınca köpürtücü miktarı ve köpük derinliği sırasıyla hava akış hızını takip ederken, ikili etkileşimde hava akış hızı-kil miktarı önemli etkiye sahiptir. Etkisi anlamlı çıkan hava akış hızı-kil miktarı etkileşimine ait üç boyutlu yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde (Şekil 4.31) hava akış hızının artması kararlılığı azaltırken, kil miktarı arttıkça kararlılık artmıştır.

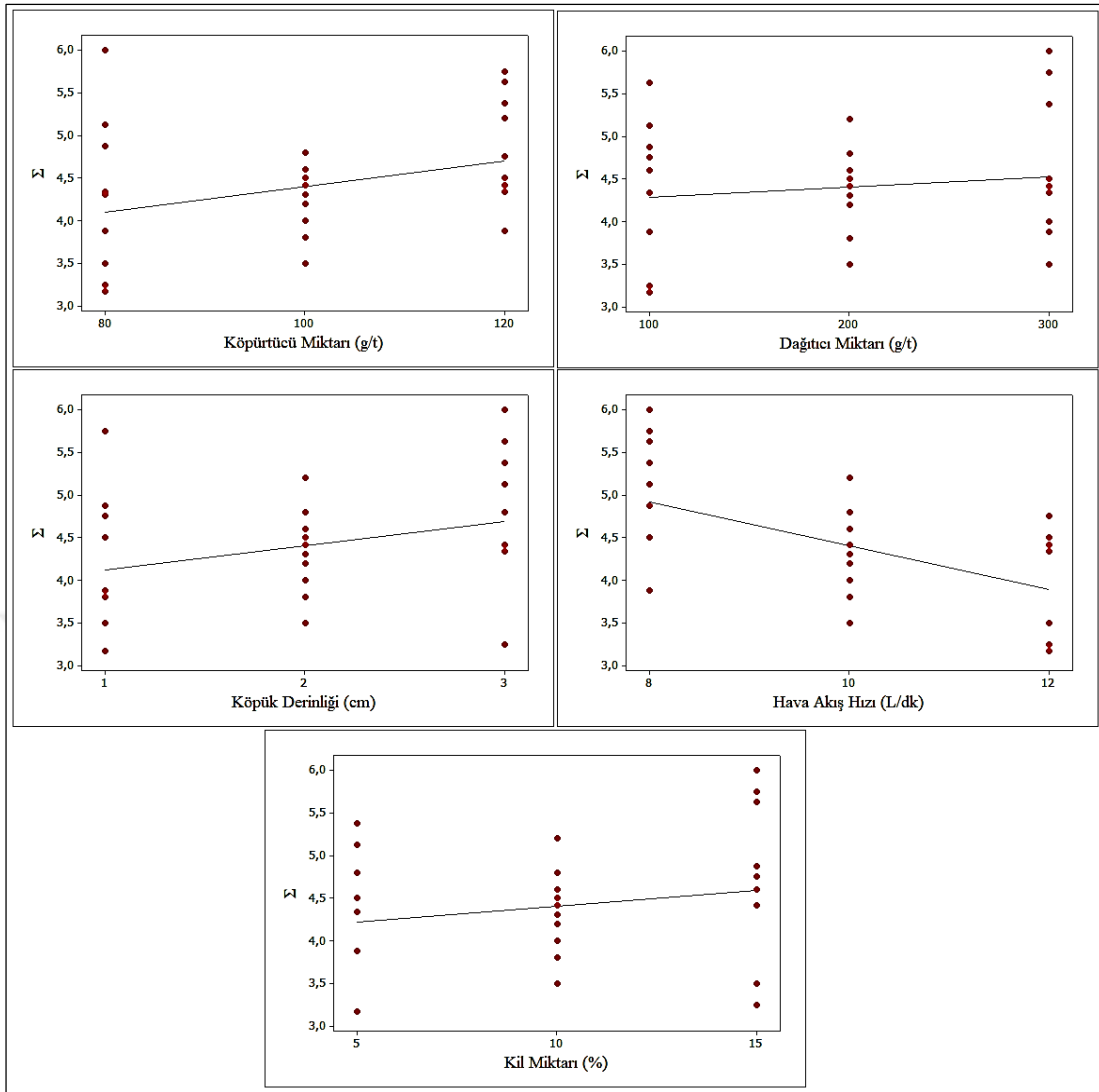
Çizelge 4.26. Montmorillonit etkisinde dinamik köpük kararlılığı için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	14,12	0,71	36,32	4,32	2,65	0,01
A	1	1,62	1,62	3,15	9,93	4,84	0,01
B	1	0,26	0,26	1,26	1,57		0,24
C	1	1,49	1,49	3,02	9,09		0,01
D	1	4,76	4,76	-5,40	29,13		0,00
E	1	0,64	0,64	1,97	3,90		0,07
A <sup>2</sup>	1	1,15	0,42	1,61	2,59		0,14
B <sup>2</sup>	1	0,01	0,00	-0,14	0,02		0,89
C <sup>2</sup>	1	0,00	0,00	-0,14	0,02		0,89
D <sup>2</sup>	1	0,17	0,28	-1,30	1,70		0,22
E <sup>2</sup>	1	0,33	0,33	1,42	2,27		0,10
AB	1	0,00	0,00	0,10	0,01		0,92
AC	1	0,37	0,37	-1,50	2,24		0,16
AD	1	0,56	0,56	1,86	3,45		0,09
AE	1	0,11	0,11	0,83	0,68		0,43
BC	1	0,04	0,04	0,52	0,27		0,62
BD	1	0,00	0,00	-0,16	0,02		0,88
BE	1	0,01	0,01	-0,26	0,07		0,80
CD	1	0,70	0,70	-2,06	4,26		0,06
CE	1	0,70	0,70	-2,06	4,26		0,06
DE	1	1,22	1,22	-2,73	7,47		0,02
Hata	11	1,80	0,16			R <sup>2</sup>	88,71
Toplam	31	15,92					



Şekil 4.31. Montmorillonit ilavesiyle hava akış hızı-kil miktarının dinamik köpük kararlılığına etkisi

Montmorillonit miktarının ve diğer değişkenlerin dinamik köpük kararlılığını nasıl etkilediği Şekil 4.32’de görülmektedir. Köpürtücü miktarı, köpük derinliği ve kil miktarı dinamik köpük kararlılığını artırmıştır. Dinamik köpük kararlılığı için elde edilen model denklemi Eşitlik 4.5’te verilmiştir. Montmorillonit ilavesiyle pulp viskozitesinin artması dinamik köpük kararlılığını artırmıştır. Buna benzer sonuçlar literatürde (Xu ve ark., 2011) elde edilmiştir.



Şekil 4.32. Montmorillonit miktarı ve diğer değişkenlerin dinamik köpük kararlılığına etkileri

$$Y = 4,20 + 0,30A + 0,29C - 0,51D - 0,28DE \quad (4.5)$$

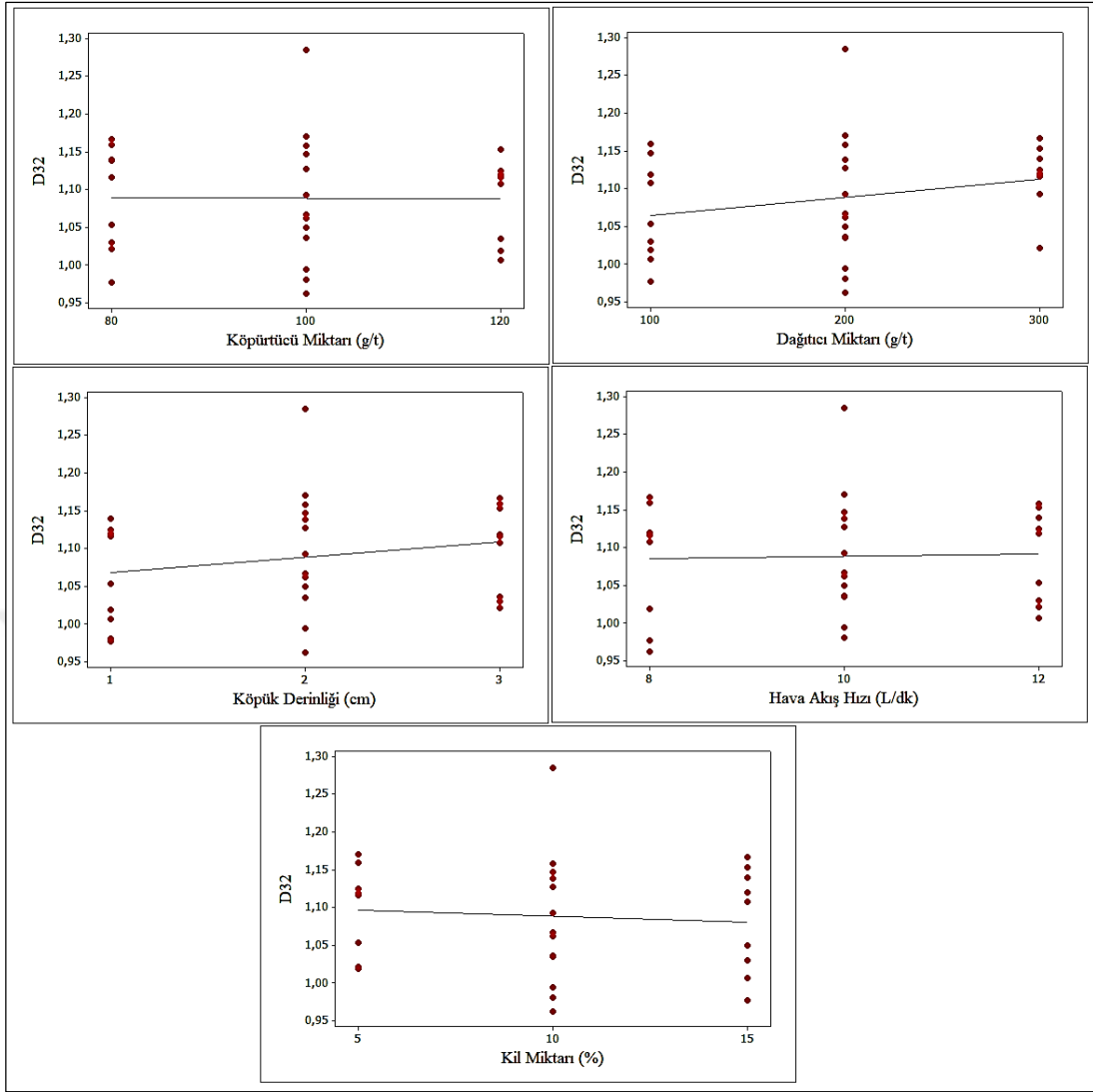
Barbian ve ark. (2003) farklı çalışma koşullarında dinamik köpük kararlılık katsayısını laboratuvar ölçekli çalışmalarla ölçmüş, denge yüksekliği ve dinamik köpük kararlılığı katsayısının hem hava akış hızına hem de köpürtücü miktarına bağlı olduğunu bulmuştur. Bu değişkenlerin miktarı arttıkça maksimum köpük yüksekliği artmaktadır; fakat yüksek hava akış hızında maksimum köpük yüksekliği, köpük kararlı kalmadığı için düşmektedir. Flotasyonda mekanik taşıma tane boyutuna bağlı olduğu kadar, dinamik köpük kararlılığına da bağlıdır. Daha küçük ve kararlı kabarcık yüksek gang taşımaya sebep olmaktadır. Hava akış hızı düşük olduğunda ve köpürtücü miktarı ile köpük derinliği arttığında daha kararlı köpük elde edildiği saptanmıştır.

$D_{32}$  için yapılan değişim analizinde (Çizelge 4.27), kabarcık çapını etkileyen %95 güvenilirlik sınırına girmiş bir flotasyon değişkeni olmadığı görülmektedir. En iri kabarcık boyutu montmorillonit ile elde edilmiştir. Viskozite arttığında daha büyük kabarcık oluşmaktadır. Bunun sebebi kabarcığın oluşumu sırasında sıvı filmin daha hızlı oluşması olarak düşünülmektedir. Viskozite azaldığında daha küçük kabarcık oluşmaktadır. Yapılan çalışmalar kabarcık boyutunun sıvının viskozitesiyle arttığını göstermektedir (Ekmekçi ve ark., 2005).

**Çizelge 4.27.** Montmorillonit etkisinde  $D_{32}$  için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	$F_{Teorik}$	P
Regresyon	20	0,07	0,00	42,12	0,42	2,65	0,95
A	1	0,00	0,00	-0,02	0,00	4,84	0,99
B	1	0,01	0,01	1,13	1,27		0,28
C	1	0,01	0,01	0,98	0,95		0,35
D	1	0,00	0,00	0,16	0,03		0,88
E	1	0,00	0,00	-0,38	0,15		0,71
A <sup>2</sup>	1	0,00	0,00	0,16	0,03		0,87
B <sup>2</sup>	1	0,00	0,01	0,74	0,55		0,47
C <sup>2</sup>	1	0,01	0,01	-1,20	1,44		0,26
D <sup>2</sup>	1	0,00	0,00	-0,30	0,09		0,77
E <sup>2</sup>	1	0,00	0,00	0,57	0,33		0,58
AB	1	0,00	0,00	0,11	0,01		0,92
AC	1	0,00	0,00	0,37	0,14		0,72
AD	1	0,00	0,00	0,60	0,36		0,56
AE	1	0,00	0,00	0,12	0,02		0,90
BC	1	0,01	0,01	-1,12	1,25		0,29
BD	1	0,00	0,00	-0,07	0,00		0,95
BE	1	0,01	0,01	1,20	1,43		0,26
CD	1	0,01	0,01	-0,88	0,78		0,40
CE	1	0,00	0,00	0,30	0,09		0,77
DE	1	0,00	0,00	0,14	0,02		0,89
Hata	11	0,09	0,01			R <sup>2</sup>	43,50
Toplam	31	0,16					

Şekil 4.33'te montmorillonit miktarı ve bazı değişkenlerin kabarcık çapına etkileri görülmektedir. Dağıtıcı miktarı ve köpük derinliğinin artmasıyla kabarcık çapı artmıştır. Diğer değişkenlerin fazla etkisi olmamıştır. Hava akış hızının artmasıyla kabarcık çapı artmıştır. Flotasyon sırasında hava akış hızı artması ile ortalama kabarcık boyutu artarken, bu durum tenör ve verimi etkilemektedir (Ekmekçi ve ark., 2005). Montmorillonitin etkisinin araştırıldığı flotasyon deneylerinde, bağımsız değişkenlerden köpürtücü miktarı, köpük derinliği ve kil miktarının etkisinin en önemli değişkenler olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.33. Montmorillonit miktarı ve diğer değişkenlerin kabarcık çapına etkileri

Bağımlı değişkenlere etki eden alt değişkenleri tek tek ele alacak olursak; köpürtücü miktarının kalkopirit tenörüne, pirit tenörüne ve dinamik köpük kararlılığına etkisinin olduğu, dağıtıcı miktarının ise tekli olarak etkilemediği saptanmıştır. Köpük derinliğinin kalkopirit tenörüne, pirit tenör-verimine ve dinamik köpük kararlılığına etkisinin olduğu, hava akış hızının ise sadece dinamik köpük kararlılığına etkisinin olduğu, son olarak kil miktarının kalkopirit tenör-verimine, pirit tenör-verimine etkisinin olduğu belirlenmiştir. İkili etkileşimlerden ise köpürtücü miktarı-dağıtıcı miktarı kalkopirit tenörünü, pirit tenör-verimini etkilerken; dağıtıcı miktarı-köpük derinliği kalkopirit verimini etkilemiştir. Hava akış hızı-kil miktarı etkileşimi ise kalkopirit verimi ve dinamik köpük kararlılığında etkili olmuştur.

#### 4.3.2.1.2. İllitin kalkopirit flotasyonunda etkisi ve modellenmesi

Tasarlanan deney programı (Çizelge 3.10) çerçevesinde toplam 32 adet klasik flotasyon deneyi ve 32 adet köpük kolonu deneyi gerçekleştirilmiştir. Yapılan 64 deneye ait sonuçlar Çizelge 4.28’de ve değişim analizleri (ANOVA) Çizelge 4.29-34’te verilmiştir. Varyans analizinde güven aralığı %95 olarak seçilmiş ve bu yüzden elde edilen analiz sonuçlarında p değeri 0,05’ten küçük olan terimler istatistiksel açıdan anlamlı kabul edilmiştir. Ayrıca analiz çizelgelerinde etki kestirimi değerleri (T) ile bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenlere etkisi (artırma/azaltma eğilimi) verilmiştir.

**Çizelge 4.28.** Flotasyonda illitin kalkopirit/pirit tenör-verimine, dinamik köpük kararlılığına ve ortalama kabarcık çapına etkisi

Deney No	Kalkopirit (%)	Kalkopirit Verim (%)	Pirit (%)	Pirit Verim (%)	Dinamik Köpük Kararlılığı (s)	Ortalama Kabarcık Çapı (mm)
1	38,84	63,51	56,16	8,89	4,40	0,61
2	37,82	65,92	61,57	10,39	4,20	0,63
3	41,43	60,34	58,37	8,23	4,75	0,65
4	35,67	62,53	58,41	9,91	4,00	0,59
5	44,66	54,47	55,07	6,50	5,25	0,66
6	39,07	66,16	60,45	9,91	3,42	0,56
7	44,01	66,75	55,93	8,21	4,90	0,59
8	39,40	72,29	60,22	10,70	4,50	0,62
9	24,78	41,74	74,69	12,18	4,00	0,60
10	42,50	63,03	57,20	8,21	3,38	0,59
11	36,81	67,04	62,99	11,11	3,92	0,60
12	42,13	67,23	57,73	8,92	5,13	0,67
13	38,88	59,58	60,99	9,05	3,50	0,62
14	25,94	61,56	57,15	13,13	4,17	0,60
15	35,49	63,12	60,38	10,40	4,10	0,63
16	39,08	72,87	60,82	10,98	4,34	0,61
17	40,94	57,62	58,56	7,98	3,80	0,60
18	35,89	60,82	49,13	8,06	4,40	0,62
19	36,09	68,41	55,02	10,10	3,67	0,58
20	44,59	60,31	55,23	7,23	3,50	0,59
21	39,96	65,72	47,33	7,54	4,60	0,58
22	39,95	66,05	49,93	7,99	4,00	0,62
23	37,05	64,78	62,14	10,52	4,00	0,63
24	38,97	64,23	60,58	9,67	4,10	0,64
25	35,13	72,22	51,94	10,34	4,63	0,65
26	31,36	64,87	60,90	12,20	3,75	0,62
27	46,62	54,22	53,25	6,00	4,63	0,64
28	40,31	61,17	59,60	8,76	4,17	0,61
29	37,38	81,49	62,51	13,20	5,88	0,65
30	34,02	66,54	53,21	10,08	4,00	0,67
31	40,67	68,31	59,11	9,61	4,59	0,63
32	37,75	64,60	57,60	9,54	4,20	0,62

En düşük kalkopirit tenörü %5 kil miktarı, 8 L/dk hava akış hızı, 1 cm köpük derinliği, 100 g/t dağıtıcı miktarı ve 120 g/t köpürtücü miktarı koşullarında %24,78 olarak elde edilirken, en yüksek kalkopirit tenörü ise %5 kil miktarı, 8 L/dk hava akış hızı, 3 cm köpük derinliği, 100 g/t dağıtıcı miktarı ve 80 g/t köpürtücü miktarı koşullarında %46,62 olarak elde edilmiştir. En düşük kalkopirit verimi %5 kil miktarı, 8 L/dk hava akış hızı, 1 cm köpük derinliği, 100 g/t dağıtıcı miktarı ve 120 g/t köpürtücü miktarı koşullarında %41,74 olarak elde edilirken, en yüksek kalkopirit verimi ise %15 kil miktarı, 8 L/dk hava akış hızı, 3 cm köpük derinliği, 100 g/t dağıtıcı miktarı ve 120 g/t köpürtücü miktarı koşullarında %81,49 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.29’da kalkopirit tenörü için en önemli değişkenin köpük derinliği olduğu görülürken, bunu sırasıyla köpürtücü miktarı, kil miktarı ve dağıtıcı miktarı takip etmektedir. İkili etkileşimlerde ise köpürtücü miktarı-dağıtıcı miktarı, köpürtücü miktarı-kil miktarı, dağıtıcı miktarı-köpük derinliği ve dağıtıcı miktarı-hava akış hızı önemli etkiye sahiptir. Bunların dışındaki diğer tüm değişkenler ise %95 güvenlik sınırı altında kalarak daha az etkili olmuştur.

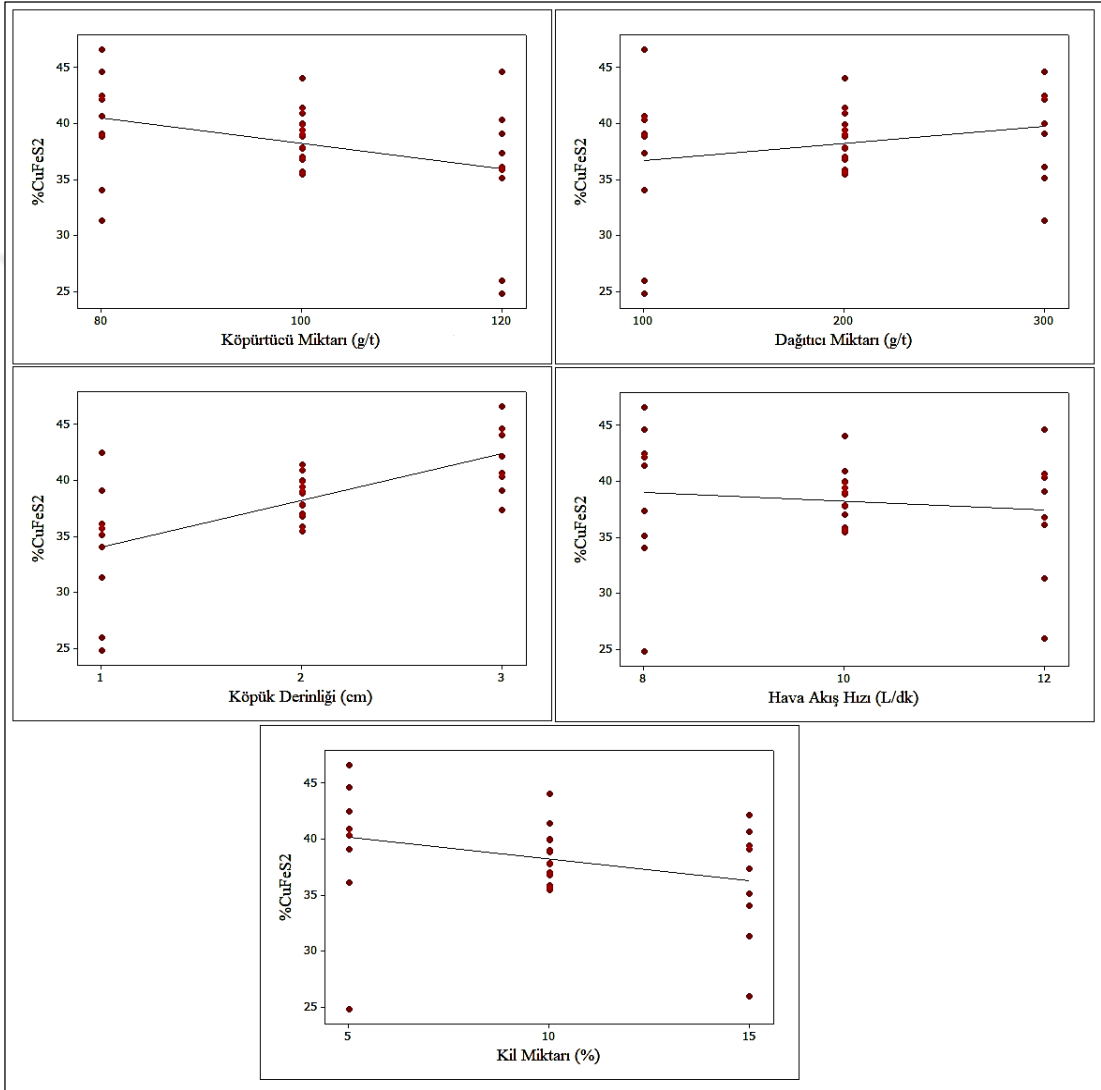
**Çizelge 4.29.** İllit etkisinde %CuFeS<sub>2</sub> için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	659,74	32,99	79,20	11,28	2,65	0,00
A	1	91,45	91,45	-5,59	31,28	4,84	0,00
B	1	43,13	43,13	3,84	14,75		0,00
C	1	311,53	311,53	10,32	106,55		0,00
D	1	12,05	12,05	-2,03	4,12		0,07
E	1	65,88	65,88	-4,75	22,53		0,00
A <sup>2</sup>	1	10,18	9,53	-1,81	3,26		0,10
B <sup>2</sup>	1	0,88	0,01	0,04	0,00		0,97
C <sup>2</sup>	1	1,24	0,58	0,45	0,20		0,67
D <sup>2</sup>	1	0,01	0,13	-0,21	0,05		0,84
E <sup>2</sup>	1	1,64	1,64	0,75	0,56		0,47
AB	1	43,44	43,44	3,86	14,86		0,00
AC	1	9,65	9,65	1,82	3,30		0,10
AD	1	5,14	5,14	1,33	1,76		0,21
AE	1	16,57	16,57	2,38	5,67		0,04
BC	1	15,57	15,57	-2,31	5,33		0,04
BD	1	16,93	16,93	-2,41	5,79		0,04
BE	1	3,40	3,40	-1,08	1,16		0,30
CD	1	0,29	0,29	-0,32	0,10		0,76
CE	1	0,05	0,05	-0,14	0,02		0,89
DE	1	10,72	10,72	-1,92	3,67		0,08
Hata	11	32,16	2,92			R <sup>2</sup>	95,35
Toplam	31	691,90					



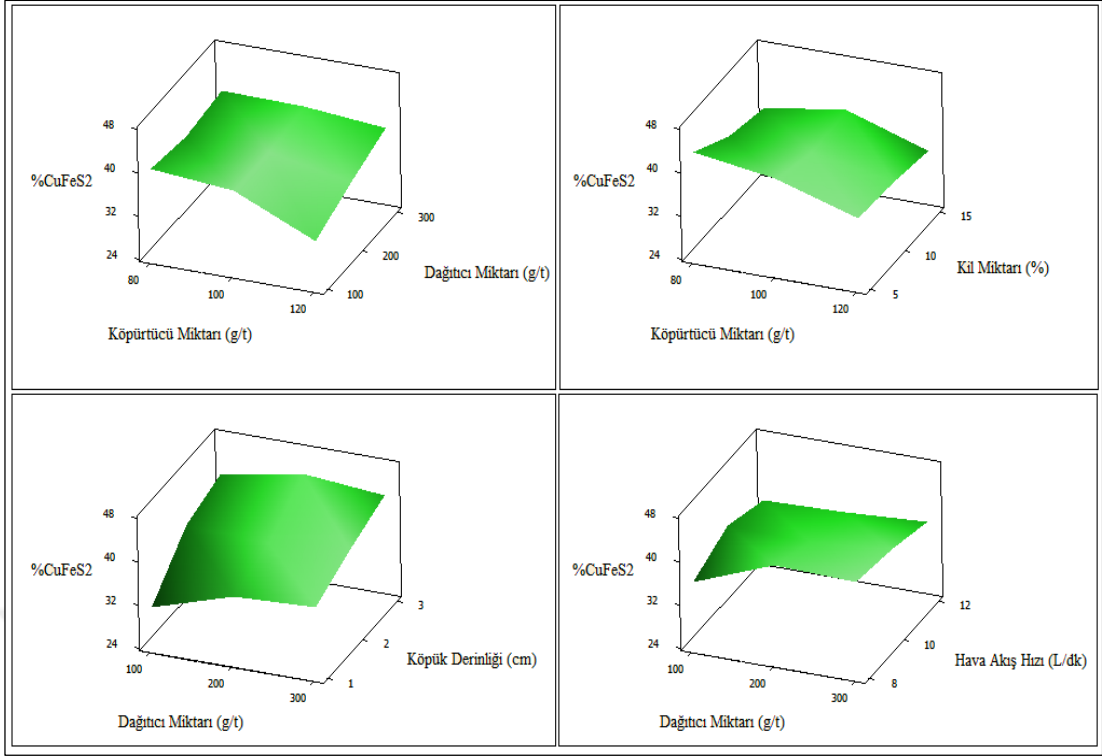
Şekil 4.34'te illit miktarı ve diğer değişkenlerin kalkopirit tenörüne etkileri görülmektedir. Dağıtıcı miktarı ve köpük derinliğinin artmasıyla kalkopirit tenörü artmıştır. Köpürtücü miktarı, kil miktarı ve hava akış hızının artmasıyla tenörde düşüş olmuştur. Eşitlik 4.6'da elde edilen model denkleminin verilmiştir.

$$Y = 38,70 - 2,25A + 1,55B + 4,16C - 1,91E + 1,65AB + 1,02AE - 0,99BC - 1,03 BD \quad (4.6)$$



Şekil 4.34. İllit miktarı ve diğer değişkenlerin kalkopirit tenörüne etkileri

Etkisi anlamlı çıkan ikili etkileşimlere ait üç boyutlu yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde (Şekil 4.35), köpük derinliğinin ve dağıtıcı miktarının artmasıyla tenörün artmış olduğu görülmektedir. Düşük hava akış hızında ve yüksek dağıtıcı miktarında mekanik taşımamanın etkisi azalmış, tenör artmıştır.



Şekil 4.35. İllit ilavesiyle ikili etkileşimlerin kalkopirit tenörüne etkileri

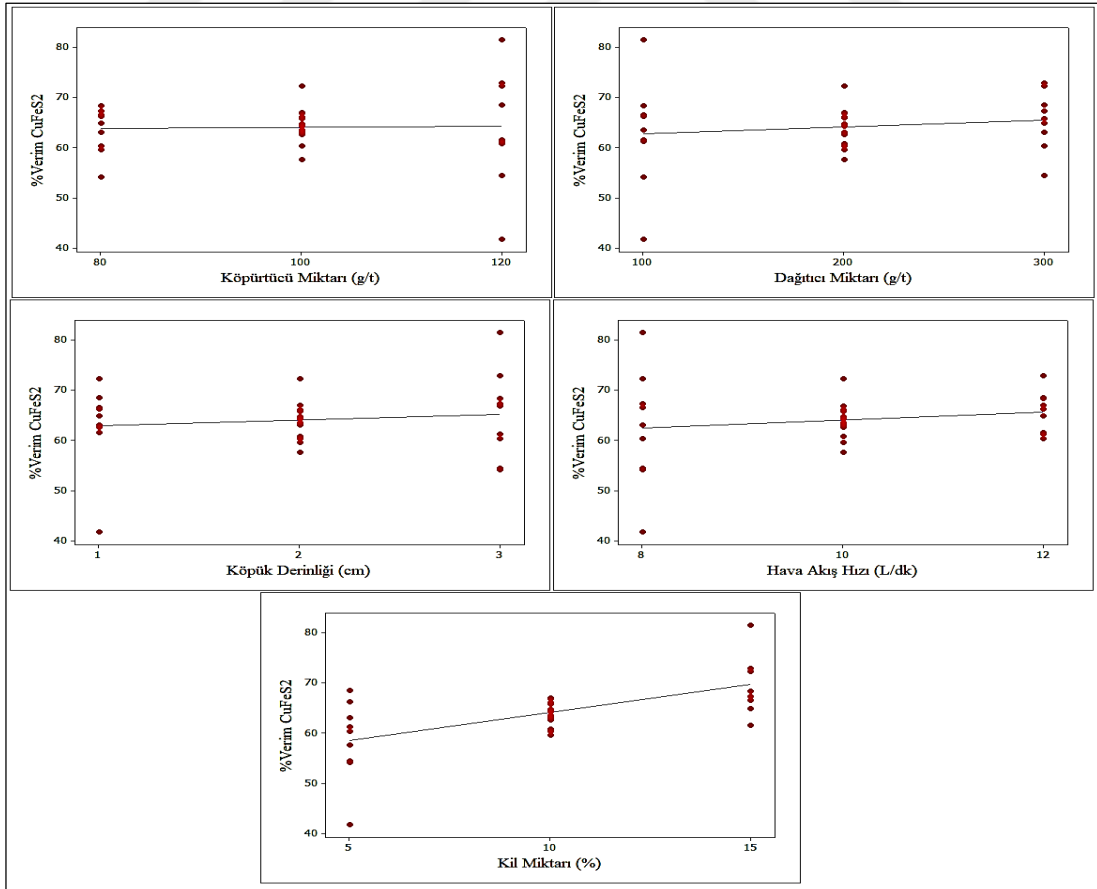
İllit içeren cevher ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kalkopirit verimini etkileyen en önemli değişken kil miktarıdır (Çizelge 4.30). Bunu sırasıyla; hava akış hızı, dağıtıcı miktarı ve köpük derinliği takip etmektedir. İkili etkileşimlerde ise 7 farklı değişkenin önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.36’da illit miktarı ile diğer değişkenlerin kalkopirit verimine etkisi görülmektedir. Kil miktarının arttığı tüm deneylerde kalkopirit verimi önemli şekilde artarken, değişkenlerin hepsi kalkopirit verimini artırma eğilimindedir. Eşitlik 4.7’de elde edilen model denklemi verilmiştir.

$$Y = 64,14 + 1,36B + 1,10C + 1,64D + 5,57E - 3,45A^2 + 1,36AB + 2,29AC + 2,45AE - 2,68 BC - 1,48BE + 2,12CE - 3,91DE \quad (4.7)$$

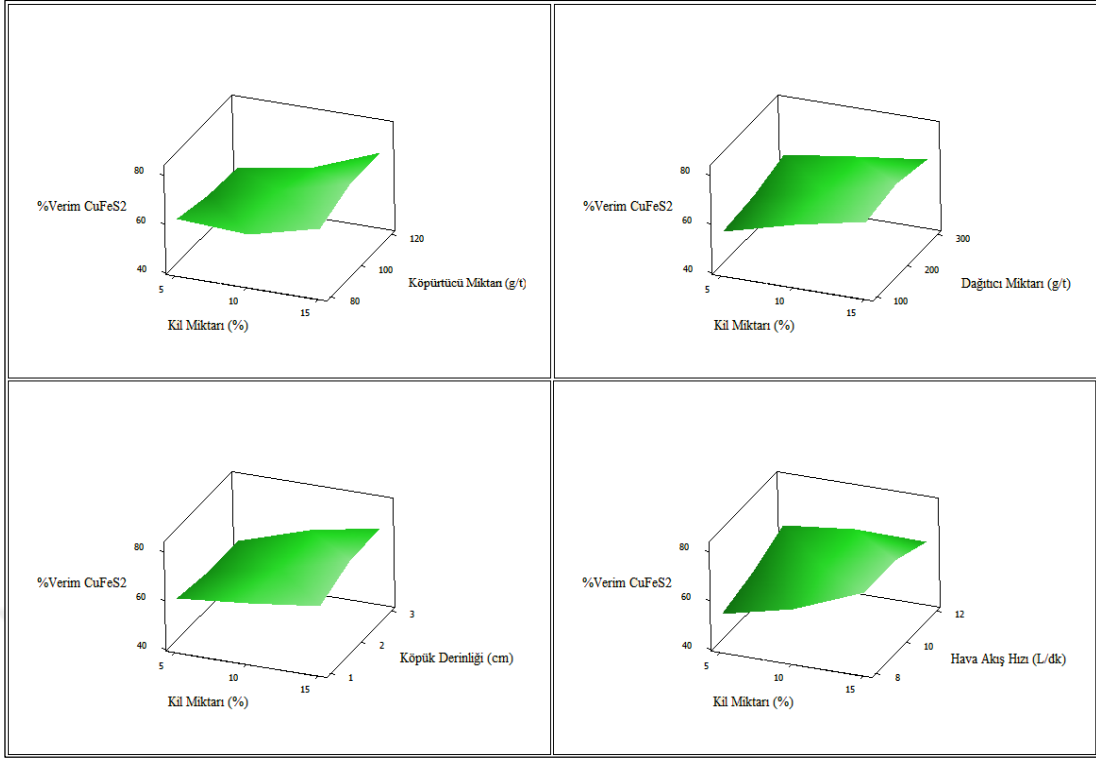
Etkisi anlamlı çıkan ikili etkileşimlere ait üç boyutlu yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde (Şekil 4.37) tüm değişkenlerin kil miktarına bağlı olarak artmasıyla beraber kalkopirit verimi artmıştır.

Çizelge 4.30. İllit etkisinde %Verim CuFeS<sub>2</sub> için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	1380,20	69,01	142,50	27,83	2,65	0,00
A	1	1,13	1,13	0,67	0,45	4,84	0,51
B	1	33,15	33,15	3,66	13,37		0,00
C	1	21,65	21,65	2,95	8,73		0,01
D	1	48,18	48,18	4,41	19,43		0,00
E	1	558,52	558,52	15,01	225,20		0,00
A <sup>2</sup>	1	7,79	29,33	-3,44	11,82		0,01
B <sup>2</sup>	1	13,42	2,29	0,96	0,92		0,36
C <sup>2</sup>	1	5,52	2,41	0,99	0,97		0,35
D <sup>2</sup>	1	0,29	0,00	0,04	0,00		0,97
E <sup>2</sup>	1	4,18	4,18	1,30	1,69		0,22
AB	1	29,70	29,70	3,46	11,97		0,01
AC	1	83,76	83,76	5,81	33,77		0,00
AD	1	1,86	1,86	0,87	0,75		0,41
AE	1	95,72	95,72	6,21	38,60		0,00
BC	1	114,61	114,61	-6,80	46,21		0,00
BD	1	0,85	0,85	-0,59	0,34		0,57
BE	1	34,91	34,91	-3,75	14,08		0,00
CD	1	9,34	9,34	-1,94	3,76		0,08
CE	1	71,68	71,68	5,38	28,90		0,00
DE	1	243,95	243,95	-9,92	98,36		0,00
Hata	11	27,28	2,48			R <sup>2</sup>	98,06
Toplam	31	1407,48					



Şekil 4.36. İllit miktarı ve diğer değişkenlerin kalkopirit verimine etkileri

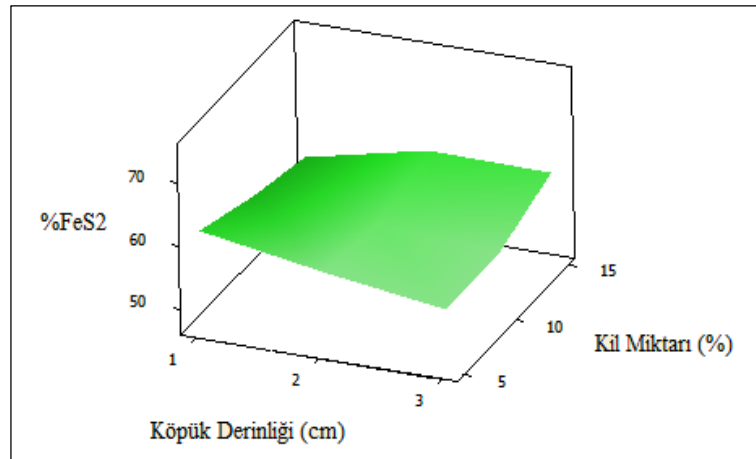


Şekil 4.37. İllit ilavesiyle ikili etkileşimlerin kalkopirit verimine etkileri

Çizelge 4.31’de pirit tenörü için yapılan değişim analizinde, pirit tenörünü etkileyen %95 güvenirlilik sınırına girmiş flotasyon değişkeni yoktur. Sadece ikili etkileşimlerden köpük derinliği-kil miktarı önemli etkiye sahiptir (Şekil 4.38). Dağıtıcı miktarının artmasıyla pirit tenörü düşmüştür (Şekil 4.39). Eşitlik 4.8’de elde edilen model denklemi verilmiştir.

$$Y = 57,54 + 2,57CE$$

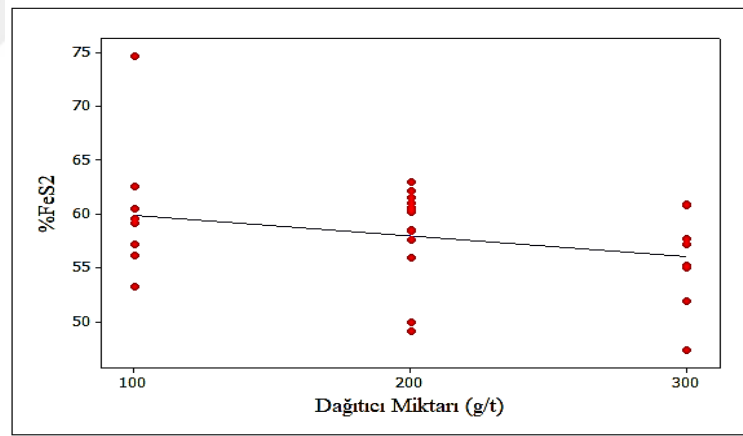
(4.8)



Şekil 4.38. İllit ilavesiyle köpük derinliği-kil miktarının pirit tenörüne etkisi

Çizelge 4.31. İllit etkisinde %FeS<sub>2</sub> için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	543,15	27,16	43,32	1,26	2,65	0,36
A	1	3,44	3,44	0,40	0,16	4,84	0,70
B	1	67,65	67,65	-1,77	3,13		0,10
C	1	5,25	5,25	-0,49	0,24		0,63
D	1	2,95	2,95	0,37	0,14		0,72
E	1	1,67	1,67	-0,28	0,08		0,79
A <sup>2</sup>	1	0,13	6,35	-0,54	0,29		0,60
B <sup>2</sup>	1	11,60	59,53	-1,66	2,76		0,13
C <sup>2</sup>	1	18,17	0,63	0,17	0,03		0,87
D <sup>2</sup>	1	56,07	39,71	1,36	1,84		0,20
E <sup>2</sup>	1	18,26	18,26	0,92	0,85		0,38
AB	1	81,65	81,65	-1,94	3,78		0,08
AC	1	1,97	1,97	0,30	0,09		0,77
AD	1	41,95	41,95	-1,39	1,94		0,19
AE	1	17,63	17,63	-0,90	0,82		0,39
BC	1	13,69	13,69	0,80	0,63		0,44
BD	1	18,88	18,88	0,94	0,87		0,37
BE	1	38,68	38,68	1,34	1,79		0,21
CD	1	5,87	5,87	0,52	0,27		0,61
CE	1	105,99	105,99	2,22	4,91		0,05
DE	1	31,66	31,66	1,21	1,47		0,25
Hata	11	237,56	21,60			R <sup>2</sup>	69,57
Toplam	31	780,70					

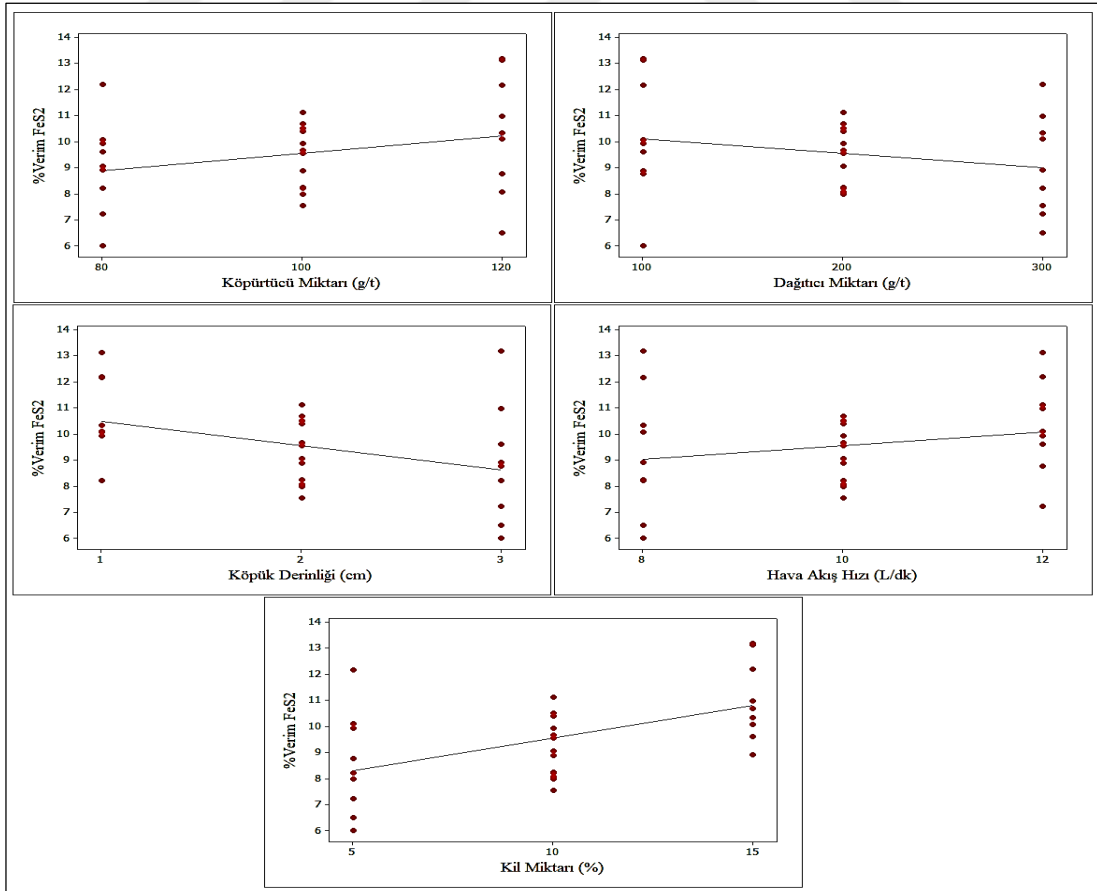


Şekil 4.39. Dağıtıcı miktarının pirit tenörüne etkisi

Çizelge 4.32’de pirit verimini etkileyen en önemli flotasyon değişkeni kil miktarıdır. Diğer önemli değişkenler ise köpük derinliği ve köpürtücü miktarı iken, ikili etkileşimde önemli etkiye sahip olan değişken köpürtücü miktarı-dağıtıcı miktarı olmuştur. Eşitlik 4.9’da elde edilen model denklemi ve Şekil 4.40’da illit miktarı ve diğer değişkenlerin pirit verimine etkileri verilmiştir. Köpürtücü miktarı, hava akış hızı ve kil miktarı arttıkça verim artmıştır. Dağıtıcı miktarı piriti bastırmada etkili olurken, köpük derinliği piritin köpük bölgesinden uzaklaşmasını sağlamıştır. Düşük dağıtıcı miktarında ve yüksek köpürtücü miktarında pirit daha da hidrofob özellik kazanmıştır (Şekil 4.41).

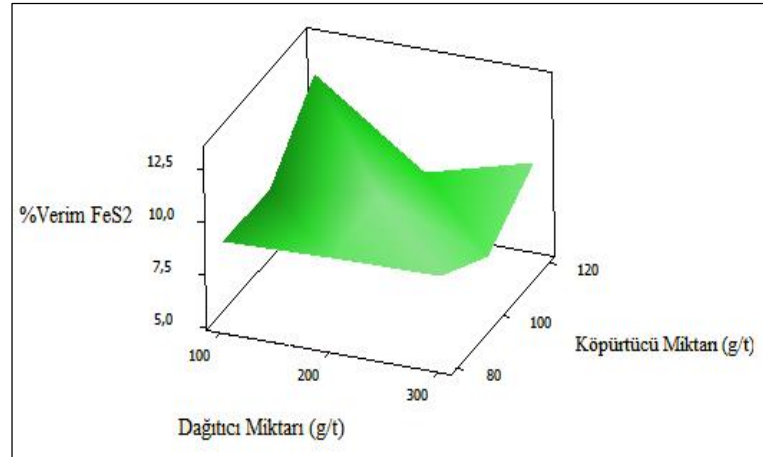
Çizelge 4.32. İllit etkisinde %Verim FeS<sub>2</sub> için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	82,54	4,13	30,16	3,59	2,65	0,02
A	1	8,05	8,05	2,65	7,00	4,84	0,02
B	1	5,26	5,26	-2,14	4,58		0,06
C	1	15,41	15,41	-3,66	13,41		0,00
D	1	4,88	4,88	2,06	4,25		0,06
E	1	27,58	27,58	4,90	24,00		0,00
A <sup>2</sup>	1	0,86	0,23	-0,45	0,20		0,66
B <sup>2</sup>	1	0,00	1,02	-0,94	0,89		0,37
C <sup>2</sup>	1	1,00	0,10	0,30	0,09		0,77
D <sup>2</sup>	1	2,20	1,61	1,19	1,40		0,26
E <sup>2</sup>	1	0,57	0,57	0,70	0,50		0,50
AB	1	6,65	6,65	-2,41	5,79		0,04
AC	1	0,34	0,34	0,54	0,29		0,60
AD	1	1,56	1,56	-1,17	1,36		0,27
AE	1	0,03	0,03	0,15	0,02		0,88
BC	1	0,02	0,02	0,12	0,01		0,91
BD	1	2,69	2,69	1,53	2,34		0,15
BE	1	0,09	0,09	0,28	0,08		0,78
CD	1	0,41	0,41	-0,60	0,36		0,56
CE	1	4,92	4,92	2,07	4,28		0,06
DE	1	0,01	0,01	0,07	0,00		0,95
Hata	11	12,64	1,15			R <sup>2</sup>	86,72
Toplam	31	95,19					



Şekil 4.40. İllit miktarı ve diğer değişkenlerin piritleştirme verimine etkileri

$$Y = 9,24 + 0,67A - 0,93C + 1,24E - 0,65AB \quad (4.9)$$



**Şekil 4.41.** İllit ilavesiyle dağıtıcı miktarı-köpürtücü miktarının pirit verimine etkisi

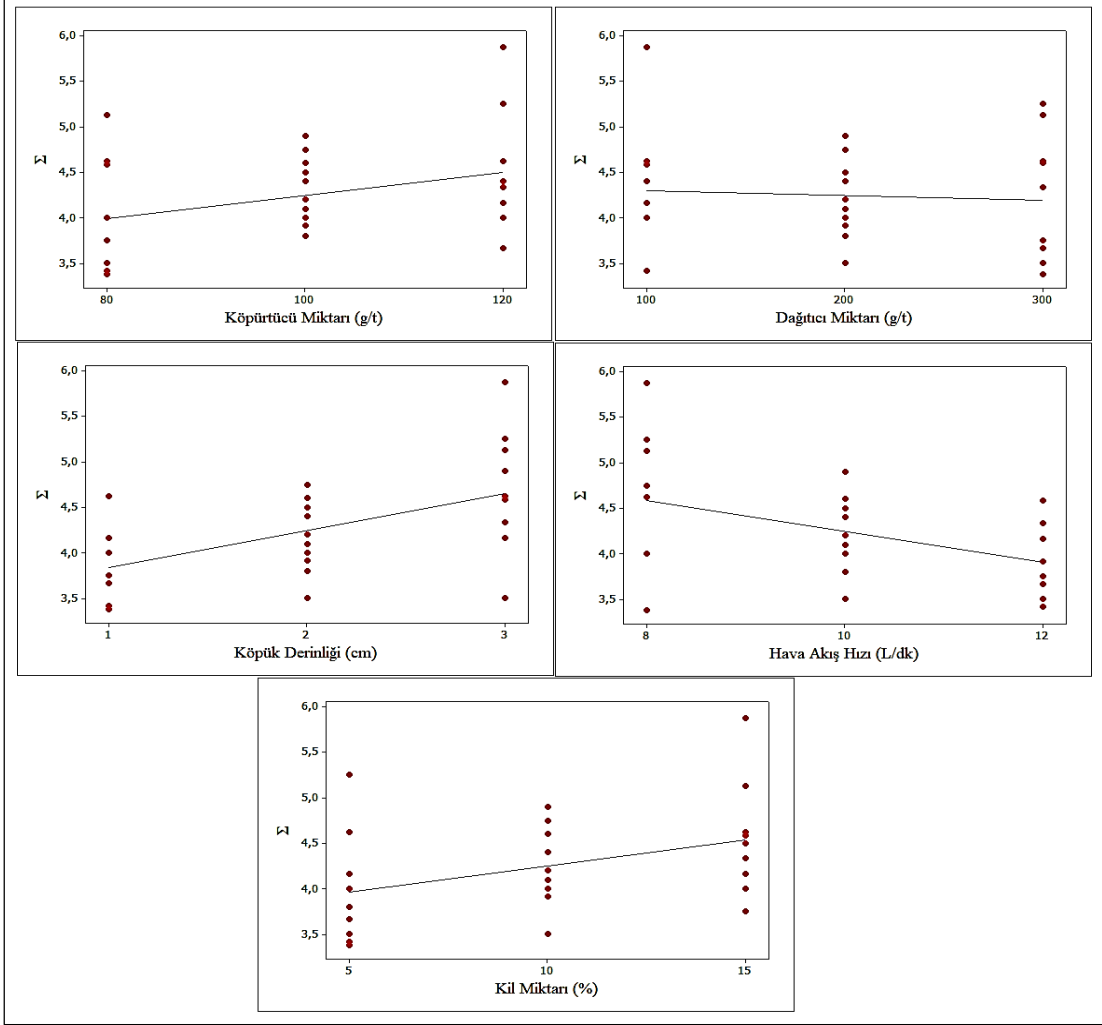
Dinamik köpük kararlılığında (Çizelge 4.33), köpük derinliğinin önemi dikkat çekmektedir. Etki önem sırasınca hava akış hızı, kil miktarı ve köpürtücü miktarı sırasıyla köpük derinliğini takip ederken, ikili etkileşimde köpük derinliği-hava akış hızı ile köpürtücü miktarı-hava akış hızı etkili olmuştur. Eşitlik 4.10'da elde edilen model denklemi verilmiştir.

**Çizelge 4.33.** İllit etkisinde dinamik köpük kararlılığı için Varyans analizi

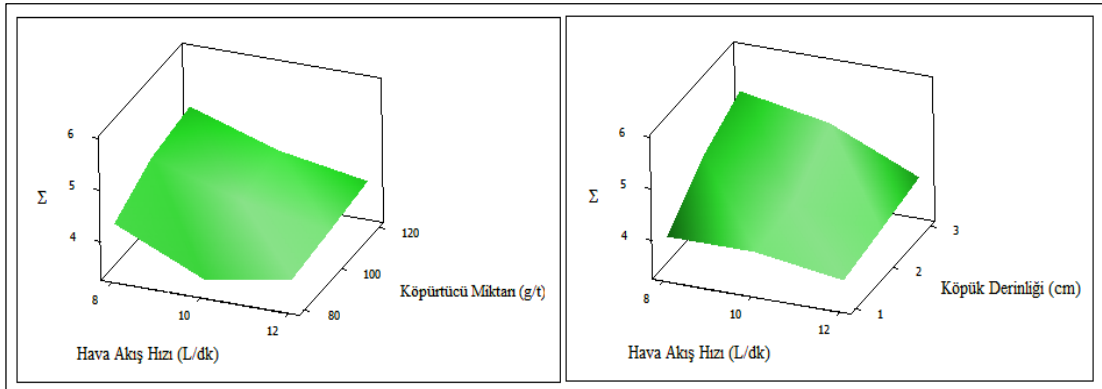
Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	9,28	0,46	88,72	16,98	2,65	0,00
A	1	1,18	1,18	6,57	43,20	4,84	0,00
B	1	0,06	0,06	-1,44	2,07		0,18
C	1	3,01	3,01	10,50	110,15		0,00
D	1	2,09	2,09	-8,74	76,32		0,00
E	1	1,48	1,48	7,36	54,13		0,00
A <sup>2</sup>	1	0,00	0,23	-2,92	8,50		0,01
B <sup>2</sup>	1	0,34	0,15	2,31	5,31		0,04
C <sup>2</sup>	1	0,10	0,09	1,83	3,35		0,09
D <sup>2</sup>	1	0,01	0,01	0,72	0,52		0,48
E <sup>2</sup>	1	0,03	0,03	-1,02	1,04		0,33
AB	1	0,02	0,02	0,82	0,67		0,43
AC	1	0,00	0,00	-0,19	0,04		0,85
AD	1	0,15	0,15	-2,33	5,44		0,04
AE	1	0,02	0,02	-0,95	0,89		0,37
BC	1	0,05	0,05	-1,32	1,75		0,21
BD	1	0,06	0,06	-1,45	2,10		0,18
BE	1	0,01	0,01	-0,57	0,32		0,58
CD	1	0,68	0,68	-4,98	24,80	0,00	
CE	1	0,01	0,01	0,44	0,19	0,67	
DE	1	0,01	0,01	-0,441	0,19	0,67	
Hata	11	0,30	0,03			R <sup>2</sup>	96,86
Toplam	31	9,58					

$$Y = 4,19 + 0,26A + 0,41C - 0,34D + 0,29E - 0,31A^2 + 0,24B^2 - 0,10AD - 0,21CD \quad (4.10)$$

Köpürtücü miktarı, kil miktarı ve köpük derinliği arttıkça dinamik köpük kararlılığında artmıştır (Şekil 4.42). İkili etkileşimlerde düşük hava akış hızında, yüksek köpürtücü miktarı ve köpük derinliğinde daha kararlı köpük elde edilmiştir (Şekil 4.43).



Şekil 4.42. İllit miktarı ve diğer değişkenlerin dinamik köpük kararlılığına etkileri



Şekil 4.43. İllit ilavesiyle ikili etkileşimlerin dinamik köpük kararlılığına etkisi



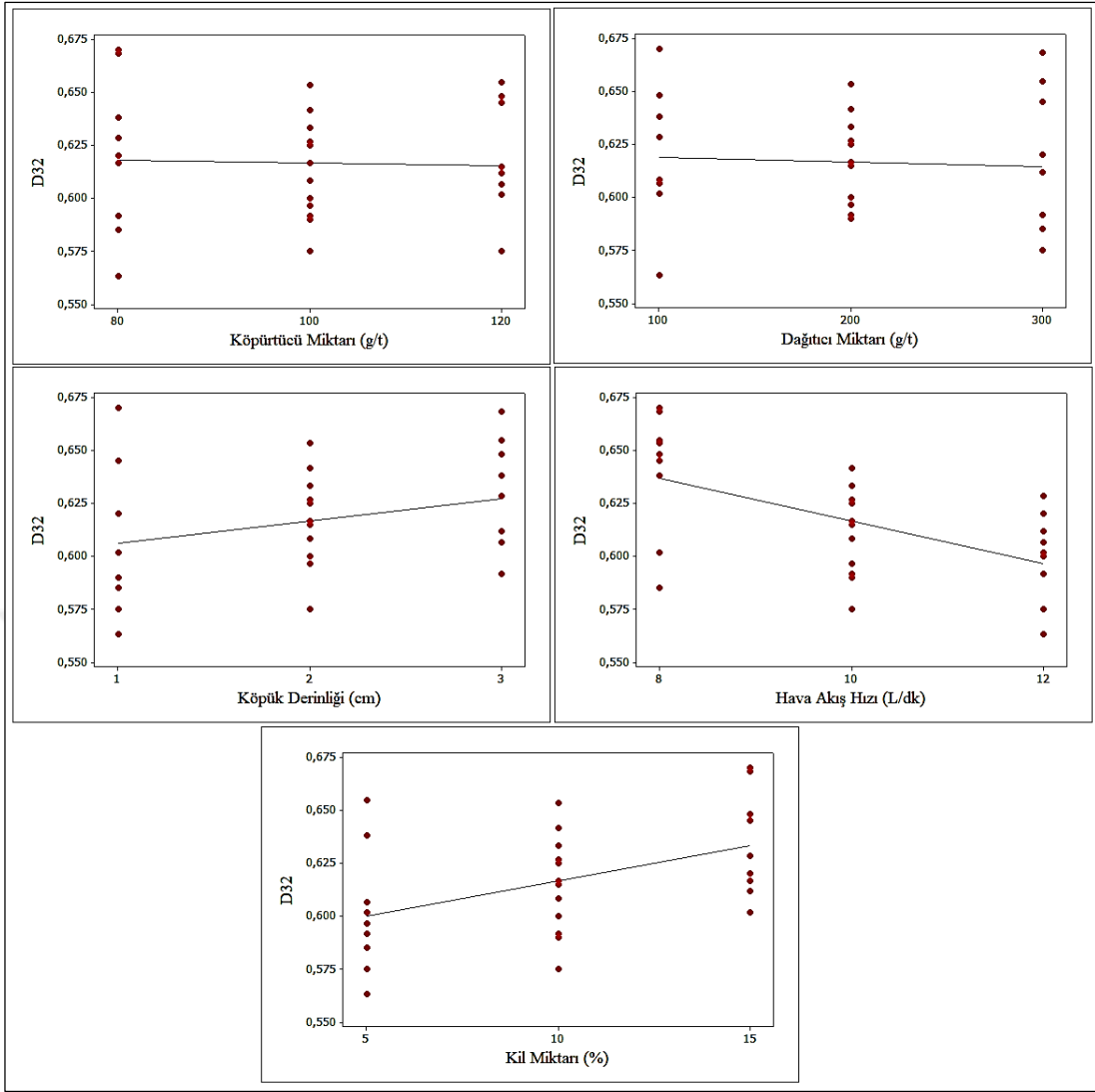
Çizelge 4.34’de D<sub>32</sub> için yapılan değişim analizinde etki önem sırasında hava akış hızı, kil miktarı ve köpük derinliğinin önemi görülmektedir. İkili etkileşimde ise köpük derinliği-kil miktarının etkisi olmuştur. İllit miktarı ve bazı değişkenlerin kabarcık çapına etkileri Şekil 4.44’te, elde edilen model denklemini Eşitlik 4.11’de verilmiştir. Kil miktarı arttıkça kabarcık çapı artmış, düşük köpük derinliği ve yüksek hava akış hızında daha küçük kabarcık elde edilmiştir (Şekil 4.44-4.45).

Çizelge 4.34. İllit etkisinde D<sub>32</sub> için Varyans analizi

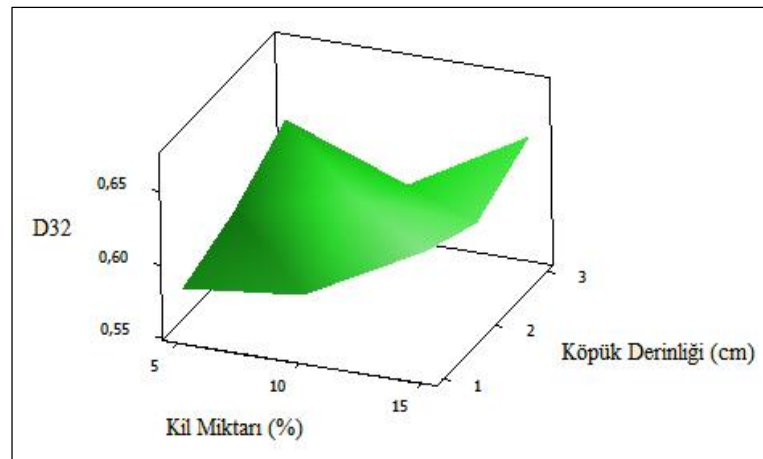
Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	0,02	0,00	129,42	3,51	2,65	0,02
A	1	0,00	0,00	-0,31	0,09	4,84	0,76
B	1	0,00	0,00	-0,57	0,32		0,58
C	1	0,00	0,00	2,67	7,14		0,02
D	1	0,01	0,01	-5,20	27,05		0,00
E	1	0,01	0,01	4,21	17,71		0,00
A <sup>2</sup>	1	0,00	0,00	0,97	0,93		0,36
B <sup>2</sup>	1	0,00	0,00	-1,32	1,73		0,22
C <sup>2</sup>	1	0,00	0,00	-1,40	1,95		0,19
D <sup>2</sup>	1	0,00	0,00	1,99	3,95		0,07
E <sup>2</sup>	1	0,00	0,00	0,10	0,01		0,92
AB	1	0,00	0,00	0,95	0,91		0,36
AC	1	0,00	0,00	0,15	0,02		0,88
AD	1	0,00	0,00	0,05	0,00		0,96
AE	1	0,00	0,00	-2,11	4,44		0,06
BC	1	0,00	0,00	0,25	0,06		0,81
BD	1	0,00	0,00	0,05	0,00		0,96
BE	1	0,00	0,00	0,00	0,00		1,00
CD	1	0,00	0,00	-0,45	0,20		0,66
CE	1	0,00	0,00	-2,21	4,87		0,05
DE	1	0,00	0,00	-0,40	0,16		0,70
Hata	11	0,00	0,00			R <sup>2</sup>	86,46
Toplam	31	0,02					

$$Y = 0,62 + 0,01C - 0,02D + 0,02E - 0,01CE$$

(4.11)



Şekil 4.44. İllit miktarı ve diğer değişkenlerin kabarcık çapına etkileri



Şekil 4.45. İllit ilavesiyle kil miktarı-köpük derinliğinin kabarcık çapına etkisi

İllitin etkisinin araştırıldığı deneylerde, bağımlı değişkenlere etki eden değişkenleri tek tek ele alacak olursak; köpürtücü miktarının kalkopirit tenörüne, pirit verimine ve dinamik köpük kararlılığına etkisinin olduğu, dağıtıcı miktarının ise kalkopirit tenör-verimine etkisi olduğu belirlenmiştir. Köpük derinliğinin kalkopirit tenör-verimine, pirit verimine, dinamik köpük kararlılığına ve kabarcık çapına etkisinin olduğu saptanmıştır. Hava akış hızının kalkopirit verimine, dinamik köpük kararlılığına ve kabarcık çapına etkisinin olduğu, son olarak kil miktarının kalkopirit tenör ve verimine, pirit verimine, dinamik köpük kararlılığına ve kabarcık çapına etkisi olmuştur.

#### **4.3.2.1.3. Kaolinin kalkopirit flotasyonunda etkisi ve modellenmesi**

Tasarlanan deney programı (Çizelge 3.10) çerçevesinde toplam 32 adet klasik flotasyon deneyi ve 32 adet köpük kolonu deneyi gerçekleştirilmiştir. Yapılan 64 deneye ait sonuçlar Çizelge 4.35'te ve değişim analizleri (ANOVA) Çizelge 4.36-41'de verilmiştir. Varyans analizinde güven aralığı %95 olarak seçilmiş ve bu yüzden elde edilen analiz sonuçlarında p değeri 0,05'ten küçük olan terimler istatistiksel açıdan anlamlı kabul edilmiştir. Ayrıca analiz çizelgelerinde etki kestirimi değerleri (T) ile bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenlere etkisi (artırma/azaltma eğilimi) verilmiştir.

En düşük kalkopirit tenörü %10 kil miktarı, 10 L/dk hava akış hızı, 2 cm köpük derinliği, 100 g/t dağıtıcı miktarı ve 100 g/t köpürtücü miktarı koşullarında %28,13 olarak elde edilirken, en yüksek kalkopirit tenörü ise %5 kil miktarı, 8 L/dk hava akış hızı, 3 cm köpük derinliği, 100 g/t dağıtıcı miktarı ve 80 g/t köpürtücü miktarı koşullarında %43,82 olarak elde edilmiştir. En düşük kalkopirit verimi %10 kil miktarı, 10 L/dk hava akış hızı, 2 cm köpük derinliği, 100 g/t dağıtıcı miktarı ve 100 g/t köpürtücü miktarı koşullarında %48,20 olarak elde edilirken, en yüksek kalkopirit verimi ise %15 kil miktarı, 12 L/dk hava akış hızı, 1 cm köpük derinliği, 300 g/t dağıtıcı miktarı ve 80 g/t köpürtücü miktarı koşullarında %77,29 olarak elde edilmiştir.

**Çizelge 4.35.** Flotasyonda kaolinin kalkopirit/pirit tenör-verimine, dinamik köpük kararlılığına ve ortalama kabarcık çapına etkisi

Deney No	Kalkopirit (%)	Kalkopirit Verim (%)	Pirit (%)	Pirit Verim (%)	Dinamik Köpük Kararlılığı (s)	Ortalama Kabarcık Çapı (mm)
1	28,13	48,20	69,46	11,52	6,00	0,53
2	35,04	64,96	64,68	11,61	5,30	0,60
3	43,52	61,63	54,82	7,52	4,75	0,56
4	34,13	63,16	58,86	10,55	4,50	0,57
5	39,44	52,75	53,36	6,91	5,75	0,83
6	36,86	58,97	63,00	9,76	3,34	0,65
7	40,58	56,57	56,97	7,69	4,80	0,62
8	38,83	64,85	60,97	9,86	4,80	0,67
9	36,51	67,02	61,14	10,87	4,50	0,61
10	36,83	61,96	42,52	6,93	3,75	0,60
11	39,11	67,01	47,73	7,92	4,42	0,60
12	39,33	55,56	57,39	7,85	5,13	0,69
13	32,02	51,37	67,43	10,47	4,40	0,59
14	30,74	72,11	49,24	11,19	4,25	0,63
15	40,89	65,42	58,85	9,12	5,20	0,64
16	40,85	71,78	45,30	7,71	5,17	0,61
17	42,23	60,92	57,33	8,01	4,00	0,63
18	40,30	62,23	59,45	8,89	4,60	0,61
19	38,38	66,26	57,04	9,54	3,67	0,61
20	43,58	59,66	51,93	6,88	3,92	0,61
21	38,55	62,42	56,00	8,78	4,20	0,61
22	39,69	73,17	59,85	10,68	5,00	0,64
23	37,44	63,34	52,01	8,52	5,00	0,65
24	41,99	73,69	55,60	9,45	4,80	0,63
25	31,92	65,42	52,01	10,32	4,75	0,67
26	37,68	77,29	53,89	10,70	4,25	0,65
27	43,82	52,73	51,17	5,96	4,88	0,69
28	41,22	61,51	57,34	8,29	4,09	0,62
29	36,91	63,75	62,46	10,45	6,13	0,63
30	38,40	70,29	51,27	9,09	4,38	0,66
31	40,17	64,99	55,64	8,72	4,17	0,65
32	33,98	53,95	65,92	10,13	4,90	0,64

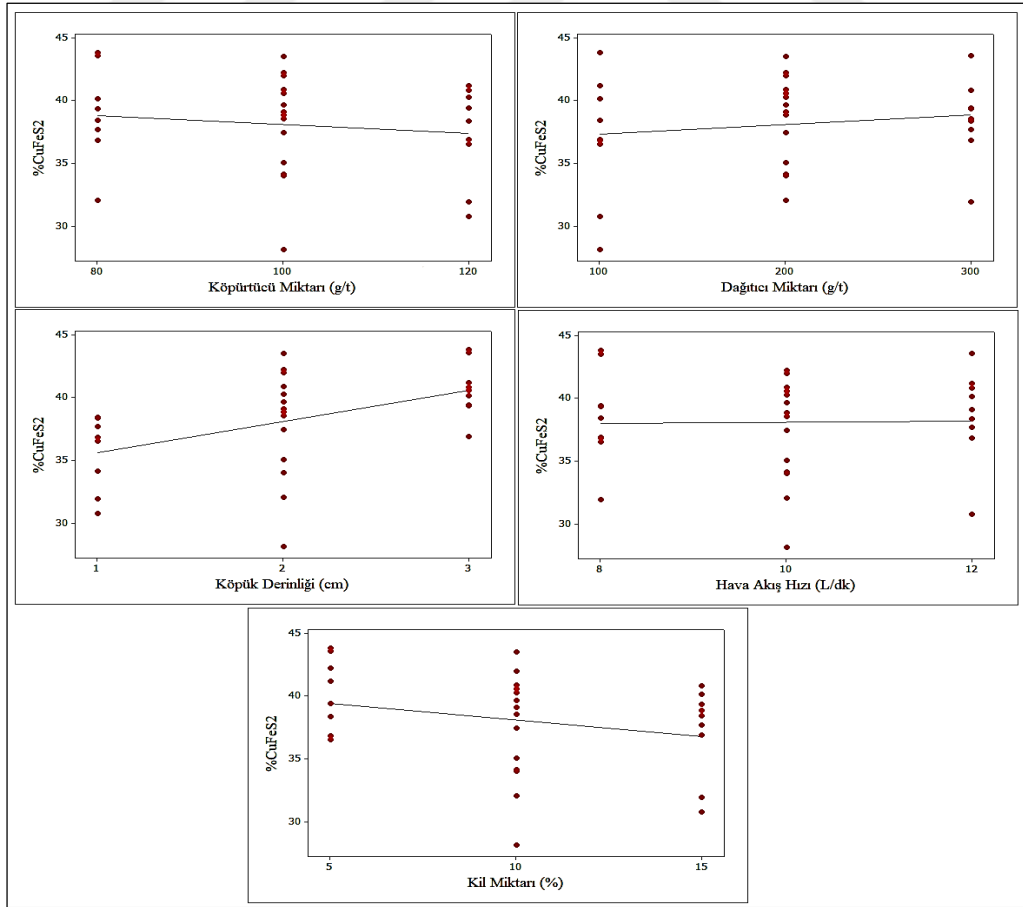
Çizelge 4.36’da kalkopirit tenörü için en önemli değişkenin köpük derinliği olduğu görülürken, bunların dışındaki diğer tüm değişkenler ise %95 güvenlik sınırı altında kalarak daha az etkili olmuştur. Elde edilen model denklemi Eşitlik 4.12’de verilmiştir. Kaolin miktarı ve diğer değişkenlerin kalkopirit tenörüne etkileri Şekil 4.46’da gösterilmiştir.

$$Y = 37,88 + 2,47C$$

(4.12)

Çizelge 4.36. Kaolin etkisinde %CuFeS<sub>2</sub> için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	287,39	14,37	34,37	0,97	2,65	0,55
A	1	8,59	8,59	-0,76	0,58	4,84	0,46
B	1	10,58	10,58	0,84	0,71		0,42
C	1	109,89	109,89	2,72	7,39		0,02
D	1	0,20	0,20	0,12	0,01		0,91
E	1	32,11	32,11	-1,47	2,16		0,17
A <sup>2</sup>	1	0,07	5,57	-0,61	0,37		0,55
B <sup>2</sup>	1	9,73	45,96	-1,76	3,09		0,11
C <sup>2</sup>	1	7,69	0,24	-0,13	0,02		0,90
D <sup>2</sup>	1	48,27	32,77	1,48	2,2		0,17
E <sup>2</sup>	1	20,23	20,23	1,17	1,36		0,27
AB	1	3,09	3,09	0,46	0,21		0,66
AC	1	0,88	0,88	0,24	0,06		0,81
AD	1	2,65	2,65	0,42	0,18		0,68
AE	1	5,79	5,79	-0,62	0,39		0,55
BC	1	0,09	0,09	-0,08	0,01		0,94
BD	1	24,09	24,09	1,27	1,62		0,23
BE	1	0,87	0,87	0,24	0,06		0,81
CD	1	2,50	2,50	0,41	0,17		0,69
CE	1	0,06	0,06	-0,06	0,00		0,95
DE	1	0,02	0,02	-0,04	0,00		0,97
Hata	11	163,60	14,87			R <sup>2</sup>	63,72
Toplam	31	450,99					



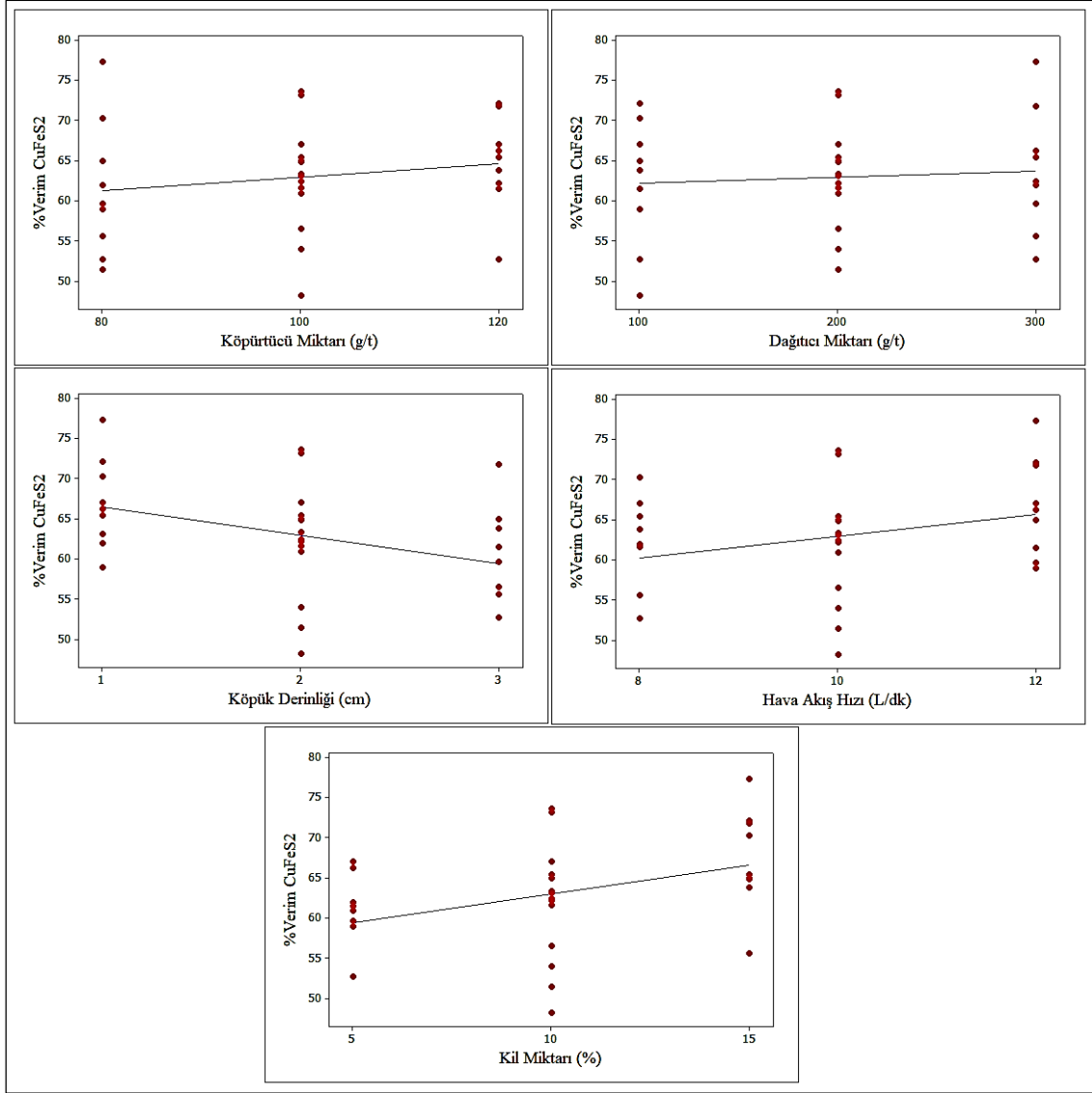
Şekil 4.46. Kaolin miktarı ve diğer değişkenlerin kalkopirit tenörüne etkileri

Kil miktarının ve köpürtücü miktarının artmasıyla kalkopirit tenörü azalmış ve köpük derinliği ile dağıtıcı miktarının artmasıyla kalkopirit tenörü artmıştır. Flotasyon işlemi sırasında, kil minerali düşük köpük derinliğinde suda kolaylıkla askıda kalırken, kabarcığı çevreleyen filme kaplanarak pülpten köpük fazına kolaylıkla taşınmakta ve böylece konsantr tenörünü düşürmektedir.

Çizelge 4.37’de kalkopirit verimi için tüm değişkenlerin önemsiz olduğu belirlenmiştir. Kaolin miktarı ve bazı değişkenlerin kalkopirit verimine etkileri Şekil 4.47’de gösterilmiştir. Köpürtücü miktarı, hava akış hızı, dağıtıcı miktarı ve kil miktarı arttıkça kalkopirit verimi artarken, derin köpükte verim düşmektedir.

**Çizelge 4.37.** Kaolin etkisinde % Verim  $\text{CuFeS}_2$  için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	$F_{\text{Teorik}}$	P
Regresyon	20	943,34	47,17	31,09	0,96	2,65	0,55
A	1	49,99	49,99	1,01	1,02	4,84	0,33
B	1	10,16	10,16	0,46	0,21		0,66
C	1	221,62	221,62	-2,13	4,52		0,06
D	1	130,48	130,48	1,63	2,66		0,13
E	1	229,64	229,64	2,16	4,68		0,05
$A^2$	1	0,64	18,90	-0,62	0,39		0,55
$B^2$	1	1,66	44,63	-0,95	0,91		0,36
$C^2$	1	20,91	0,21	0,07	0,00		0,95
$D^2$	1	78,96	55,49	1,06	1,13		0,31
$E^2$	1	27,02	27,02	0,74	0,55		0,47
AB	1	15,33	15,33	-0,56	0,31		0,59
AC	1	13,24	13,24	0,52	0,27		0,61
AD	1	0,35	0,35	0,08	0,01		0,93
AE	1	5,39	5,39	-0,33	0,11		0,75
BC	1	2,09	2,09	-0,21	0,04		0,84
BD	1	78,87	78,87	1,27	1,61		0,23
BE	1	0,14	0,14	-0,05	0,00		0,96
CD	1	33,69	33,69	0,83	0,69		0,43
CE	1	0,13	0,13	-0,05	0,00		0,96
DE	1	23,05	23,05	0,69	0,47		0,51
Hata	11	539,43	49,04			$R^2$	63,62
Toplam	31	1482,77					



Şekil 4.47. Kaolin miktarı ve diğer değişkenlerin kalkopirit verimine etkileri

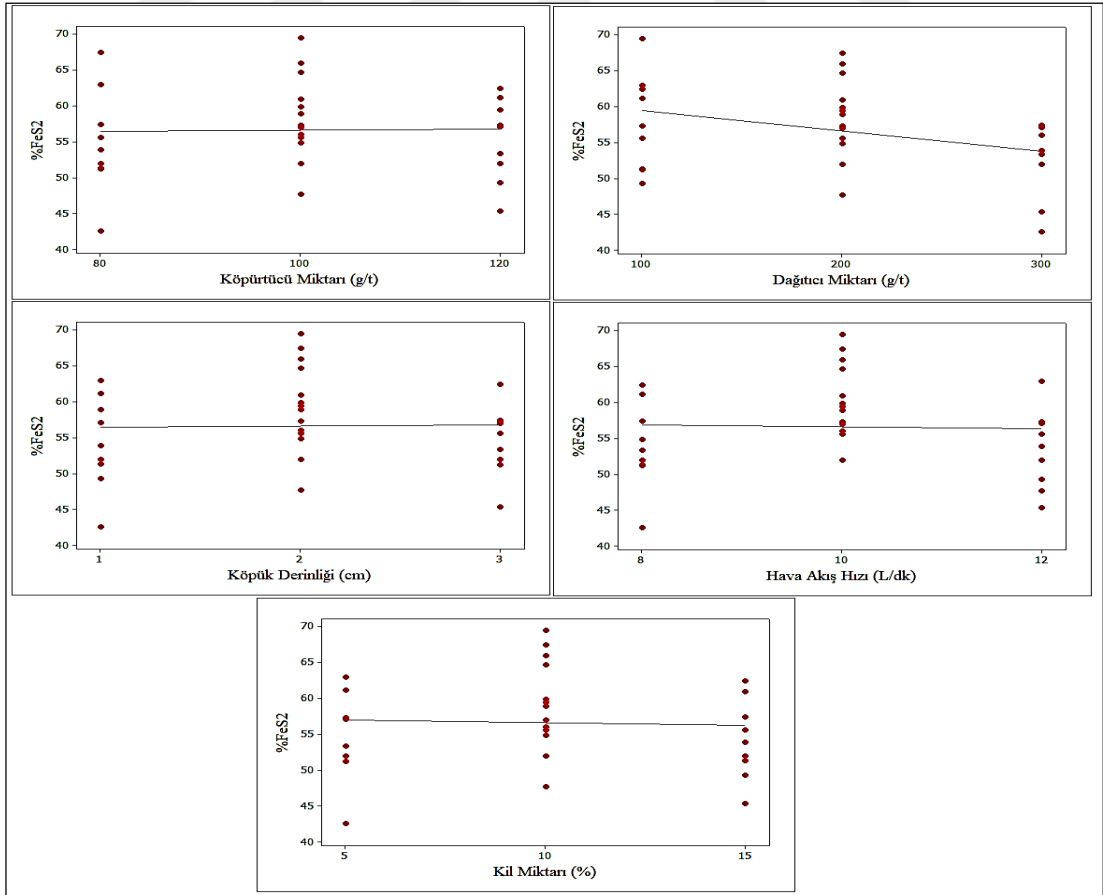
Çizelge 4.38’de pirit tenörünü etkileyen en önemli flotasyon değişkeni dağıtıcı miktardır. İkili etkileşimlerde ise köpürtücü miktarı-hava akış hızı değişkeni etkili olmuştur. Kaolin miktarı ve bazı değişkenlerin pirit tenörüne etkileri Şekil 4.48’de verilmiştir.

Etkisi istatistiksel olarak anlamsız ( $p>0,05$ ) çıkan diğer değişkenler modelden çıkartılmış ve Eşitlik 4.13’te elde edilen model denklemi verilmiştir. Etkisi anlamlı çıkan ikili etkileşimlere ait üç boyutlu yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde (Şekil 4.49), düşük hava akış hızında ve düşük köpürtücü miktarında tenörün azaldığı görülmektedir.

$$Y = 59,81 - 2,85B - 8,77D^2 - 2,64AD \quad (4.13)$$

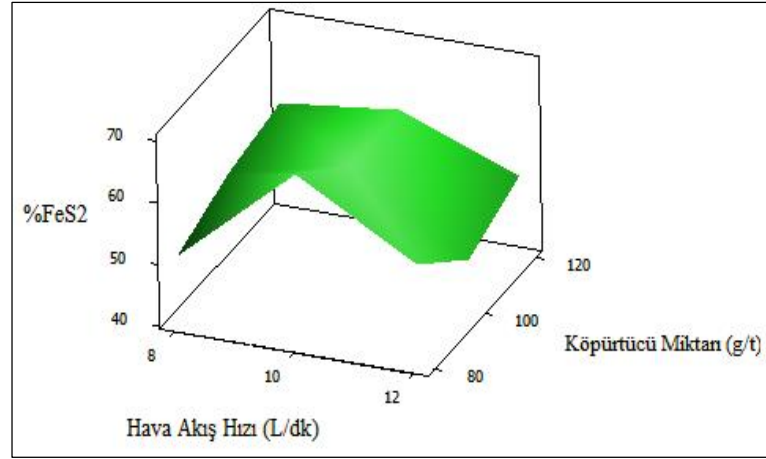
Çizelge 4.38. Kaolin etkisinde %FeS<sub>2</sub> için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	933,22	46,66	43,76	2,04	2,65	0,11
A	1	0,54	0,54	0,15	0,02	4,84	0,88
B	1	146,12	146,12	-2,53	6,39		0,03
C	1	0,38	0,38	0,13	0,02		0,90
D	1	1,41	1,41	-0,25	0,06		0,81
E	1	2,46	2,46	-0,33	0,11		0,75
A <sup>2</sup>	1	91,91	28,27	1,11	1,24		0,29
B <sup>2</sup>	1	19,47	17,71	0,88	0,77		0,40
C <sup>2</sup>	1	72,20	11,21	-0,70	0,49		0,50
D <sup>2</sup>	1	209,45	189,27	-2,88	8,28		0,02
E <sup>2</sup>	1	1,99	1,99	-0,30	0,09		0,77
AB	1	3,17	3,17	-0,37	0,14		0,72
AC	1	2,58	2,58	-0,34	0,11		0,74
AD	1	111,14	111,14	-2,21	4,86		0,05
AE	1	54,12	54,12	-1,54	2,37		0,15
BC	1	0,02	0,02	0,03	0,00		0,98
BD	1	0,85	0,85	0,19	0,04		0,85
BE	1	19,78	19,78	0,93	0,86		0,37
CD	1	57,83	57,83	-1,59	2,53		0,14
CE	1	36,86	36,86	1,27	1,61		0,23
DE	1	100,93	100,93	-2,10	4,41		0,06
Hata	11	251,57	22,87			R <sup>2</sup>	78,77
Toplam	31	1184,79					



Şekil 4.48. Kaolin miktarı ve diğer değişkenlerin pirit tenörüne etkileri





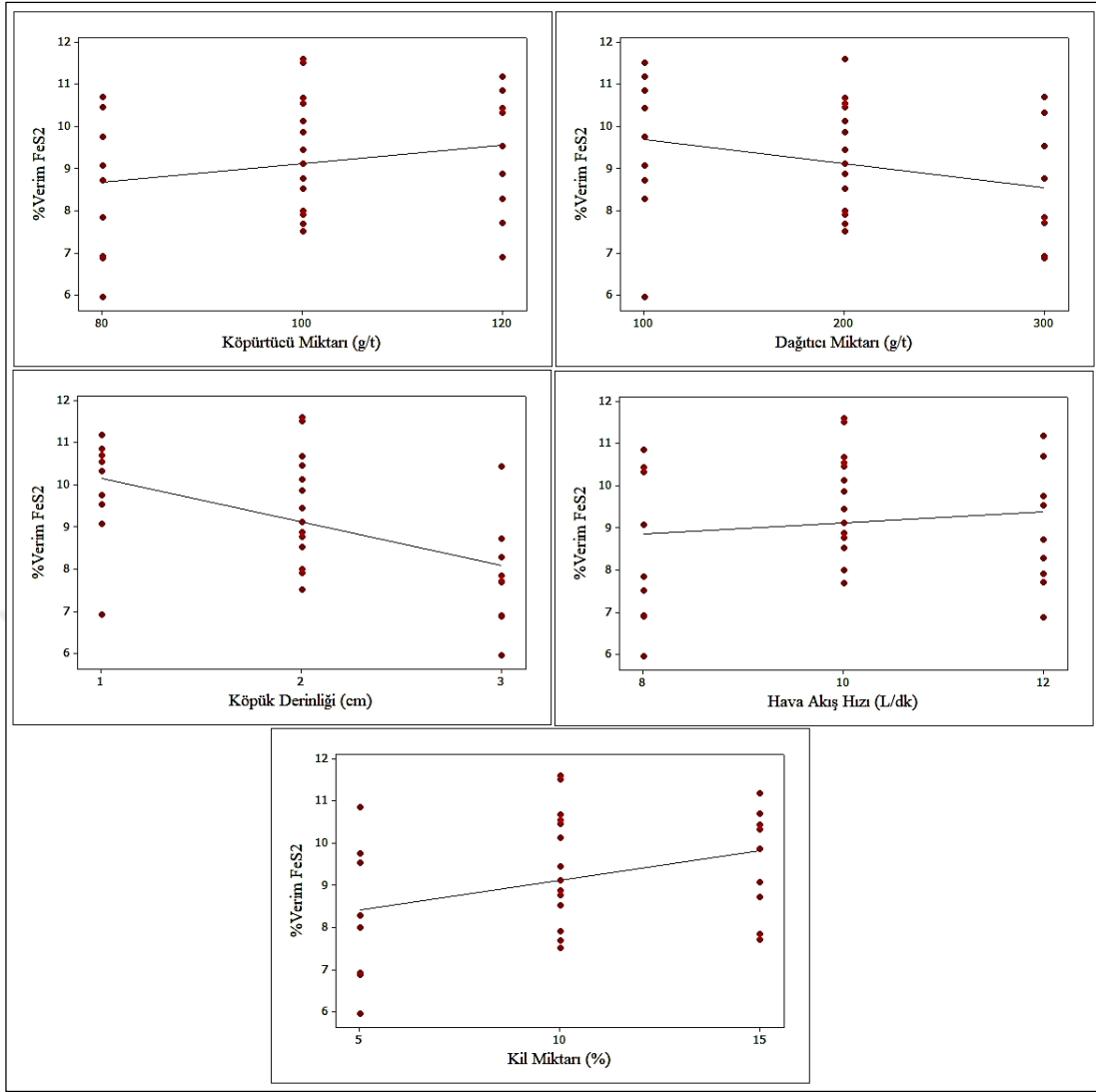
Şekil 4.49. Kaolin ilavesiyle hava akış hızı-köpürtücü miktarının pirit tenörüne etkisi

Çizelge 4.39’da pirit verimini etkileyen en önemli flotasyon değişkeni köpük derinliği ve kil miktarıdır. Eşitlik 4.14’te elde edilen model denklemi verilmiştir. Kaolin miktarı ve bazı değişkenlerin pirit verimine etkileri Şekil 4.50’de verilmiştir. Köpük derinliğinin ve dağıtıcı miktarının artmasıyla pirit verimi azalırken, kil miktarının, köpürtücü miktarının ve hava akış hızının artmasıyla pirit veriminde artış olmuştur.

$$Y = 9,55 - 1,03C + 0,71E - 1,55D^2 \quad (4.14)$$

Çizelge 4.39. Kaolin etkisinde % Verim FeS<sub>2</sub> için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	57,31	2,87	30,46	2,38	2,65	0,07
A	1	3,37	3,37	1,67	2,80	4,84	0,12
B	1	5,80	5,80	-2,20	4,82		0,05
C	1	18,98	18,98	-3,97	15,77		0,00
D	1	1,28	1,28	1,03	1,07		0,32
E	1	9,02	9,02	2,74	7,50		0,02
A <sup>2</sup>	1	1,70	0,41	0,58	0,34		0,57
B <sup>2</sup>	1	0,00	1,90	1,26	1,58		0,24
C <sup>2</sup>	1	1,49	0,06	-0,22	0,05		0,83
D <sup>2</sup>	1	6,92	5,95	-2,22	4,94		0,05
E <sup>2</sup>	1	0,28	0,28	-0,48	0,23		0,64
AB	1	1,65	1,65	-1,17	1,37		0,27
AC	1	0,14	0,14	-0,34	0,12		0,74
AD	1	4,07	4,07	-1,84	3,38		0,09
AE	1	0,48	0,48	-0,63	0,40		0,54
BC	1	0,03	0,03	-0,15	0,02		0,89
BD	1	0,10	0,10	0,28	0,08		0,78
BE	1	0,20	0,20	0,40	0,16	0,69	
CD	1	0,79	0,79	-0,81	0,66	0,44	
CE	1	0,38	0,38	0,56	0,32	0,59	
DE	1	0,64	0,64	-0,73	0,53	0,48	
Hata	11	13,24	1,20			R <sup>2</sup>	81,23
Toplam	31	70,55					



Şekil 4.50. Kaolin miktarı ve diğer değişkenlerin pirit verimine etkileri

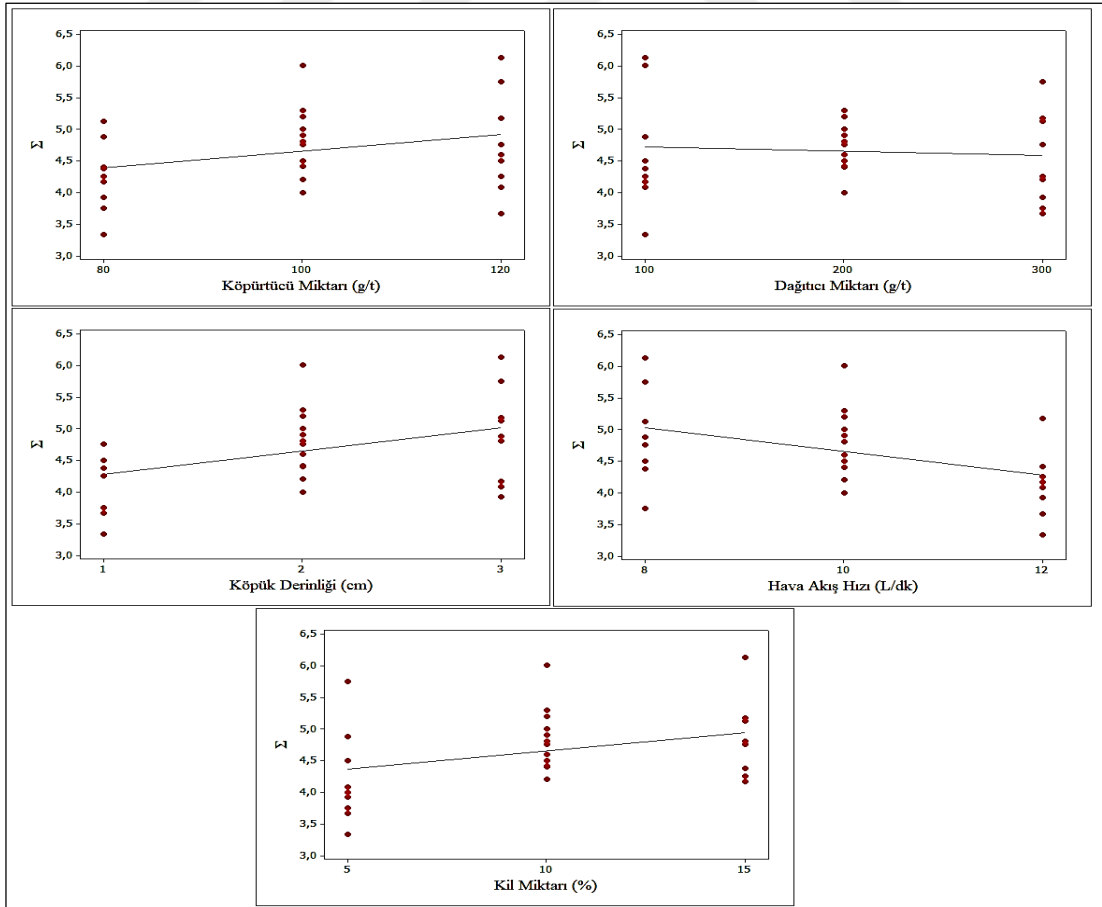
Çizelge 4.40'ta dinamik köpük kararlılığını etkileyen en önemli flotasyon değişkeni hava akış hızı, köpük derinliği, kil miktarı ve köpürtücü miktardır. Eşitlik 4.15'te elde edilen model denklemi verilmiştir.

$$Y = 4,86 + 0,26A + 0,37C - 0,38D + 0,29E \quad (4.15)$$

Kaolin miktarı ve bazı değişkenlerin dinamik köpük kararlılığına etkileri Şekil 4.51'de verilmiştir. Köpürtücü miktarı, köpük derinliği ve kil miktarının artmasıyla kararlılık artarken; hava akış hızı kararlılığı ters yönde etkilemiştir.

Çizelge 4.40. Kaolin etkisinde dinamik köpük kararlılığı için Varyans analizi

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	10,25	0,51	36,20	2,33	2,65	0,08
A	1	1,23	1,23	2,36	5,58	4,84	0,04
B	1	0,07	0,07	-0,57	0,33		0,58
C	1	2,45	2,45	3,33	11,11		0,01
D	1	2,53	2,53	-3,39	11,51		0,01
E	1	1,47	1,47	2,58	6,67		0,03
A <sup>2</sup>	1	0,85	0,12	-0,74	0,55		0,48
B <sup>2</sup>	1	0,09	0,36	1,27	1,62		0,23
C <sup>2</sup>	1	0,12	0,01	-0,23	0,05		0,82
D <sup>2</sup>	1	0,11	0,05	-0,45	0,21		0,66
E <sup>2</sup>	1	0,25	0,25	-1,07	1,14		0,31
AB	1	0,00	0,00	0,05	0,00		0,96
AC	1	0,16	0,16	0,84	0,71		0,42
AD	1	0,14	0,14	-0,80	0,64		0,44
AE	1	0,00	0,00	0,13	0,02		0,90
BC	1	0,04	0,04	0,40	0,16		0,70
BD	1	0,17	0,17	0,89	0,79		0,39
BE	1	0,00	0,00	0,04	0,00		0,97
CD	1	0,45	0,45	-1,42	2,02		0,18
CE	1	0,01	0,01	-0,23	0,05		0,83
DE	1	0,11	0,11	0,71	0,50		0,49
Hata	11	2,42	0,22			R <sup>2</sup>	80,88
Toplam	31	12,67					



Şekil 4.51. Kaolin miktarı ve diğer değişkenlerin dinamik köpük kararlılığına etkileri

Çizelge 4.41’de kabarcık çapını etkileyen en önemli flotasyon değişkeni ikili etkileşimlerde köpürtücü miktarı-dağıtıcı miktarı ve köpük derinliği-hava akış hızıdır. Eşitlik 4.16’da elde edilen model denklemi verilmiştir.

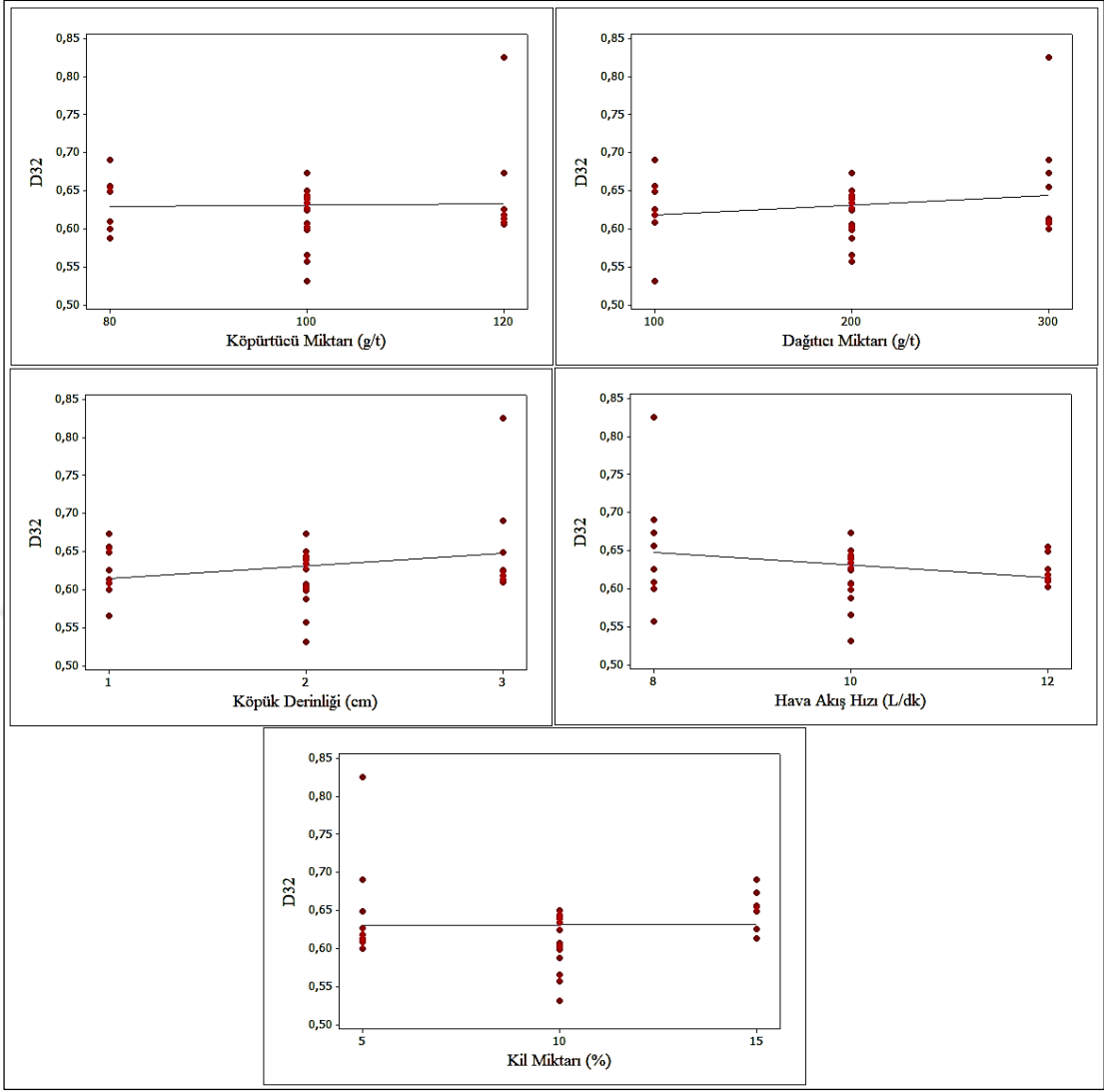
$$Y = 0,61 + 0,06E^2 + 0,02AB - 0,02CD \quad (4.16)$$

Çizelge 4.41. Kaolin etkisinde D<sub>32</sub> için Varyans analizi

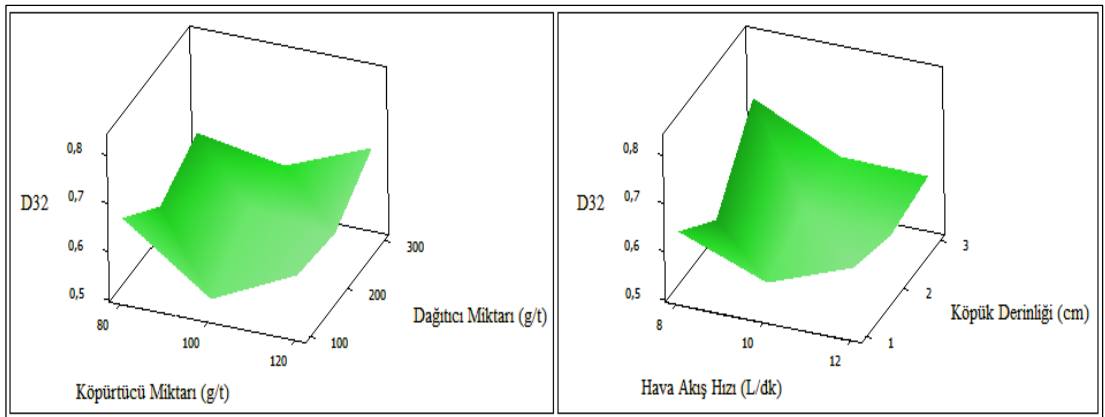
Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	T	F	F <sub>Teorik</sub>	P
Regresyon	20	0,06	0,00	56,74	2,22	2,65	0,09
A	1	0,00	0,00	0,15	0,02	4,84	0,89
B	1	0,00	0,00	1,46	2,12		0,17
C	1	0,01	0,01	1,89	3,56		0,09
D	1	0,01	0,01	-1,83	3,36		0,09
E	1	0,00	0,00	0,12	0,01		0,91
A <sup>2</sup>	1	0,01	0,00	0,26	0,07		0,80
B <sup>2</sup>	1	0,00	0,00	-0,88	0,78		0,40
C <sup>2</sup>	1	0,00	0,00	0,19	0,04		0,85
D <sup>2</sup>	1	0,00	0,00	-0,46	0,21		0,65
E <sup>2</sup>	1	0,01	0,01	2,49	6,19		0,03
AB	1	0,01	0,01	2,22	4,93		0,05
AC	1	0,00	0,00	0,55	0,30		0,59
AD	1	0,00	0,00	-1,25	1,55		0,24
AE	1	0,00	0,00	-1,52	2,30		0,16
BC	1	0,00	0,00	1,02	1,04		0,33
BD	1	0,00	0,00	-1,72	2,97		0,11
BE	1	0,00	0,00	-0,06	0,00		0,96
CD	1	0,01	0,01	-2,29	5,26		0,04
CE	1	0,01	0,01	-2,03	4,14		0,07
DE	1	0,00	0,00	0,87	0,75		0,40
Hata	11	0,02	0,00			R <sup>2</sup>	80,12
Toplam	31	0,08					

Kaolin miktarı ve bazı değişkenlerin kabarcık çapına etkileri Şekil 4.52’de verilmiştir. Köpük derinliği ve dağıtıcı miktarı artarken, kabarcık çapı artmıştır. Hava akış hızı, daha küçük kabarcığın oluşmasına neden olmuştur. İkili etkileşimlerin incelendiği Şekil 4.53’te ise yüksek köpük derinliği ve düşük hava hızlarında daha iri çaplı kabarcık elde edilmiştir.

Kaolinin etkisinin araştırıldığı deneylerde, bağımlı değişkenlere etki eden değişkenleri tek tek ele alacak olursak; köpürtücü miktarının dinamik köpük kararlılığına etkisinin olduğu, dağıtıcı miktarının pirit tenörüne etkisi olduğu belirlenmiştir. Köpük derinliğinin kalkopirit tenörü, pirit verimine ve dinamik köpük kararlılığına etkisinin olduğu saptanmıştır. Hava akış hızının dinamik köpük kararlılığına etkisinin olduğu, son olarak kil miktarının pirit verimine ve dinamik köpük kararlılığına etkisi olmuştur.



Şekil 4.52. Kaolin miktarı ve diğer değişkenlerin kabarcık çapına etkileri



Şekil 4.53. Kaolin ilavesiyle ikili etkileşimlerin kabarcık çapına etkisi

#### 4.3.2.1.4. Kil minerallerinin flotasyona etkilerinin genel değerlendirilmesi

Kil minerallerinin bağımlı değişkenler üzerindeki etkileri Çizelge 4.42’de özetlenmiştir. Değişkenlerin etkileri önem sırasına göre dizilmiş ve ok yönleriyle değişkenler üzerinde artma-azalma etkisi belirtilmiştir. Kil minerallerinin tekli olarak bağımlı değişkenler üzerindeki etkilerini gösteren grafikler Şekil 4.54-56’da verilmiştir. 32 deney sonunda montmorillonit ilavesiyle ortalama %26,83 civarında kalkopirit tenörlü konsantre elde edilirken, kaolin ile ortalama %38,10 ve illit ile ortalama %38,22 kalkopirit tenörlü konsantre elde edilmiştir. Kalkopirit tenörü açısından olumsuz etki önem sırası montmorillonit>kaolin>illit olarak belirlenmiştir.

Montmorillonit ilavesiyle ortalama %56,88 civarında kalkopirit verimli konsantre elde edilirken, kaolin ile ortalama %62,97 ve illit ile ortalama %64,05 kalkopirit verimli konsantre elde edilmiştir. Kalkopirit verimi açısından olumsuz etki önem sırası montmorillonit>kaolin>illit olarak belirlenmiştir. Hem kalkopirit tenörü hem de kalkopirit verimi açısından en olumsuz etkiyi montmorillonit vermiştir.

Çizelge 4.42’de bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerinde genel etkisi incelendiğinde, kil miktarının çalışılan tüm killer için kalkopirit veriminde artışa sebep olurken, kalkopirit tenöründe düşüşe sebep olduğu görülmektedir. Kil ağırlıkça arttıkça konsantreye gelen malzeme miktarının arttığı saptanmış ve bunun nedeni killerin çok ince tane boyunda (yaklaşık  $D_{80}$  40  $\mu\text{m}$ ’nin altında) olmasından dolayı köpüğe mekanik taşınmasıdır. Kil minerallerinin kalkopirit flotasyonundaki etkin mekanizma şlam kaplama olsaydı; toplayıcı adsorpsiyonunu azaltarak, kalkopirit yüzeylerini kaplayarak verimi olumsuz olarak etkilemesi gerekirdi. Fakat tüm kil minerallerinin kalkopirit flotasyonunda mekanik taşınmanın etkisi daha fazla olmuş ve kalkopirit verimi artarken, tenör düşmüştür. Mekanik taşımada hidrofobik ve hidrofilik mineraller arasında seçicilik söz konusu olmadığından, kil mineralleri konsantreye taşınmaktadır, böylece gang minerali ve değerli mineral verimini artırırken değerli mineralin tenörünün düşmesine sebep olmaktadır. Bu durumda mekanik taşınmanın etkisinin şlam kaplamadan daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.42. Kil minerallerinin flotasyonda etkilediği değişkenlerin listesi

KİLLER	MONTMORİLLONİT		İLLİT		KAOLİN	
	Tekli Etkili	İkili Etkileşim	Tekli Etkili	İkili Etkileşim	Tekli Etkili	İkili Etkileşim
Bağımlı Değişkenler						
%CuFeS <sub>2</sub>	1. Köpük derinliği ↑ 2. Kil miktarı ↓ 3. Köpürtücü miktarı ↑	1. Köpürtücü miktar-Dağıtıcı miktarı ↑	1. Köpük derinliği ↑ 2. Köpürtücü miktar ↓ 3. Kil miktarı ↓ 4. Dağıtıcı miktarı ↑	1. Köpürtücü miktarı-Dağıtıcı miktarı ↑ 2. Dağıtıcı miktar-Hava akış hızı ↓ 3. Köpürtücü miktarı-Kil miktarı ↑ 4. Dağıtıcı miktar-Köpük derinliği ↓	1. Köpük derinliği ↑	-
% Verim CuFeS <sub>2</sub>	1. Kil miktarı ↑	1. Hava akış hızı-Kil miktarı ↓ 2. Dağıtıcı miktar-Köpük derinliği ↑	1. Kil miktarı ↑ 2. Hava akış hızı ↑ 3. Dağıtıcı miktar ↑ 4. Köpük derinliği ↑	1. Hava akış hızı- Kil miktarı ↓ 2. Dağıtıcı miktar-Köpük derinliği ↓ 3. Köpürtücü miktar-Kil miktarı ↑ 4. Köpürtücü miktar-Köpük derinliği ↑ 5. Köpük derinliği-Kil miktarı ↑ 6. Dağıtıcı miktar-Kil miktarı ↓ 7. Köpürtücü miktar-Dağıtıcı miktarı ↑	-	-
%FeS <sub>2</sub>	1. Köpük derinliği ↓ 2. Kil miktarı ↑ 3. Köpürtücü miktarı ↓	1. Köpürtücü miktar-Dağıtıcı miktarı ↓	-	1. Köpük derinliği-Kil miktarı ↑	1. Dağıtıcı miktar ↓	1. Köpürtücü miktar-Hava akış hızı ↓
% Verim FeS <sub>2</sub>	1. Köpük derinliği ↓ 2. Kil miktarı ↑	1. Köpürtücü miktar-Dağıtıcı miktarı ↓	1. Kil miktarı ↑ 2. Köpük derinliği ↓ 3. Köpürtücü miktarı ↑	1. Köpürtücü miktar-Dağıtıcı miktarı ↓	1. Köpük derinliği ↓ 2. Kil miktarı ↑	-
Σ	1. Hava akış hızı ↓ 2. Köpürtücü miktarı ↑ 3. Köpük derinliği ↑	1. Hava akış hızı-Kil miktarı ↓	1. Köpük derinliği ↑ 2. Hava akış hızı ↓ 3. Kil miktarı ↑ 4. Köpürtücü miktarı ↑	1. Köpük derinliği-Hava akış hızı ↓ 2. Köpürtücü miktar-Hava akış hızı ↓ 3. Köpürtücü miktar ↑	1. Hava akış hızı ↓ 2. Köpük derinliği ↑ 3. Kil miktarı ↑ 4. Köpürtücü miktarı ↑	-
D <sub>32</sub>	-	-	1. Hava akış hızı ↓ 2. Kil miktarı ↑ 3. Köpük derinliği ↑	1. Köpük derinliği-Kil miktarı ↓	-	1. Köpük derinliği-Hava akış hızı ↓ 2. Köpürtücü miktar-Dağıtıcı miktar ↑

Kalkopirit flotasyonunda piritin bastırılması ve en düşük seviyede pirit tenör-verimli kalkopirit konsantresi elde edilmesi planlanmaktadır. Flotasyon deneylerinde konsantre %67,85 pirit tenörü ve %14,52 pirit verimine sahiptir. 32 deney sonunda montmorillonit miktarı arttıkça pirit tenörü artmış ve ortalama %73,01'e kadar çıkmıştır. Kaolin ve illit miktarı arttıkça ise konsantre ortalama %58 pirit tenörü içermekte ve pirit tenöründe artış gözlenmezken, flotasyon deneylerinden daha düşük tenörlü pirit elde edilmiştir. Konsantredeki pirit tenörü açısından olumsuz etki önem sırası montmorillonit>illit>kaolin olarak belirlenmiştir.

Pirit veriminde ise tüm kil miktarlarının artmasıyla beraber pirit verimi artmıştır. 32 deney sonucunda; montmorillonit ilavesiyle ortalama %15,86, kaolin ile ortalama %9,12 ve illit ile ortalama %9,55 pirit verimli konsantre elde edilmiştir. Pirit verimi açısından olumsuz etki önem sırası montmorillonit>illit>kaolin olarak belirlenmiştir.

Dinamik köpük kararlılığı açısından, tüm kil minerallerinin ilavesiyle kil miktarı arttıkça kararlılık artmıştır. Ayrıca köpürtücü miktarı ve köpük derinliği arttıkça dinamik köpük kararlılığı artarken, hava akış hızı dinamik köpük kararlılığını azaltmıştır (Çizelge 4.42). Ortalama dinamik köpük kararlılığı montmorillonit ile 4,40 s, illit ile 4,25 s ve kaolin ile 4,65 s elde edilmiştir. Dinamik köpük kararlılığının etki önem sırası kaolin>montmorillonit>illit şeklinde olmuştur. Dinamik köpük kararlılığı hava akış hızının artmasıyla, literatürde olduğu gibi (Çilek ve Uysal, 2018) azalmıştır.

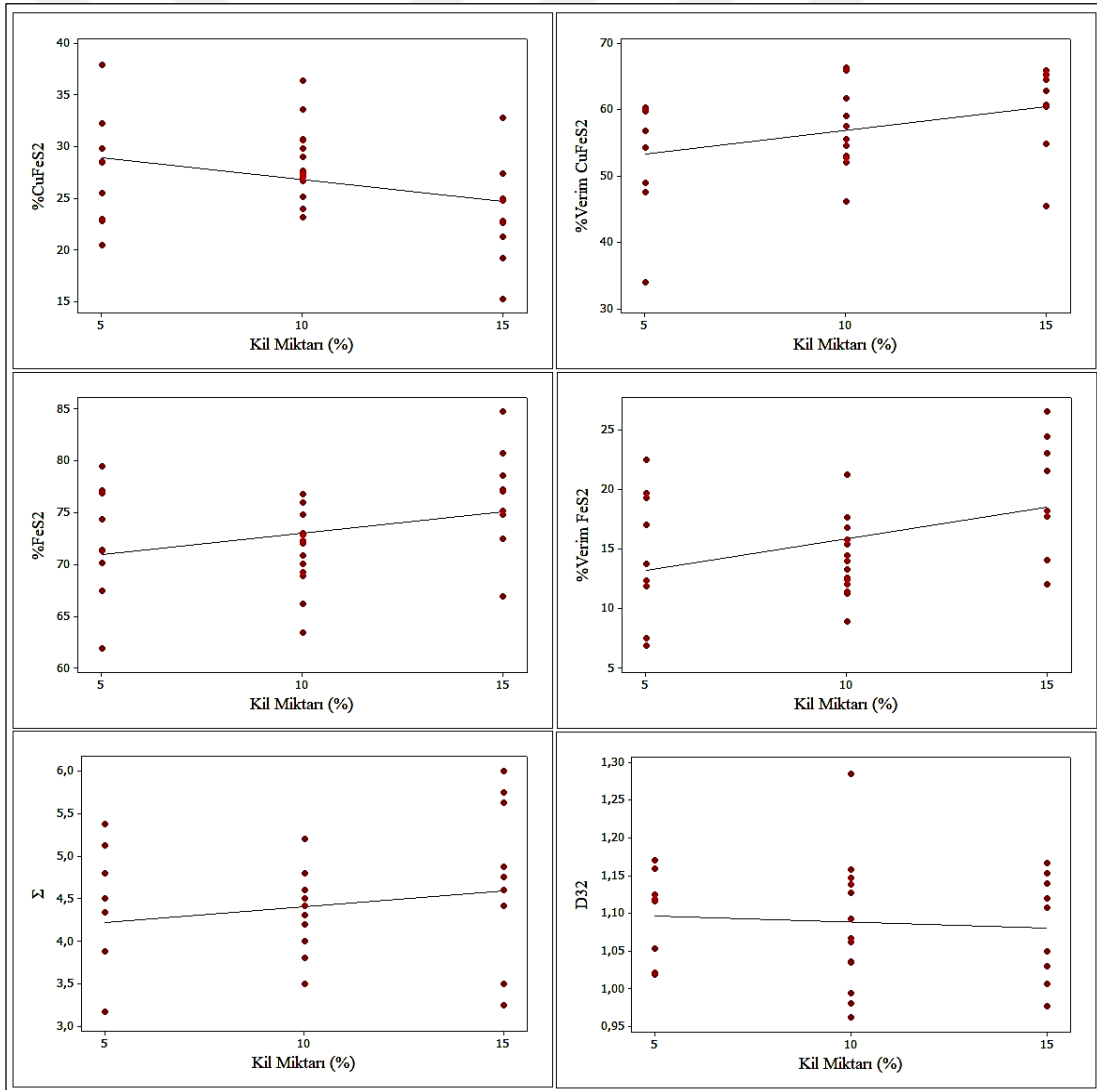
Dinamik köpük kararlılığı köpük derinliğiyle ve oluşan köpük miktarıyla alakalıdır. Daha derin köpük ile uygun dinamik köpük kararlılığı seviyesi elde edilerek, flotasyonda temiz konsantre elde edilebilir. Bu nedenle, yüksek flotasyon performansı elde etmek için uygun dinamik köpük kararlılığının gerekli olduğu kabul edilmektedir (Farrokhpay, 2011; Çilek ve Uysal, 2018). Deney sonuçlarında tüm kil minerallerinin etkisinde köpük derinliği arttıkça kalkopirit tenörü artarken, ayrıca dinamik köpük kararlılığı da artmıştır.

En büyük kabarcık çapı montmorillonit ile elde edilirken, montmorilloniti sırasıyla kaolin ve illit takip etmektedir. Küçük kabarcık daha kararlı köpük oluşturma eğilimindedir. Bu nedenle, köpük fazının kabarcık büyüklüğü dağılımı, flotasyon sistemi için önemli bir performans ölçütüdür (Kurniawan ve ark., 2011). Viskozite arttığında daha büyük kabarcık, azaldığında ise daha küçük kabarcık meydana gelmektedir.

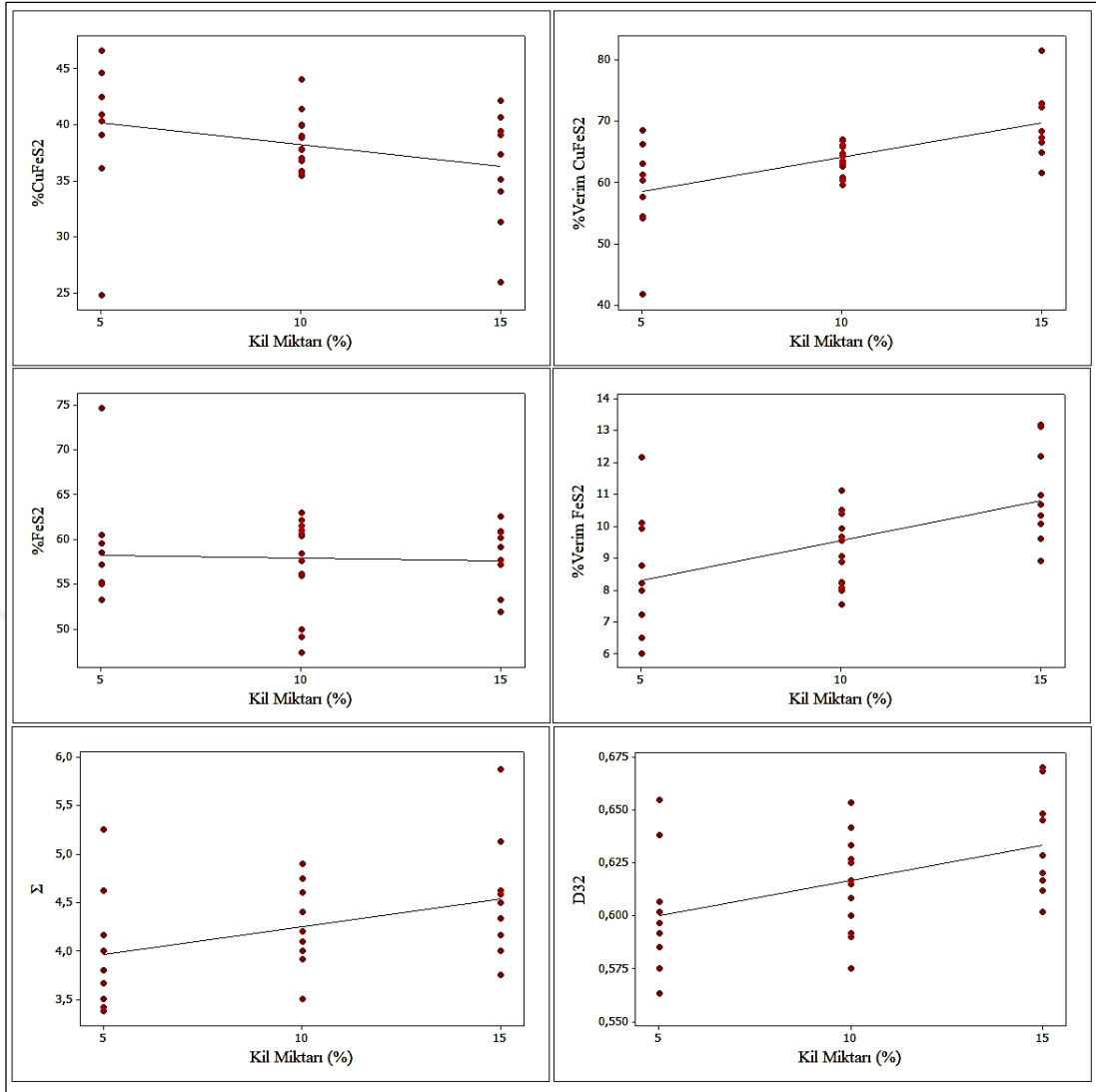


Şekil 4.57’de bağımlı değişkenlerin birbirleri arasında değerlendirildiği grafikler verilmiştir. Kabarcık boyutunun artmasıyla, kalkopirit veriminin azaldığı ve tenörün arttığı gözlenmiştir. Kabarcık boyutunun artması daha az miktarda suyun konsantreye taşınmasını sağlamıştır. Dinamik köpük kararlılığı arttıkça illit ve montmorillonit için kalkopirit tenör ve verimi artarken, kaolin için kalkopirit tenör ve verimi azalmıştır.

Kalkopirit flotasyonunda genel olarak en belirgin etki montmorillonitte görülmüştür. Bu durumun montmorillonitin üç tabakalı yapıya sahip olması ve montmorillonit miktarı arttıkça viskozitenin artmasından kaynaklandığı varsayılmıştır. Deneilerin tümünde sabit bir karıştırma hızı kullanılmıştır. Viskozite artınca kabarcıklar hücrede havayı homojen bir şekilde dağıtamamış, bu da kabarcık ve hidrofobik minerallerin çarpışma olasılığını düşürmüştür.



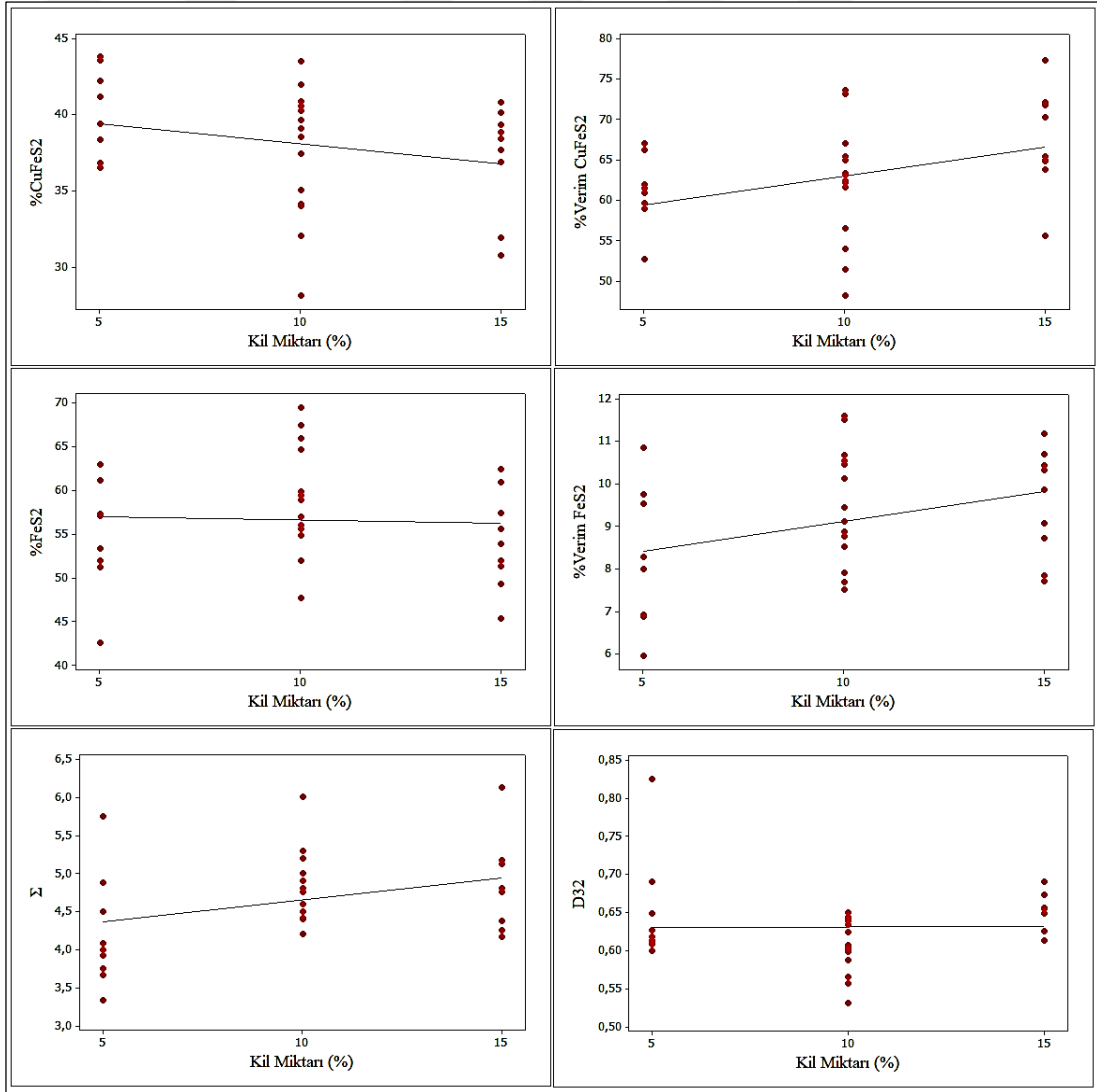
Şekil 4.54. Montmorillonit miktarının kalkopirit tenör/verimi, pirit tenör/verimi,  $\Sigma$  ve  $D_{32}$ 'ye etkisi



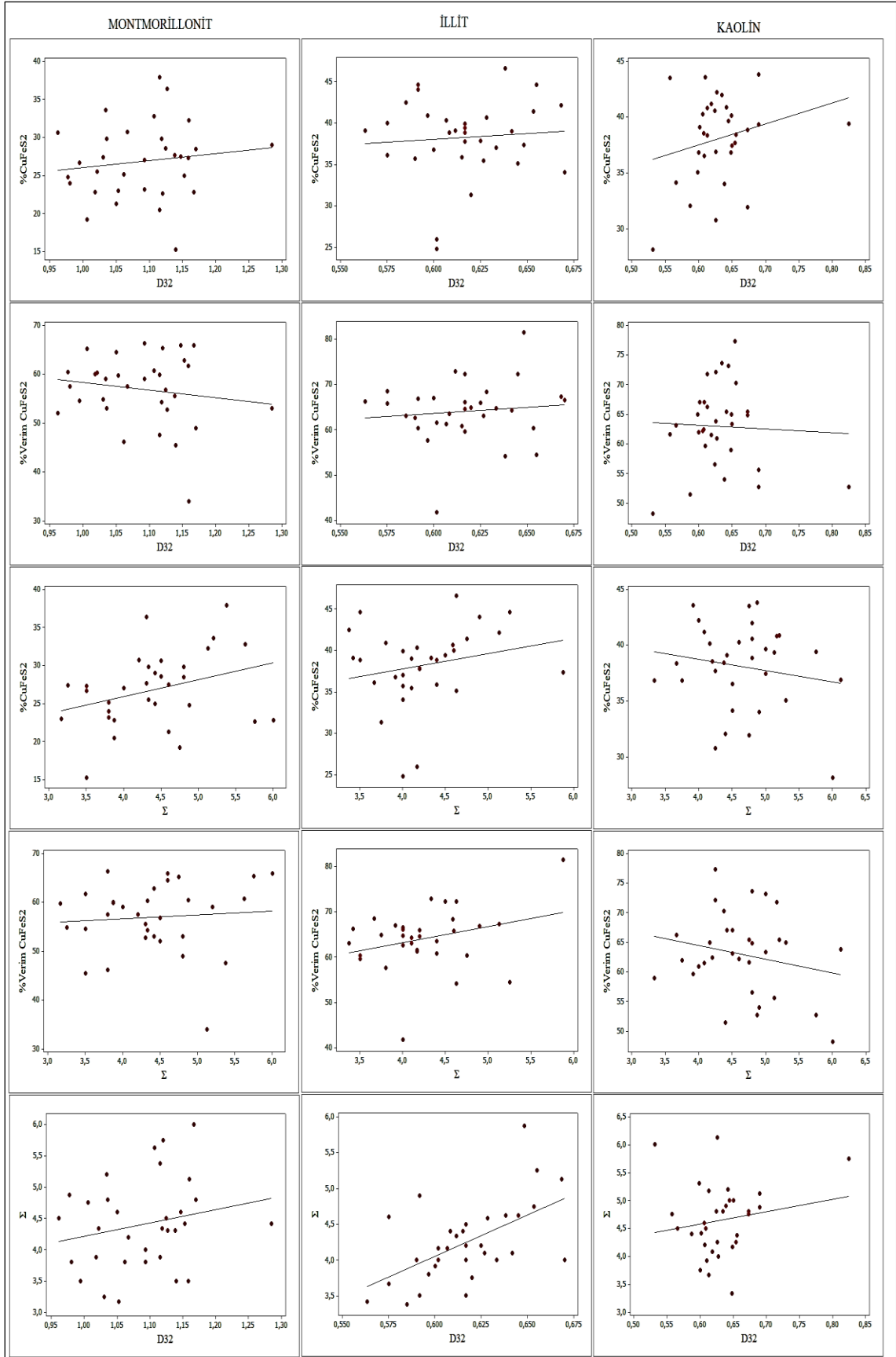
Şekil 4.55. İllit miktarının kalkopirit tenör/verimi, pirit tenör/verimi,  $\Sigma$  ve  $D_{32}$ 'ye etkisi

Kaolin genel anlamda mekanik taşınmaya neden olurken, montmorillonit düşük miktarda bile pülp viskozitesini artırma kabiliyeti nedeniyle flotasyondaki en problemlili kil minerallerindendir. İllit ise üç çeşit kil minerali arasında flotasyon üzerinde en az olumsuz etkiye sahip kil minerali olmuştur. Benzer sonuçlar Chen ve Peng (2018)'in yapmış olduğu çalışmada da elde edilmiştir. Kırık düzlemlerinin tamamen hidrofilik olması ve kalıcı negatif yüklü olması nedeniyle illit, üç alüminasilikat minerali arasında en az konsantreye taşınan kil mineralidir, bu da flotasyon sonuçları ile doğrulanmaktadır (Guan ve ark., 2009).

Kaolinin mineralojik yapısında tabakalar arasındaki kuvvetli hidrojen bağları suyun tabakalar arasına girip şişme oluşturmasını engellemektedir. İllit minerallerinde de tabakalar arasında giren potasyum iyonları bağın bir miktar kuvvet kazanmasına neden olup, su moleküllerinin tabakalar arasına girmesine engel olmaktadır. Montmorillonit minerallerinde ise tabakalar arasındaki bağ çok zayıf olduğundan suyun tabakalar arasına girmesi, tabakaların birbirinden ayrılmasına dolayısıyla hacim değişimine sebebiyet vermektedir. Dolayısıyla suya olan eğilimleri diğer kil minerallerine oranla çok yüksektir. Montmorillonitin yüksek pülp viskozitesinden dolayı kalkopirit veriminin düşmesine ek olarak, köpük miktarının azalması da viskoziteye etkisinden kaynaklanmaktadır. Montmorillonit tanelerinin kalkopirit yüzeyini kaplaması ve ardından toplayıcıların kalkopirit yüzeyi ile adsorpsiyonunu engellemesine sebep olmaktadır.

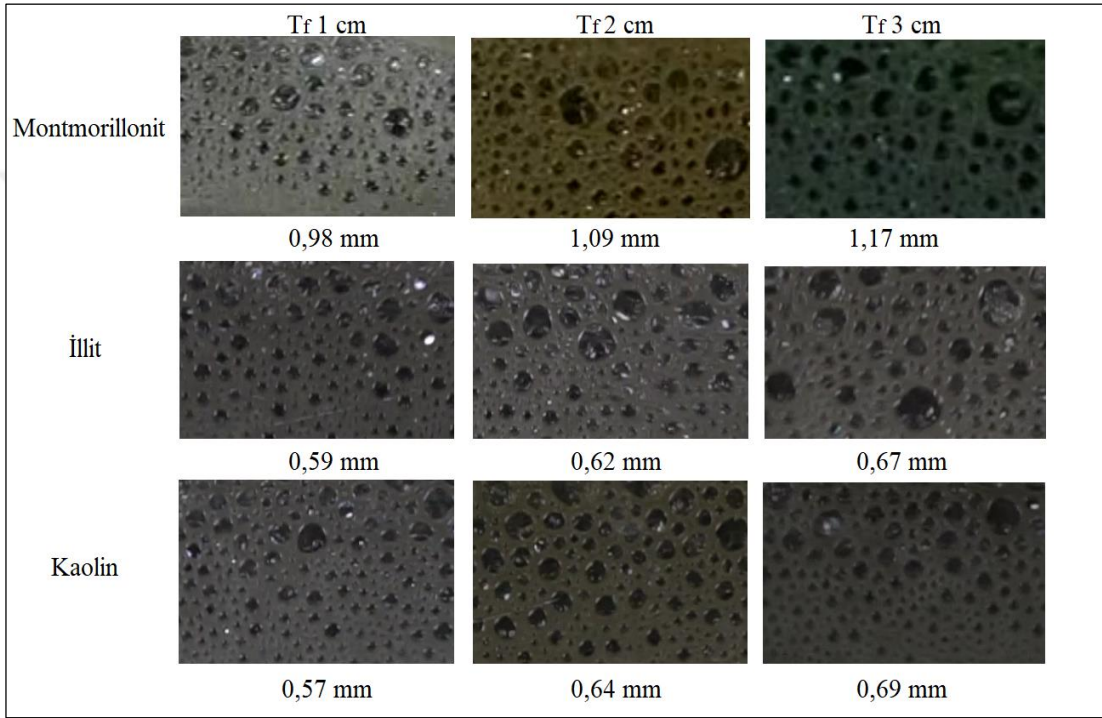


Şekil 4.56. Kaolin miktarının kalkopirit tenör/verimi, pirit tenör/verimi,  $\Sigma$  ve  $D_{32}$ 'ye etkisi



Şekil 4.57. Bağımlı değişkenlerin karşılıklı etkileşimleri

Kil minerallerinin kabarcık çapına etkisinde 32 deney sonunda; montmorillonit ile 0,96-1,29 mm çapında ortalama 1,09 mm kabarcık, illit ile 0,56-0,67 mm çapında ortalama 0,62 mm kabarcık ve kaolin ile 0,53-0,87 mm çapında ortalama 0,63 mm kabarcık elde edilmiştir (Şekil 4.58). 2 ve 3 cm köpük derinliğinde üretilen kabarcıkların büyüklüğü 1 cm köpük derinliğindekinden daha büyüktür. Hava akış hızı arttıkça, tüm kil minerallerinin varlığında kabarcık çapı azalmıştır. Kabarcıkların boyutları büyüdükçe pülp içindeki yükselme hızları artmakta ve hareketleri düzensizleşip kararsızlaşmaktadır.



Şekil 4.58. Kil minerallerinin köpük derinliğine bağlı kabarcık çapları

Genel olarak, köpürtücü miktarı arttıkça kalkopirit tenörü montmorillonit ilavesiyle artarken, illit ve kaolin ilavesiyle düşmektedir. Yüksek köpürtücü miktarlarında hızlı taşan bir köpük oluşmakta ve buna bağlı olarak gang minerallerinin su ile konsantreye taşınması gerçekleşmektedir. Düşük köpürtücü miktarında ise daha kırılğan bir köpük yapısı elde edilmektedir.

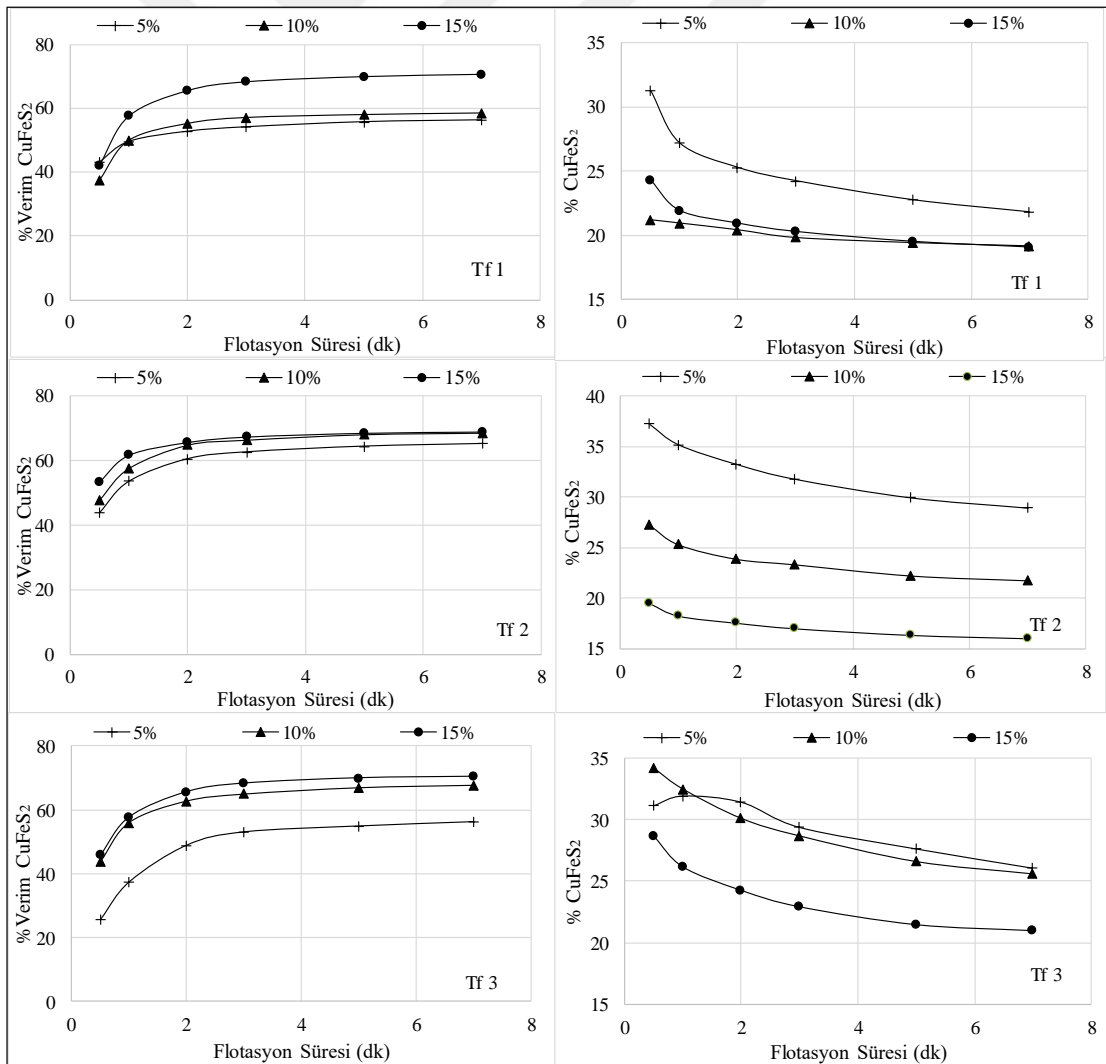
Kabarcık-tane çarpışma etkinliği ve flotasyon veriminin kabarcık büyüklüğünün azalması ile arttığı belirlenmiştir (Şekil 4.57). Bağlı parçacıkları taşıyan küçük kabarcıklar; düşük yükselme hızına ve düşük flotasyon hızına neden olmaktadır. Bu da flotasyonda kabarcığın hücrede kalış süresinin önemini vurgulamaktadır. Montmorillonit ilavesiyle en iri kabarcık çapı elde edilmiş ve bu sonuçlar deneylerle doğrulanmıştır.

#### 4.3.2.2. Flotasyon kinetiği deneyleri

Kil minerallerinin flotasyon kinetiğine etkisi birinci derece flotasyon kinetik modeli (Eşitlik 3.2) ve ayırma etkinliği (SE, Eşitlik 3.3) kullanılarak değerlendirilmiştir. Deneysel değişkenler olarak köpük derinliği ve kil miktarının etkisi araştırılmış ve deneyler flotasyon deneylerinde belirlenen şartlarda yapılmıştır.

##### 4.3.2.2.1. Flotasyon kinetiği deneylerinde montmorillonitin etkisi

Şekil 4.59’da farklı köpük yüksekliklerinde, değişen oranda montmorillonit ilavesi ile elde edilen yapay karışımlarla gerçekleştirilen deneylerde, flotasyon süresine bağlı flotasyon kinetik sonuçları verilmiştir. Kil miktarının artmasıyla birlikte flotasyon verimi artmıştır. Ayırma etkinliğini (SE) maksimum yapan süre optimum flotasyon süresi olarak ve en uygun flotasyon süresi tüm deneyler için 3 dk olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.59. Farklı köpük derinliği ve montmorillonit ilavesinde elde edilen flotasyon kinetiği sonuçları

Flotasyon kinetiği parametreleri ve deney sonuçları Çizelge 4.43'te verilmiştir. Flotasyon hız sabiti kil miktarı arttıkça genel itibariyle artarken, maksimum değerli mineral verimi artma eğilimindedir. Kalkopirit verimi aynı şekilde artarken, kalkopirit tenörü önemli şekilde düşmüştür. Ayırma etkinliğinde ise anlamlı bir ilişki belirlenememiştir.

**Çizelge 4.43.** Montmorillonit etkisinde flotasyon kinetiği parametreleri ve kalkopirit tenör-verim sonuçları

Değişkenler	Tf (cm)	1			2			3		
	Kil Miktarı (%)	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Sonuçlar	SE (%)	40,35	38,19	46,39	51,49	48,43	40,28	42,50	51,78	49,43
	$t_{opt}$ (dk)	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	R <sup>2</sup>	89,61	98,98	98,84	94,67	95,19	92,91	99,48	96,99	96,58
	R $\infty$	54,60	57,52	69,29	63,10	66,89	67,23	55,06	65,97	68,79
	k (dk <sup>-1</sup> )	2,95	2,06	1,82	2,19	2,30	3,02	1,17	2,05	2,06
	%CuFeS <sub>2</sub>	24,28	19,87	20,34	31,76	23,30	17,00	29,35	28,67	22,89
	%CuFeS <sub>2</sub> Verim	54,26	57,11	68,41	62,54	66,39	67,26	52,98	65,09	68,35

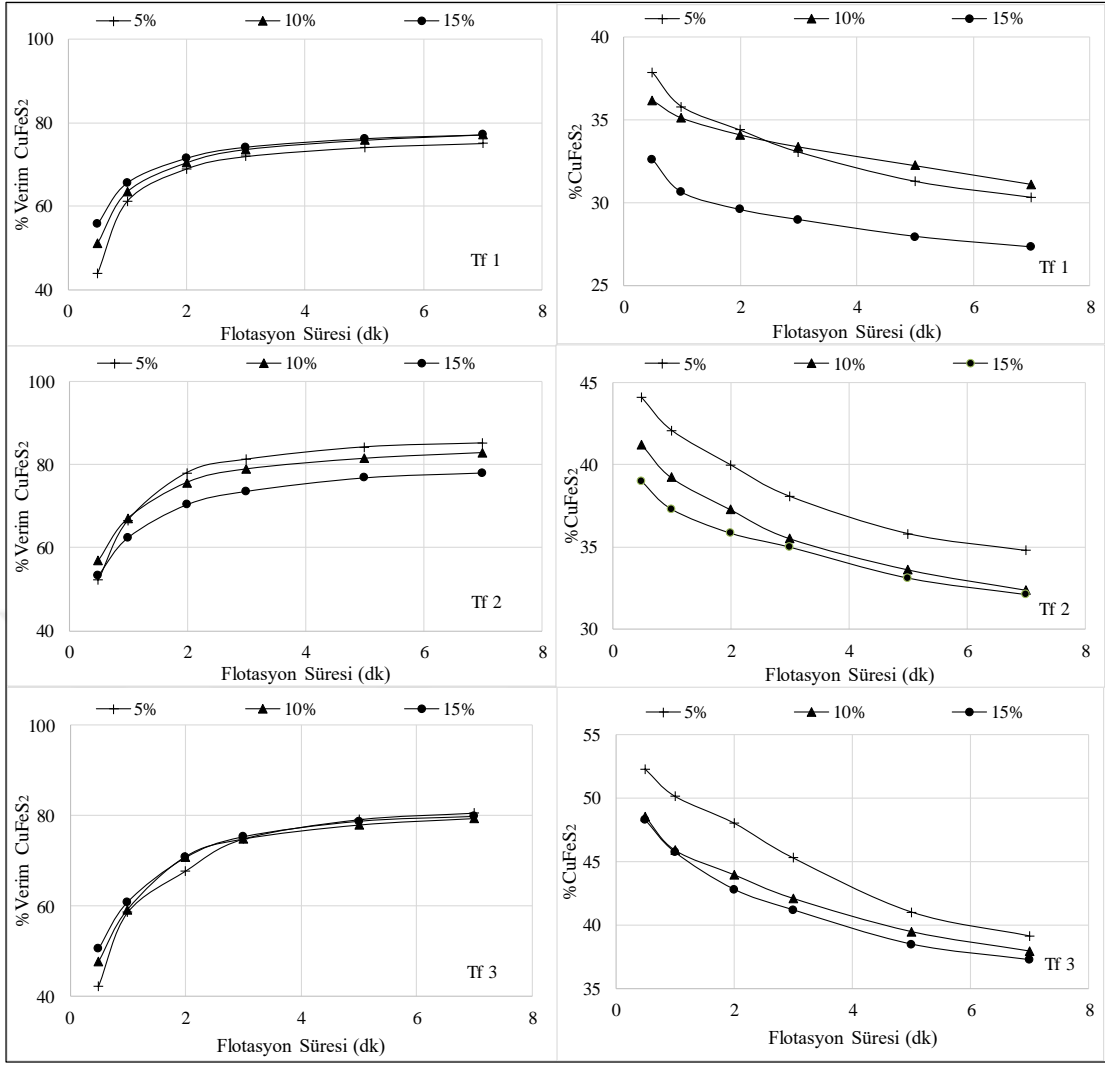
#### 4.3.2.2.2. Flotasyon kinetiği deneylerinde illitin etkisi

Şekil 4.60'da flotasyon süresine bağlı, illit ilavesiyle elde edilen flotasyon kinetiği sonuçları verilmiştir. Kil miktarının artmasıyla birlikte flotasyon veriminde köpük derinliklerinde dalgalanmalar olmuştur. Ayırma etkinliğini (SE) maksimum yapan süre optimum flotasyon süresi olarak ve en uygun flotasyon süresi tüm deneyler için 3 dk olarak belirlenmiştir.

Flotasyon kinetiği parametreleri ve deney sonuçları Çizelge 4.44'te verilmiştir. Kil miktarının artmasıyla birlikte flotasyon hız sabiti artmıştır. Kil miktarı arttıkça kalkopirit verimi aynı şekilde artarken, ayırma etkinliği ve kalkopirit tenörü önemli şekilde düşmektedir.

**Çizelge 4.44.** İllit etkisinde flotasyon kinetiği parametreleri ve kalkopirit tenör-verim sonuçları

Değişkenler	Tf (cm)	1			2			3		
	Kil Miktarı (%)	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Sonuçlar	SE (%)	59,90	61,48	59,09	70,35	67,12	62,34	67,39	66,25	66,44
	$t_{opt}$ (dk)	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	R <sup>2</sup>	98,55	94,47	91,30	96,53	90,52	88,20	95,69	94,58	91,01
	R $\infty$	73,15	74,28	74,35	82,64	79,57	74,56	77,38	76,29	76,44
	k (dk <sup>-1</sup> )	1,79	2,16	2,56	1,83	2,25	2,24	1,42	1,70	1,88
	%CuFeS <sub>2</sub>	33,07	33,39	28,97	38,06	35,50	34,98	45,27	42,08	41,17
	%CuFeS <sub>2</sub> Verim	71,85	73,54	74,01	81,22	78,9	73,58	74,82	74,7	75,29



Şekil 4.60. Farklı köpük derinliği ve illit ilavesinde elde edilen flotasyon kinetiği sonuçları

#### 4.3.2.2.3. Flotasyon kinetiği deneylerinde kaolinin etkisi

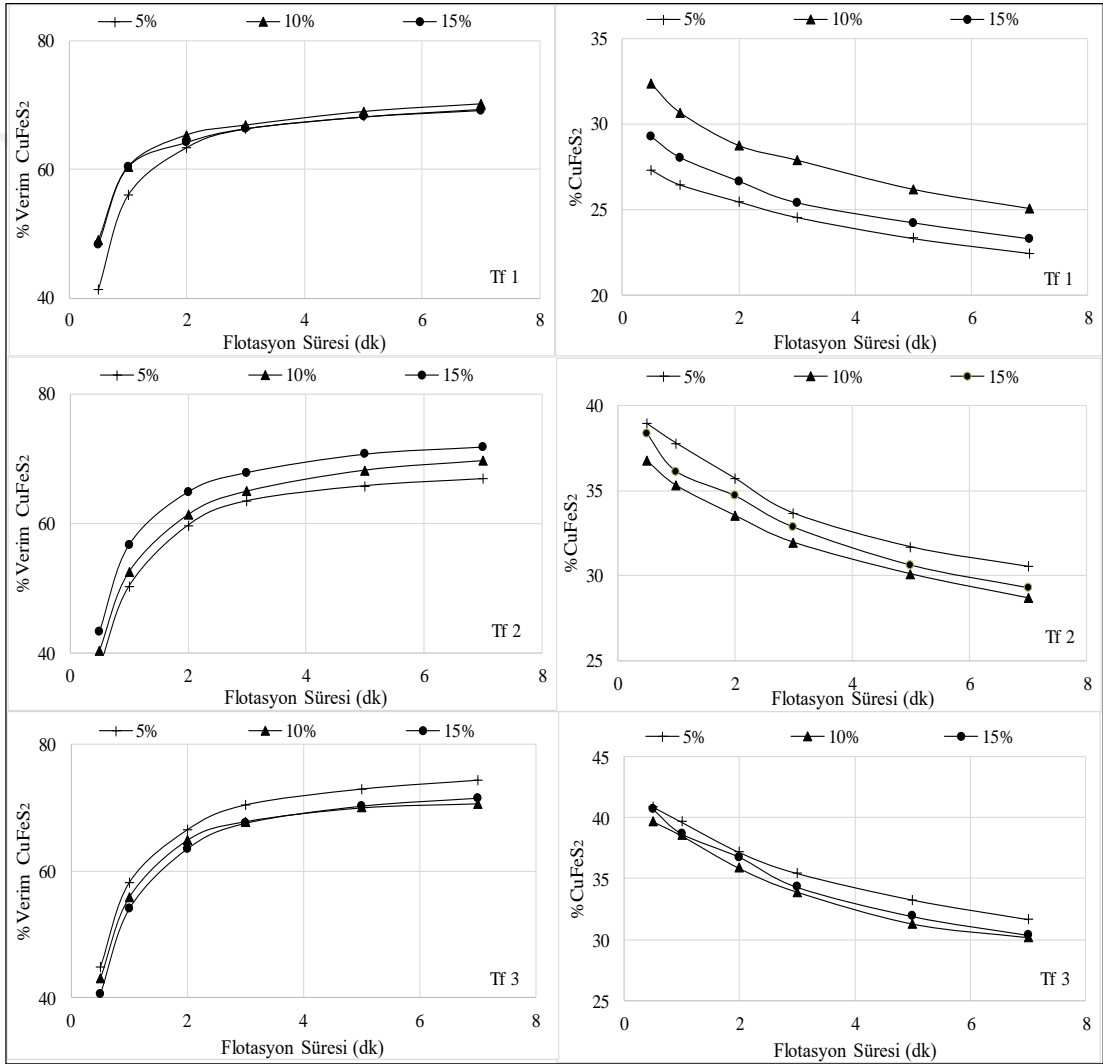
Şekil 4.61'de flotasyon süresine bağlı, kaolin ilavesiyle elde edilen flotasyon kinetiği sonuçları verilmiştir. Kil miktarının artmasıyla birlikte flotasyon hız sabitinde artış olmuştur. Kalkopirit tenörü ise kil miktarı arttıkça düşüş göstermiştir. Flotasyon kinetiği parametreleri ve deney sonuçları Çizelge 4.45'te verilmiştir. Köpük derinliğinin artmasıyla birlikte genel itibariyle flotasyon hız sabiti azalmıştır.

Çizelge 4.43-4.45'deki sonuçlardan anlaşılacağı gibi, genel olarak, ortalama korelasyon katsayıları ( $R^2$ ) 0,90'dan yüksektir; bu modelin deneysel verilere uyum sağladığını göstermektedir.



Çizelge 4.45. Kaolin etkisinde flotasyon kinetiği parametreleri ve kalkopirit tenör-verim sonuçları

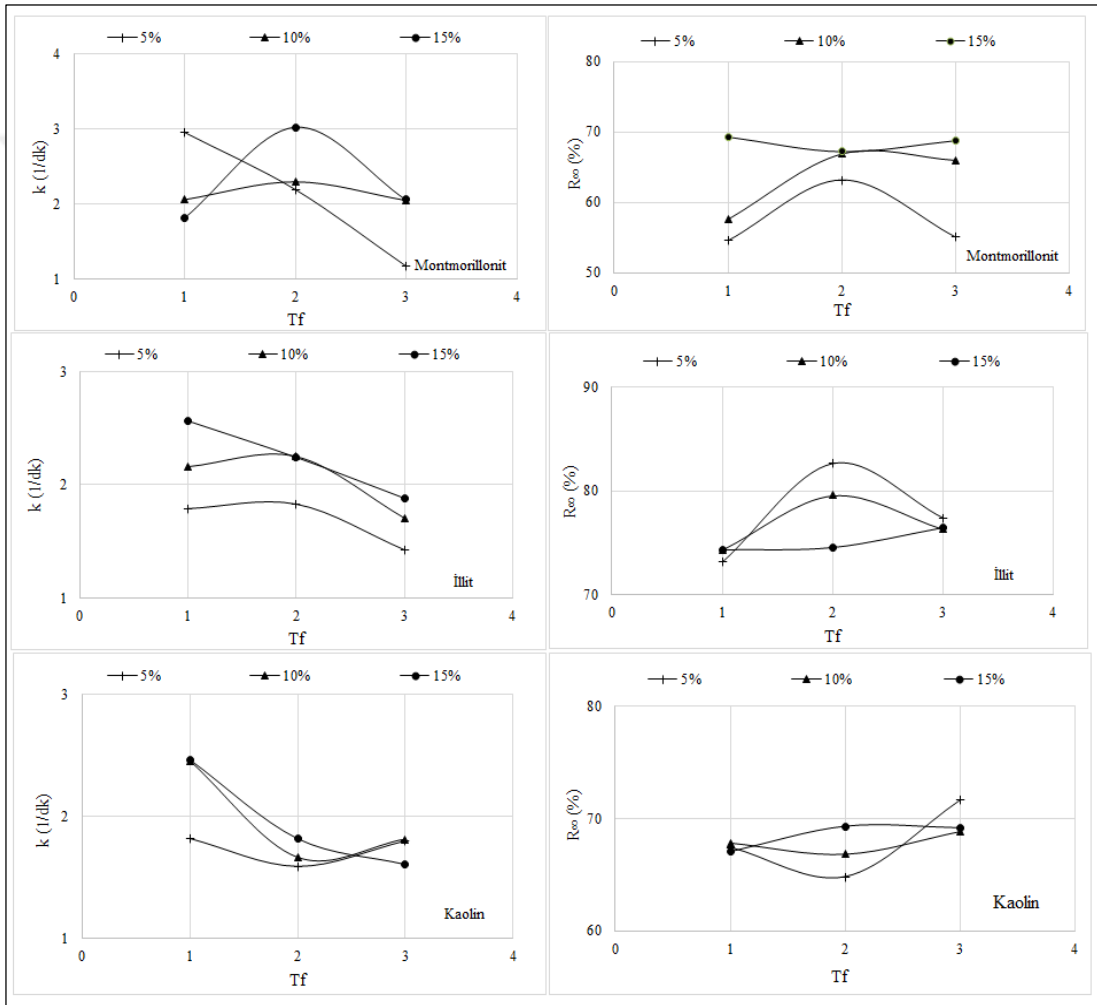
Değişkenler	Tf (cm)	1			2			3		
	Kil Miktarı (%)	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Sonuçlar	SE (%)	49,61	52,65	50,33	53,17	53,59	56,43	59,88	56,94	56,93
	$t_{opt}$ (dk)	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	$R^2$	98,07	95,19	95,59	97,43	95,49	96,50	95,99	97,40	97,03
	$R_{\infty}$	67,42	67,80	67,08	64,81	66,81	69,30	71,67	68,83	69,16
	$k$ (dk <sup>-1</sup> )	1,82	2,45	2,46	1,59	1,66	1,82	1,80	1,81	1,61
	%CuFeS <sub>2</sub>	24,58	27,91	25,40	33,68	31,97	32,85	35,40	33,89	34,28
	%CuFeS <sub>2</sub> Verim	66,34	66,84	66,35	63,44	64,94	67,82	70,45	67,82	67,58



Şekil 4.61. Farklı köpük derinliği ve kaolin ilavesinde elde edilen flotasyon kinetiği sonuçları

#### 4.3.2.2.4. Killerin flotasyon kinetiği deneylerindeki etkilerinin değerlendirilmesi

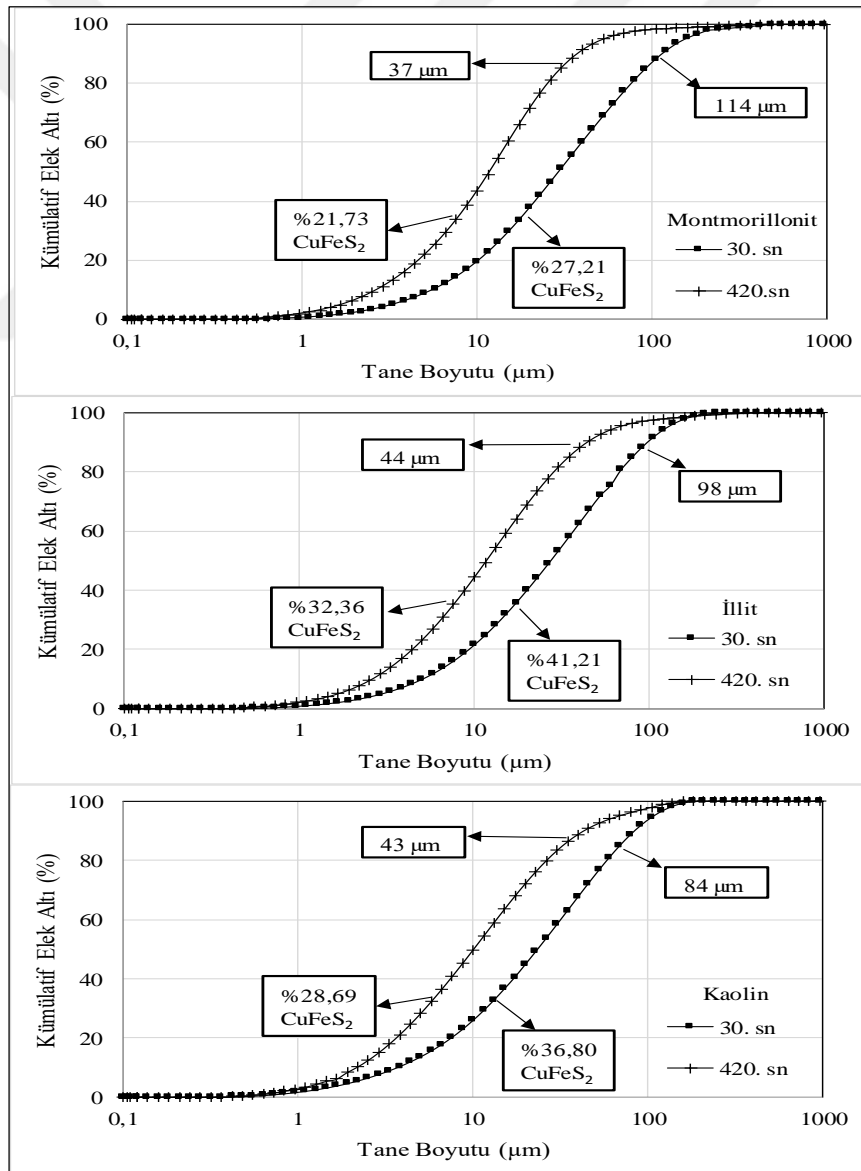
Genellikle mineral tanelerinin yüzeyliliklerinin veya hidrofobikliğinin anlaşılmasında kullanılan parametre verim olmakla birlikte doğrudan flotasyon hız sabiti de bu amaçla kullanılabilir. Kil minerallerinin kalkopiritin flotasyon kinetiğine etkisi araştırılmış ve Şekil 4.62’de, üç farklı kil için, köpük derinliği ve kil miktarının bir fonksiyonu olarak flotasyon hız sabiti ile maksimum flotasyon verimi değişimi sunulmuştur.



Şekil 4.62. Köpük derinliğine ve kil oranına bağlı flotasyon hız sabiti ve maksimum flotasyon verimi değişimi

Hız sabiti, köpük derinliğinin artmasıyla genel itibariyle azalmıştır. Maksimum flotasyon verimi ise montmorillonit ve illit için 2 cm köpük derinliğinde artış olurken, 1 ve 3 cm köpük derinliğinde düşmüştür. Kaolin için ise fazla değişiklik olmamıştır. Sonuçlar, kaolin ve illitin kalkopirit flotasyon davranışını benzer şekilde etkileyebileceğini gösterirken, montmorillonitte dalgalanmalar olmuştur.

Flotasyon kinetiği deneylerinden 2 cm köpük derinliğinde ve %10 kil içeren numunelerle gerçekleştirilen deneylerin 30. ve 420. saniyelerdeki konsantrenin (her üç kil için) Nidaş Madencilik A.Ş. (Niğde) firması laboratuvarında bulunan Malvern Mastersizer 2000 cihazı kullanılarak tane boyut analizleri yaptırılmıştır. Şekil 4.63'te  $D_{90}$  tane boyutları ve kalkopirit tenörleri verilmiştir. Süre uzadıkça mekanik taşıma nedeniyle konsantredeki ince tane miktarı önemli derecede artmaktadır. 30. saniyede kaolin ile konsantrede daha ince tane boyutlu ürün elde edilirken, 420. saniyede montmorillonit ile daha ince tane boyutlu ürün elde edilmiştir. Kalkopirit tenörü bu iki süre arasında tüm killer açısından önemli derecede düşmüştür. Bu sonuç, flotasyon süresi artışının, yalnızca değerli mineral değil gang minerallerinin de konsantreye taşınmasına ve böylece konsantre tenörünün düşmesine neden olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 4.63. Flotasyon kinetiği deneylerinde 30. ve 420. saniyelerdeki konsantrenin tane boyut dağılımları

Flotasyon süresi arttığında, konsantreye kabarcıklar arasında mekanik taşınma ile gelen ince tane miktarı artmaktadır. Mekanik taşımada hidrofobik ve hidrofilik mineraller arasında seçicilik söz konusu olmadığından, süre arttıkça ince taneler mekanik taşınmayla konsantreye taşınmaktadır. Genel olarak yüksek verimle kazanılan orta boyutlu tanelerin hızlı yüzdüğü, düşük verimle kazanılan ince tanelerin yavaş yüzdüğü anlaşılmaktadır.

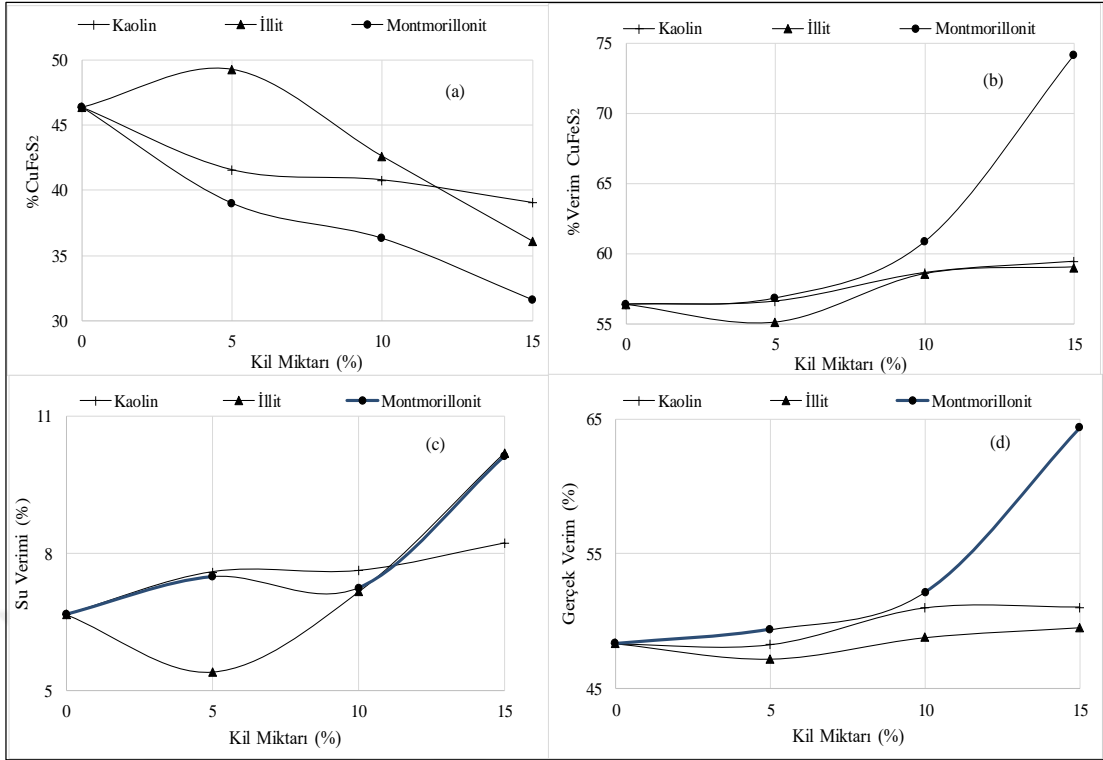
#### 4.3.2.3. Kil minerallerinin mekanik taşımaya etkisinin belirlendiği deneyler

Kil minerallerinin kalkopirit flotasyonunda mekanik taşımaya etkisinin belirlenmesi için değişen oranlarda (%5, 10 ve 15) kil içeren yüksek tenörlü cevher ile toplayıcı ve toplayıcısız flotasyon deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.46'da verilmiştir.

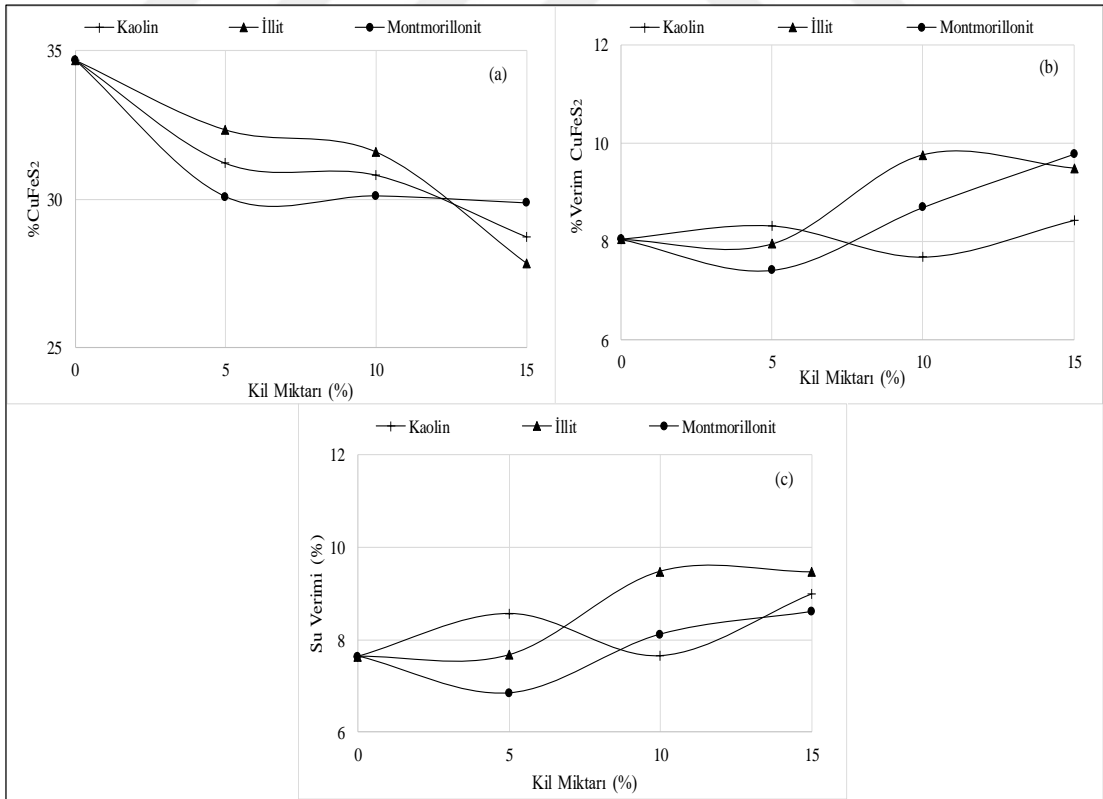
**Çizelge 4.46.** Mekanik taşıma etkisinin belirlenmesi için yapılan deneylere ait sonuçlar

Değişken		Ürün	Ağırlık (%)		Mineral (%)				Toplam Verim (RT, %)	Taşıma Verimi (RM, %)	Gerçek Verim (RG, %)	Su Verimi (%)	
					CuFeS <sub>2</sub>		Değersiz						
Kil Türü	Kil (%)		Toplayıcı	Toplayıcısız	Toplayıcı	Toplayıcısız	Toplayıcı	Toplayıcısız	CuFeS <sub>2</sub>	CuFeS <sub>2</sub>		Toplayıcı	Toplayıcısız
Kilsiz cevher	0	K	9,24	1,76	46,36	34,68	53,64	65,32	56,39	8,05	48,33	6,66	7,64
Kaolen	5	K	9,83	1,93	41,55	31,21	58,45	68,79	56,61	8,32	48,29	7,59	8,57
	10	K	9,83	1,71	40,78	30,81	59,22	69,19	58,66	7,69	50,97	7,62	7,66
	15	K	9,84	1,90	39,03	28,73	60,97	71,27	59,47	8,44	51,03	8,22	8,99
İllit	5	K	8,08	1,78	49,25	32,33	50,75	67,67	55,15	7,96	47,19	5,41	7,68
	10	K	9,40	2,11	42,59	31,58	57,41	68,42	58,56	9,77	48,79	7,16	9,48
	15	K	10,56	2,20	36,09	27,83	63,91	72,17	59,04	9,50	49,53	10,20	9,47
Montmorillonit	5	K	10,52	1,78	39,00	30,08	61,00	69,92	56,83	7,43	49,40	7,48	6,84
	10	K	11,46	1,98	36,31	30,11	63,69	69,89	60,86	8,70	52,15	7,24	8,12
	15	K	15,15	2,11	31,60	29,87	68,40	70,13	74,15	9,78	64,37	10,13	8,61

Her kil minerali için, %5 kil miktarından sonra konsantre tenörü düşerken; kalkopirit verimi, su verimi ve gerçek verim artmıştır (Şekil 4.64-4.65). Kil miktarının artması, konsantreye aşırı miktarda mekanik olarak ince boyutlu susever minerallerin taşınmasına, bu nedenle konsantre tenörünün düşmesine ve kalkopirit verimi, su verimi ve gerçek verimin artmasına sebep olmuştur.



Şekil 4.64. Toplayıcı ilaveli mekanik flotasyon deney sonuçları (kil miktarının; kalkopirit tenörüne (a), kalkopirit verimine (b), su verimine (c) ve gerçek verime (d) etkisi)



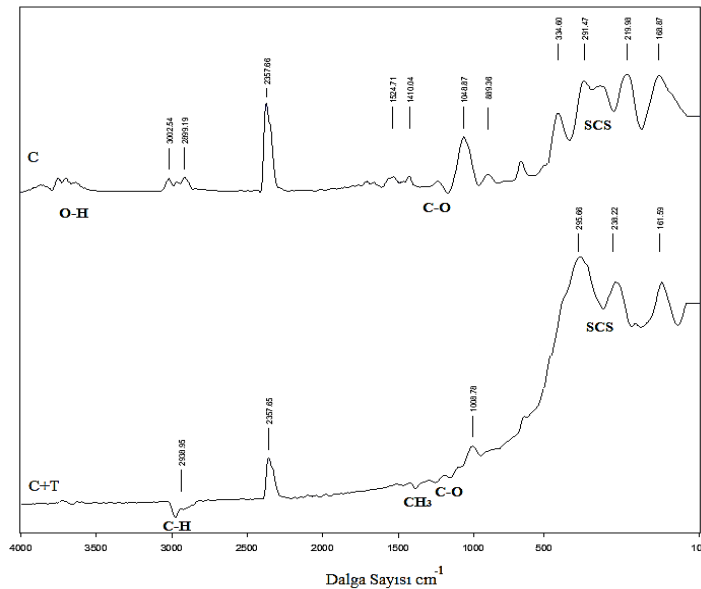
Şekil 4.65. Toplayıcısız mekanik flotasyon deney sonuçları (kil miktarının; kalkopirit tenörüne (a), kalkopirit verimine (b) ve su verimine (c) etkisi)

Sonuç olarak, kil miktarı arttıkça kil cinsi fark etmeksizin mekanik taşımanın etkisinin arttığı belirlenmiştir. Konsantreyi en çok etkileyen kil minerali montmorillonit olmuştur. Mekanik taşıma mekanizmasının daha detaylı bir şekilde ortaya konulabilmesi için, konsantrelere FTIR, SEM ve SEM-EDS analizleri yaptırılmıştır. Toplayıcılar ve yüzeyler arasındaki etkileşim, cevher hazırlamada birçok yönüyle önemli bir rol oynamaktadır. Farklı reaktiflerin mineral yüzeyi ile etkileşim mekanizmalarının anlaşılması, seçimli bir flotasyon elde edilmesinde önemlidir (Piantadosi ve ark., 2000). Bu nedenle, kil minerallerinin toplayıcı adsorpsiyonuna etkisini incelemek amacıyla konsantre sularında TOC ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

#### 4.3.2.3.1. FTIR analiz sonuçları

FTIR analizleri için cevhere kil ilave etmeden, toplayıcılı ve toplayıcısız flotasyon deneyleri yapılmıştır ve alınan konsantreler analiz edilmiştir (Şekil 4.66). Konsantrenin toplayıcılı (T) flotasyonunda DTPINa-Cu<sup>+2</sup> bileşikler 2938 cm<sup>-1</sup> dalga sayısında sp<sup>3</sup> hibritli C-H bağı olarak gözlenirken, 1100-1350 cm<sup>-1</sup> aralıklarında C-O bağı gözlenmiştir. 1380 cm<sup>-1</sup> dalga sayısında metil (CH<sub>3</sub>) piki saptanmıştır (Zhong ve ark., 2015).

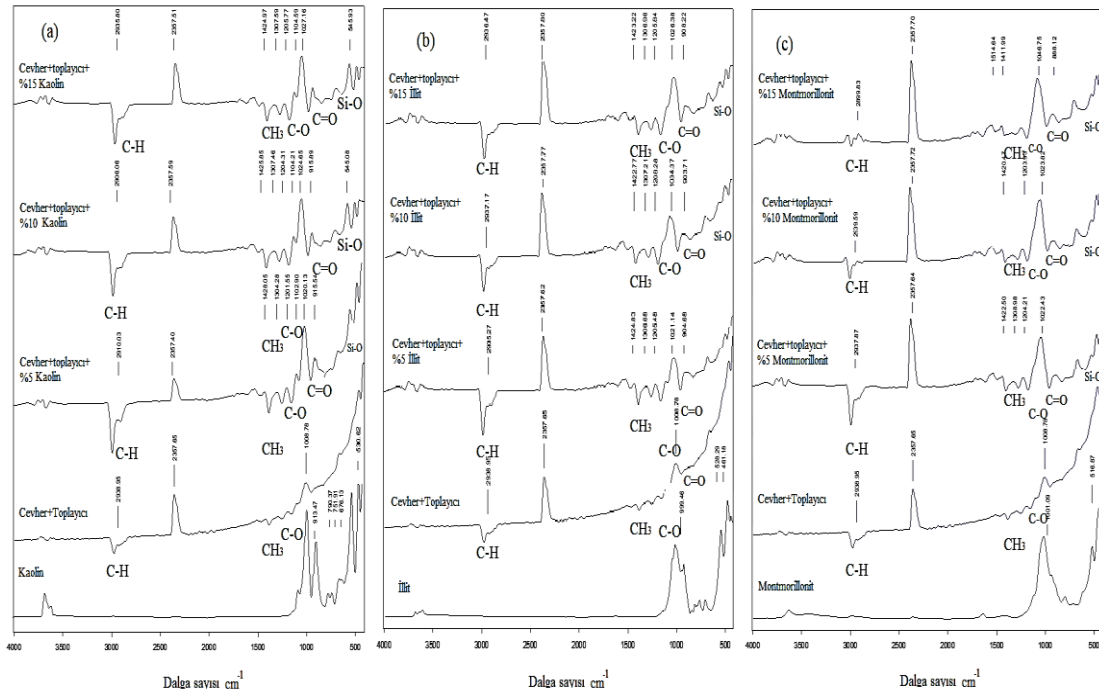
3418A kalkopirit yüzeyine adsorbe olduğunda kimyasal adsorpsiyonun ve hidrofobik Cu(DTPI)<sub>2</sub> ve (DTPI)<sub>2</sub>'nin meydana geldiğini göstermektedir (Güler ve ark., 2006; Zhong ve ark., 2015). Toplayıcısız flotasyonda (Şekil 4.66-4.68) C-H bağları görünmezken, 3620-3180 cm<sup>-1</sup> ve 1402 cm<sup>-1</sup>'de O-H bağı (Lyu ve ark., 2019) gözlenmiştir.



Şekil 4.66. Konsantrenin toplayıcılı (C+T) ve toplayıcısız (C) FTIR spektrumu

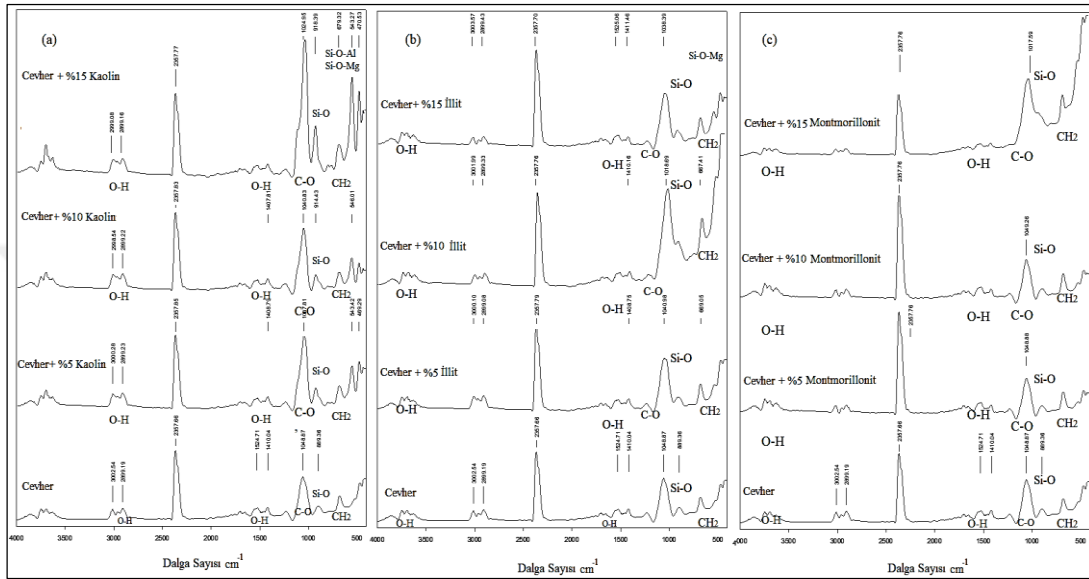
Toplayıcı adsorpsiyon mekanizması ve şlam kaplamaya etkisini belirlemek için farklı oranlarda kil karıştırılan cevher ile gerçekleştirilen mekanik taşıma deneylerinden elde edilen konsantre yüzeylerinde FTIR spektroskopisi analizleri yapılmıştır (Şekil 4.67). Yaklaşık  $2950\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında  $sp^3$  hibritli C-H bağı tüm konsantrelerde görülmüş, montmorillonitin %15 ilavesi ile pik küçülmeye başlamıştır. FTIR ölçümleri 3418A (sodyumdiizobütil ditiyofosfinat) toplayıcısının kalkopirit yüzeyine kimyasal adsorpsiyon yoluyla tutunduğunu göstermektedir (Roonasi ve ark., 2010). Konsantrede  $500\text{-}700\text{ cm}^{-1}$  dalga aralığında pik görülmezken, kil ilavesi ile  $500\text{-}1020\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı aralığında Si-O bağları gözlenmiştir.

Montmorillonitin ilave edildiği flotasyon deneylerinde elde edilen konsantrenin spektrumlarında; kilin %5'lik ilavesi bile montmorillonitin  $889\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı aralıklarındaki  $\text{OH}^-$  ( $\text{AlFe-OH}^-$  oktahedral tabaka) piki oluşmaya başlamıştır (Bishop ve ark., 1994). 3 farklı kil ilavesinde de  $3600\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı aralıklarında H-O-H su moleküllerinin zayıf hidrojen bağı ile  $904\text{-}915\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı aralıklarında Si-O yüzeyine adsorplandığı saptanmıştır (Elkhalifah ve ark., 2011).  $1027\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında %15 kaolin ve %15 illit spektrumunda büyük bir silika piki görülmektedir.



Şekil 4.67. Konsantre ve farklı miktardaki killerin toplayıcı FTIR spektrumu  
(a) kaolin, (b) illit ve (c) montmorillonit

Montmorillonitin FTIR spektrumunda  $1040\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısında gözlenen oldukça büyük pik, tetrahedral tabakadaki Si-O-Si gruplarının Si-O gerilim titreşimiyle ilgilidir. Son olarak  $522\text{ cm}^{-1}$ 'de gözlenen pik oktahedral Si-O-Al bükülme titreşimlerinin varlığını göstermektedir (Özcan, 2010). FTIR spektrum analizi sonuçlarına göre, 3418A'nın sülfür mineralleri yüzeyinde adsorpsiyonunun kimyasal olduğunu, -P=S and -P-S atomlarının reaksiyonda yer aldığını göstermiştir (Zhong ve ark., 2015).



Şekil 4.68. Konsantre ve farklı miktardaki killerin toplayıcısız FTIR spektrumu  
(a) kaolin, (b) illit ve (c) montmorillonit

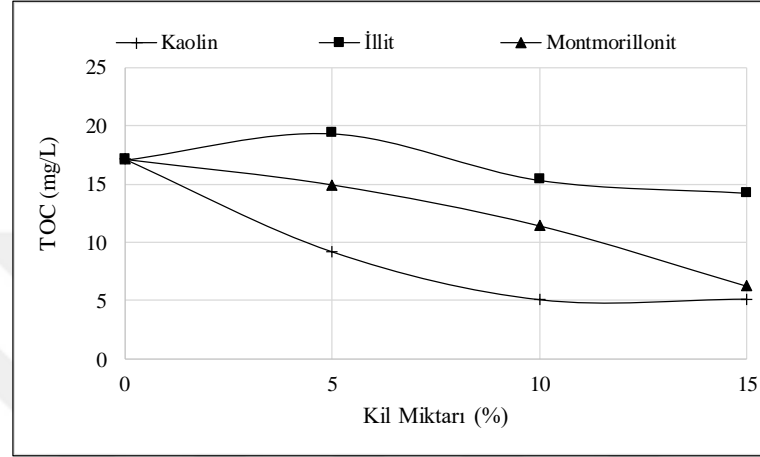
#### 4.3.2.3.2. TOC analiz sonuçları

Kil minerallerinin toplayıcı adsorpsiyonuna etkilerini incelemek amacıyla, mekanik taşıma deneylerinde toplayıcı ilaveli yapılan flotasyon deneyleri sonucu alınan konsantre filtre edilerek, katıdan arındırılmış ve elde edilen çözelti TOC analizine tabi tutulmuştur. Kil ihtiva etmeyen cevherle gerçekleştirilen deney konsantre suyunda  $17,08\text{ mg/L}$  karbon bulundurmaktadır. Kil ilavesiyle gerçekleştirilen deney konsantre sularındaki karbon miktarı ise genel itibarıyla bu değerden daha düşüktür (Çizelge 4.47 ve Şekil 4.69). Konsantre suyunda TOC azalması daha fazla toplayıcının mineral yüzeyine adsorplandığını göstermektedir. Eğer toplayıcı kalkopirit yüzeyine adsorplanmış olsaydı daha yüksek kalkopirit tenörlü konsantre elde etmek gerekirdi. Oysa konsantre suyunda TOC analizi gerçekleştirilen mekanik taşıma deneylerinde kil miktarının artmasıyla tenörün düştüğü belirlenmiştir. Bu durum toplayıcının geniş yüzey alanına sahip kil minerallerinin pozitif yüklü kenar yüzeylerine adsorplandığını açıklamaktadır.



Çizelge 4.47. TOC analiz sonuçları (mg/L)

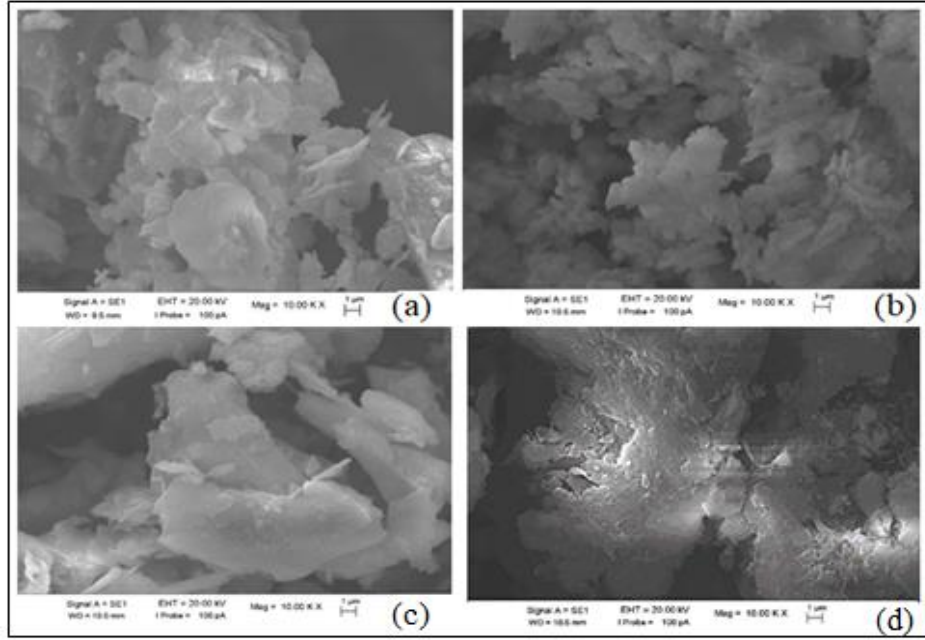
Kil Türleri	Kaolin	İllit	Montmorillonit
%			
0	17,08	17,08	17,08
5	9,15	19,33	14,89
10	5,05	15,35	11,38
15	5,1	14,25	6,21



Şekil 4.69. Konsantre suyundaki TOC miktarı

#### 4.3.2.3.3. SEM ve SEM-EDS analiz sonuçları

SEM analizlerinde öncelikle kalkopirit minerali ve kil minerallerinin ayrı ayrı görüntüleri alınmıştır (Şekil 4.70). Kalkopirit ve killerin kristal yapıları net olarak görülmektedir. SEM görüntülerinde varlığı tespit edilen gang minerallerinin teyidi için taramalı elektron mikroskobunda yarı kantitatif analizi (SEM-EDS) yapılmıştır. Görüntüleme araçları ile birleştirildiğinde, EDS, numunenin elementel bileşimini vermekte veya görüntülenen alanın tamamındaki elementlerin dağılımını haritalandırmaktadır. Değerli mineral ve gang mineralinin temel bileşimleri farklı olduğu için, EDS ile birleşmiş SEM, kil minerallerini değerli minerallerden ayırt edebilmektedir.



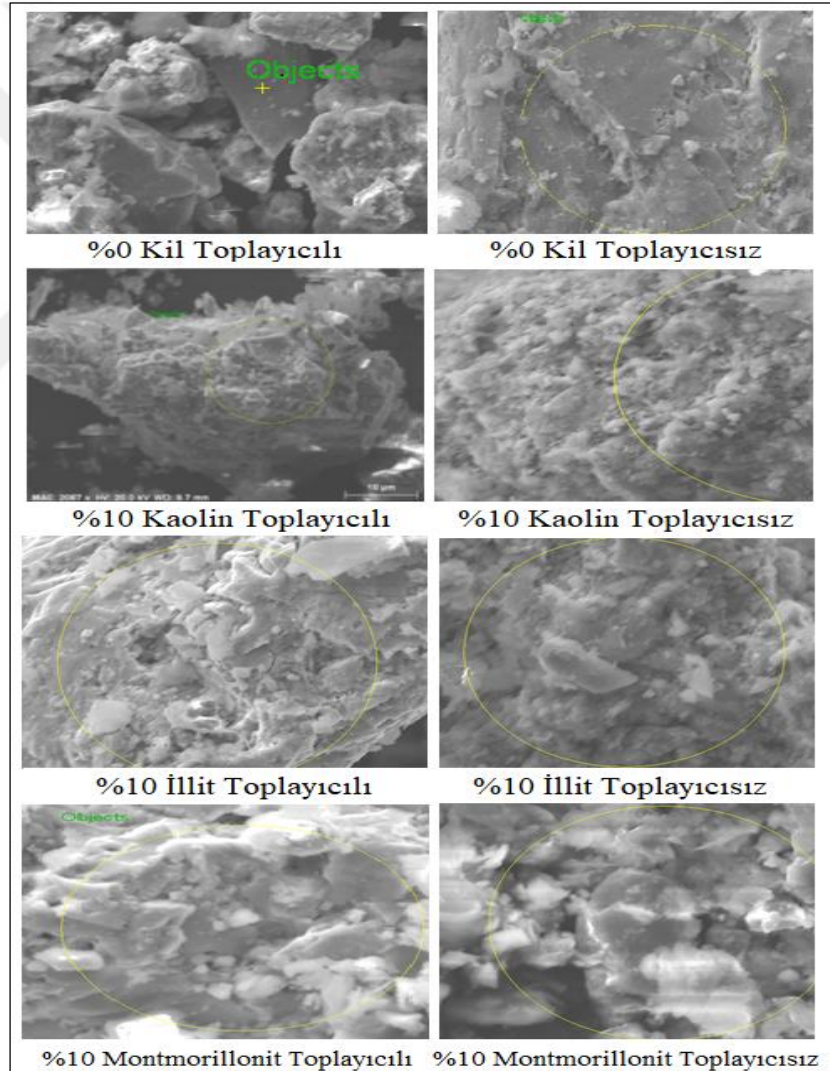
Şekil 4.70. Numunelerin SEM görüntüsü (a-Kalkopirit cevheri, b-kaolin, c-illit ve d-montmorillonit)

Çizelge 4.48’de SEM-EDS analiz sonuçları verilmiştir. Kil ilave edilmeden yapılan toplayıcılı flotasyon deney sonucunda %4 kil içerisinde olabilecek elementleri bulundururken, toplayıcısız flotasyonda %6,9’a çıkmıştır. Bu oran kil ilave ettikçe artmıştır. Kaolin ilavesiyle konsantrde ki Al içeriği artarken, illit ilavesiyle K içeriği artmış ve montmorillonitte ise Mg ile Na dikkati çekmektedir. Bu elementlerin saf killerde de bulunması önem arz etmektedir (Çizelge 3.3). Killerin içerdiği farklı elementler (kaolinde Al, illitte K, montmorillonitte Mg ve Na) toplayıcısız deneylerde konsantrde artmıştır.

Çizelge 4.48. SEM-EDS Analiz sonuçları

Deney Koşulları		Cu (%)	Fe (%)	S (%)	Si (%)	Al (%)	Mg (%)	Na (%)	K (%)	Ca (%)	O (%)	Toplam Kil Elementleri (%)
%0 Kil	Toplayıcılı	16,7	28,2	23,8	1,8	0,5	1,4	0,0	0,1	0,2	11,1	4,0
	Toplayıcısız	12,8	27,0	30,0	2,4	2,0	1,0	1,1	0,2	0,2	18,7	6,9
%10 Kaolin	Toplayıcılı	13,5	27,9	30,0	4,2	3,8	2,1	2,3	0,2	0,2	14,8	12,8
	Toplayıcısız	13,0	24,5	19,4	5,2	6,7	1,8	0,3	0,2	0,4	18,1	14,6
%10 İllit	Toplayıcılı	20,9	24,6	26,5	1,8	1,1	1,2	0,8	0,5	0,3	14,4	5,7
	Toplayıcısız	10,5	13,4	24,7	2,7	2,1	1,0	13,1	0,6	0,5	19,1	20,0
%10 Montmorillonit	Toplayıcılı	16,5	23,3	26,9	1,6	1,1	2,0	3,0	0,2	0,4	22,8	8,3
	Toplayıcısız	5,1	17,6	16,0	9,4	3,4	3,7	4,4	0,2	0,9	20,8	22,0

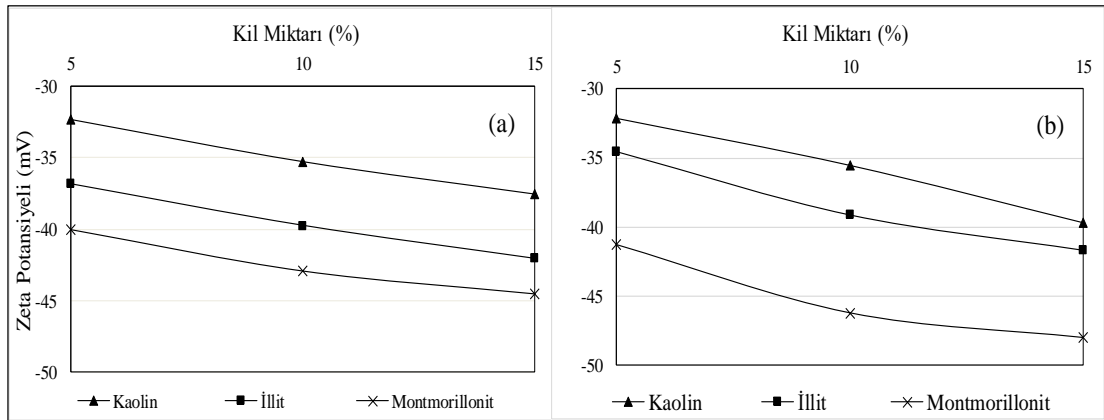
Toplayıcılı deneylerden elde edilen konsantre içindeki bu elementlerin toplam konsantrasyonları kaolin>montmorillonit>illit şeklinde olmuştur. Toplayıcısız deneylerden elde edilen konsantredeki bu elementler daha da artmıştır. Bu sonuçlar göstermiştir ki; kaolin ilavesi şlam kaplama ve mekanik taşımaya daha fazla sebebiyet vermekte, illit ilavesiyle şlam kaplama ve mekanik taşımaya daha az olduğu görülmektedir. SEM-EDS çalışması ile kalkopirit yüzeyinde kil elementlerinin varlığına dair kanıt sağlanmıştır. Şekil 4.71'de kalkopirit+killerin toplayıcılı ve toplayıcısız çekilen SEM fotoğrafları verilmektedir. Kil ilave edilmeyen SEM görüntülerinde kalkopiritin tabaka yapısı açıkça görülmektedir. Hidrofilik kaolin taneleri, kalkopirit yüzeyinde kaplanmış ve kalkopirit yüzeyini daha az hidrofobik hale getirmiştir.



Şekil 4.71. SEM-EDS görüntüleri

Kaolinin bazal yüzeyinde mikro çukurların, düzensiz ve kırık kenarların bulunması karmaşık bir yüzey yapısına sahip olduğunu göstermektedir (Murray, 1999). Kaolinin SEM görüntüsünde, genel olarak hegzagonal bir şekil sergileyen nispeten keskin kristal morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Tabakalı yapılar kaolin mineralinin varlığını temsil etmektedir. Montmorillonit normal olarak, çok iyi dağılmış halde kile yüksek bir yüzey alanı kazandıran, çok küçük tane boyutunda, ince pullar halinde oluşmaktadır. Bu pulsu yapıyla görüntülerde belirgin şekilde karşılaşılmaktadır.

Flotasyon deneylerinde kullanılan anyonik 3418A toplayıcısının kalkopirit mineral yüzeyine belirli kil miktarında hangi şartlarda ne derecede adsorplandığını belirleyebilmek için zeta potansiyeli ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler, flotasyon koşullarında elde edilen değerlere göre belirlenen koşullara göre gerçekleştirilmiş ve bunun için, farklı kil miktarlarında toplayıcının (50 g/t) ve bastırıcının (100 g/t) etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.72'de görülmektedir. Bastırıcı ilavesiyle kalkopirit ve %15 montmorillonit karışımının zeta potansiyeli eğrisi önemli derecede düşmüştür. Bu da sodyum silikatın montmorillonit yüzeyine adsorplandığını göstermektedir. Reaktiflerin ilavesiyle zeta potansiyelleri tüm kil mineralleri için negatif yönde artmış ve bu artış kaolin>illit>montmorillonit şeklinde olmuştur. Sodyum silikatın eklenmesinin, kaolin ve illitin zeta potansiyellerine fazla etkisi olmamıştır. Kil miktarı arttıkça yüzey daha fazla negatiflik kazanmıştır.



**Şekil 4.72.** Kil mineralleri (a) toplayıcı ilaveli ve (b) toplayıcı ve bastırıcı ilaveli zeta potansiyeli ölçümleri (pH:11.5, 100 g/t Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, 50 g/t 3418A)

Kaolin, illit ve montmorillonitin kalkopirite farklı oranlarda ilavesiyle elde edilen zeta potansiyelleri, 3418A varlığında, 3418A yokluğundan daha yüksektir; bu, 3418A'nın kil minerallerinin yüzeyinde adsorbe edildiğini göstermektedir, yani kil ve kalkopirit minerallerinin yüzeyinde pozitif yüklerin artmasına neden olmaktadır.

Toplayıcı ilavesiyle zeta potansiyel değerlerinin düşmesi beklenmektedir; çünkü yüzeyaktif maddelerle birlikte kil minerallerinin kenar yüklerinin etkileri, negatif yüklerin sayısını daha fazla artıracak ve aynı zamanda benzer yüklü iyonlar birbirlerini itecektir. Kil minerallerinin çoğu yüksek oranda hidrofilik olduğundan, kil minerallerinin değerli mineral yüzeyler üzerine kaplanması, toplayıcıların değerli mineraller üzerine adsorpsiyonunu önleyebilmektedir. Ayrıca değerli minerallerin yüzey hidrofobikliğini azaltabilir, bu da yalnızca mineral yüzdürmesini engellemekle kalmaz, aynı zamanda konsantre tenörünü de azaltmaktadır (Gaudin ve ark., 1960; Edwards ve ark., 1980; Bremmell ve ark., 2005; Chen ve Peng, 2018). Şlam kaplamanın oluşması için kil mineralleri ve değerli mineraller arasında çekim kuvvetleri bulunması gerekmektedir. Önceki çalışmaların çoğu (He ve ark., 2009; Oats ve ark., 2010; Uribe ve ark., 2016; Chen ve Peng, 2018) şlam kaplamayı kontrol eden ana kuvvet olarak elektrostatik kuvveti tanımlamıştır.

Dağıtıcının kaolin ve illit ilavesinde kalkopiritin zeta potansiyeli üzerine etkisi fazla olmazken, montmorillonit yüzeyi daha fazla negatiflik kazanmıştır. Genel olarak bakıldığında yüzeydeki negatif yükler arttıkça adsorplanan dağıtıcı miktarı da artmaktadır. Dağıtıcılar, van der Waals kuvvetlerinin toplam net kuvvete olan katkısını dengeleyen elektrostatik ve/veya sterik itme yaratarak taneler arasındaki etkileşimlerini değiştirmek için kullanılmaktadır. Bu dağıtıcılar çoğunlukla anyoniktir ve mineral yüzeyleri üzerinde adsorbe olmakta, bu da onları daha negatif yapmaktadır (Huynh ve ark., 2000; Oats ve ark., 2010).

Tüm tanecikler çok büyük negatif veya pozitif zeta potansiyele sahipse, tanecikler birbirini itmekte ve dispersiyon kararlı olmaktadır. Tanecikler düşük zeta potansiyele sahipse taneciklerin bir araya toplanmasını engelleyecek kuvvet bulunmadığından dispersiyon kararsızlığı (topaklanma) oluşmaktadır. Kaolin anizotropik bir mineraldir, tane düzlemi boyunca belirgin şekilde farklı yüklere sahiptir. Hem toplayıcı ilavesinde hem de toplayıcı ve bastırıcı ilavesinde zeta potansiyeli en az düşen kaolin olmuştur.

### 4.3.3. Düşük tenörlü cevher ile gerçekleştirilen flotasyon deneylerinde farklı bastırıcı/dağıtıcı türlerinin etkisinin sonuçları

Cevherin karakterizasyon çalışmalarında içerdiği gang mineralleri ve kil minerallerinin cinsi belirlenmiş ve bu deney aşamasında tesis problemini çözmeye uygun reaktifler kullanılmaya çalışılmıştır. Tesise önerilebilecek uygun bastırıcı/dağıtıcı cinsi ve miktarının belirlenebilmesi amacıyla 9 farklı reaktifin kalkopirit ve pirit tenör-verimine etkisi araştırılmıştır.

Ağaçlardan üretilen polifenoller (DP3124-3125), OH grupların alkollü ( $pK_a > 12$ ) yerine fenolik ( $pK_a = 9,2-9,9$ ) olması nedeniyle polisakkaritlerden farklıdır. Lignosülfonatlar, ağaçların selüloz kısımlarından üretilen güçlü anyonik polielektrolitlerdir. Lignosülfonat, sulu çözeltide iyi bir çözünürlüğe sahiptir ve belirli bir yüzey aktivitesine sahiptir, bu nedenle birçok sektörde kullanılırken, madencilikte flotasyon kimyasalları olarak kullanılmaktadır. Genel olarak, lignosülfonat yapısının sadece aromatik ve alifatik gruplar gibi hidrofobik gruplar içermediği aynı zamanda sülfonik, karboksil ve fenolik hidroksil grupları gibi hidrofilik gruplar içerdiği kabul edilmektedir (Wang, 2016).

AERO7260 firma kataloğunda sülfürlü cevher flotasyonunda gangın uzaklaştırılmasında ve diğer sülfürlü minerallerin bastırılmasında uygun bir bastırıcı olarak adlandırılmıştır. AERO7260, polimerik bir bastırıcıdır ve %10'a kadar izopropanol ve %10 sodyum metabisülfid içeren sulu bir çözeltide %30 ile %60 arasında polimer içermektedir. Karboksimetil selüloz (CMC) gang minerallerini bastırmak için birçok Cu/Ni sülfürlü cevherin flotasyonunda kullanılmaktadır (Zhao ve ark., 2015). CMC organik madde bir polielektrolittir ve yüksek molekül ağırlıklı asittir. Ortam koşullarına bağlı, yapı olarak değişen birçok fonksiyonel grup (karboksilik, hidroksil, fenolik, aromatik, kinon yapılar, azot, çeşitli aromatik halkalar ve zayıf alifatik asitler) içermektedir. AERO633 ise baz metal sülfürlü cevherlerin flotasyonunda karbonat içeren mineralleri bastırmak için kullanılması tavsiye edilmiştir. Cyquest 4000'de kil içeren sülfürlü cevherin flotasyonunda kil minerallerinin bastırılması için firma tarafından üretilmiştir. DK50, firma tarafından sülfürlü cevherde gang mineralleri olarak bulunan kil minerallerinin (özellikle kaolin) için çok yönlü bir dağıtıcı özelliğine sahip olduğu ve DK55'in DK50'den tek farkı karbonatlı minerallerin de bastırılmasında etkili olduğu bildirilmiştir.

Sodyum silikat, DP3124 ve DP3125'in etkisinin araştırıldığı deney sonuçları Çizelge 4.49-4.51'de ve Şekil 4.73'te verilmiştir. 50 g/t sodyum silikat, DP3124 ve DP3125 miktarlarında kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edildiği görülmektedir. Reaktif miktarı arttıkça; kalkopirit tenöründe düşüş olurken, verim açısından bir değişim görülmemektedir.

Çizelge 4.49. Düşük tenörlü cevher ile yapılan flotasyon deneylerinde sodyum silikatın etkisi

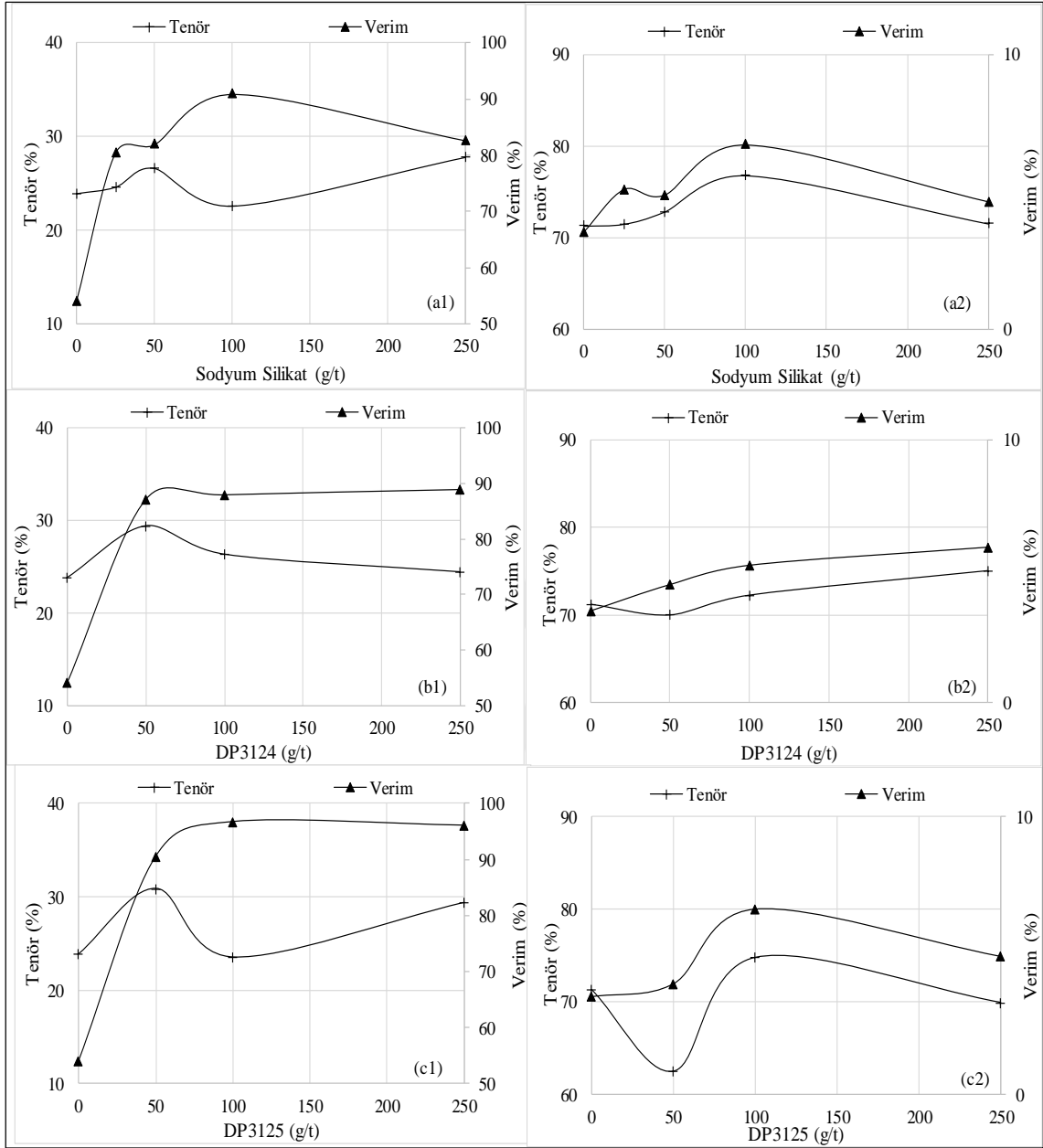
Bastırıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
0	Konsantre	4,58	8,26	40,44	23,86	71,28	4,86	54,07	3,51	4,53
	Artık	95,42	0,34	44,10	0,97	94,10	4,92	45,93	96,49	95,47
50	Konsantre	6,23	9,20	41,97	26,56	72,81	0,63	81,89	4,88	0,80
	Artık	93,77	0,14	44,06	0,39	94,40	5,21	18,11	95,12	99,20
100	Konsantre	8,16	7,80	42,58	22,52	76,76	0,72	90,86	6,73	1,19
	Artık	91,84	0,07	44,05	0,20	94,51	5,29	9,14	93,27	98,81
250	Konsantre	6,02	9,60	41,73	27,74	71,52	0,74	82,64	4,63	0,91
	Artık	93,98	0,13	44,07	0,37	94,44	5,19	17,36	95,37	99,09
Besleme		100,00	0,70	43,93	2,02	93,06	4,92	100,00	100,00	100,00

Çizelge 4.50. Düşük tenörlü cevher ile yapılan flotasyon deneylerinde DP3124'ün etkisi

Bastırıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
0	Konsantre	4,58	8,26	40,44	23,86	71,28	4,86	54,07	3,51	4,53
	Artık	95,42	0,34	44,10	0,97	94,10	4,92	45,93	96,49	95,47
50	Konsantre	5,99	10,19	41,57	29,42	70,07	0,51	87,15	4,51	0,62
	Artık	94,01	0,10	44,08	0,28	94,52	5,20	12,85	95,49	99,38
100	Konsantre	6,75	9,13	41,68	26,35	72,31	1,34	87,94	5,24	1,83
	Artık	93,25	0,09	44,09	0,26	94,56	5,18	12,06	94,76	98,17
250	Konsantre	7,35	8,47	42,39	24,46	75,08	0,46	88,89	5,93	0,69
	Artık	92,65	0,08	44,05	0,24	94,48	5,27	11,11	94,07	99,31
Besleme		100,00	0,70	43,93	2,02	93,06	4,92	100,00	100,00	100,00

Çizelge 4.51. Düşük tenörlü cevher ile yapılan flotasyon deneylerinde DP3125'in etkisi

Bastırıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
0	Konsantre	4,58	8,26	40,44	23,86	71,28	4,86	54,07	3,51	4,53
	Artık	95,42	0,34	44,10	0,97	94,10	4,92	45,93	96,49	95,47
50	Konsantre	5,93	10,70	38,48	30,89	62,47	6,64	90,57	3,98	8,00
	Artık	94,07	0,07	44,27	0,20	94,98	4,81	9,43	96,02	92,00
100	Konsantre	8,31	8,15	41,97	23,54	74,78	1,68	96,75	6,68	2,84
	Artık	91,69	0,02	44,11	0,07	94,71	5,21	3,25	93,32	97,16
250	Konsantre	6,61	10,18	41,48	29,39	69,90	0,71	96,11	4,97	0,95
	Artık	93,39	0,03	44,10	0,08	94,70	5,22	3,89	95,03	99,05
Besleme		100,00	0,70	43,93	2,02	93,06	4,92	100,00	100,00	100,00



Şekil 4.73. Sodyum silikat (a1-kalkopirit, a2-pirit), DP3124 (b1-kalkopirit, b2-pirit) ve DP3125 (c1-kalkopirit, c2-pirit) miktarlarının tenör ve verime etkisi

DK55, DK50 ve CYQUEST4000'in etkisinin araştırıldığı deney sonuçları Çizelge 4.52-54'de ve Şekil 4.74'te verilmiştir. 50 g/t DK50 ve CYQUEST4000, 100 g/t DK55 miktarlarında kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edildiği görülmektedir. Reaktif miktarı arttıkça; tenörde düşüş olurken, verim açısından bir değişim görülmemektedir.



Çizelge 4.52. Düşük tenörlü cevher ile yapılan flotasyon deneylerinde DK55'in etkisi

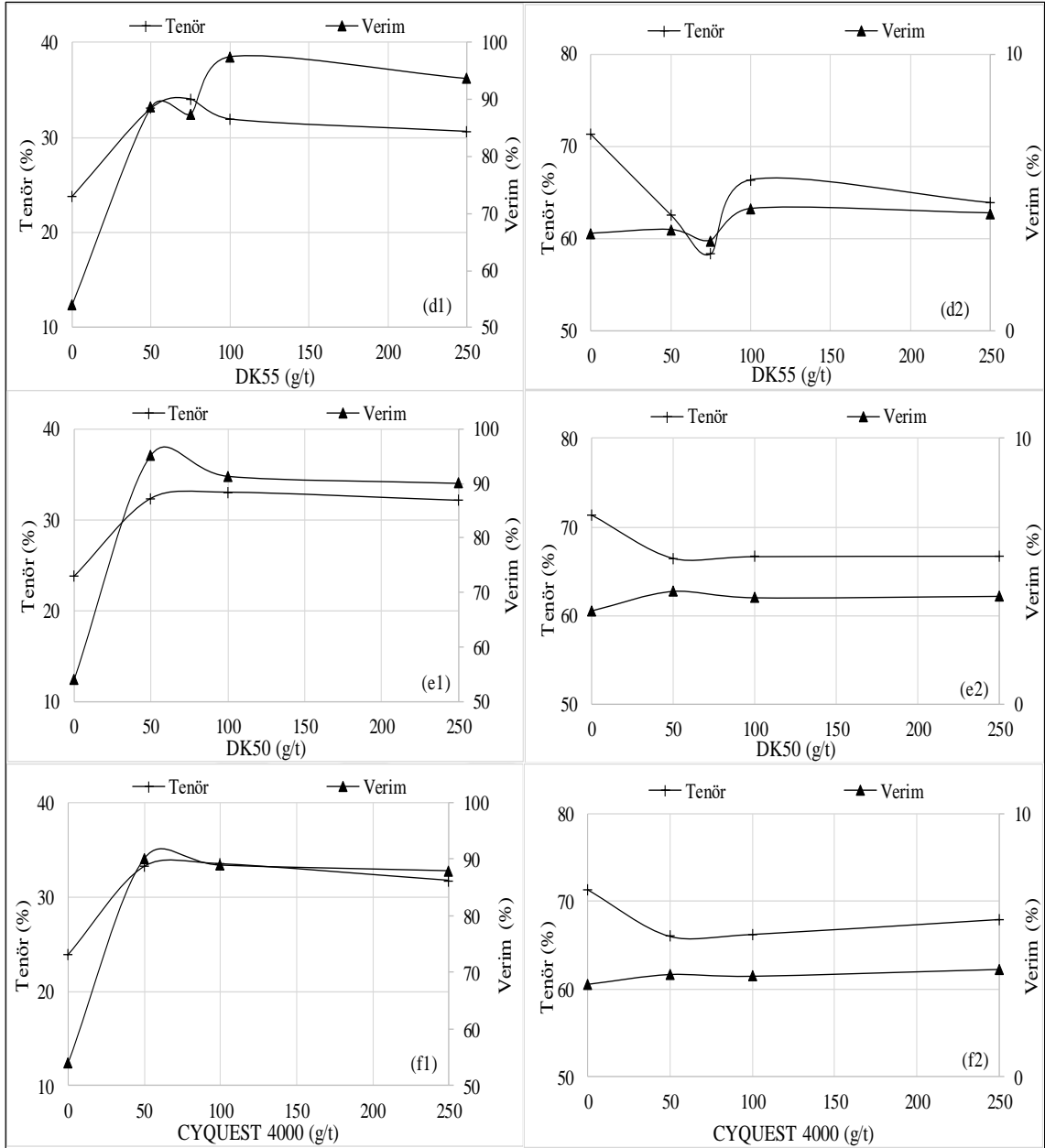
Bastırıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
0	Konsantre	4,58	8,26	40,44	23,86	71,28	4,86	54,07	3,51	4,53
	Artık	95,42	0,34	44,10	0,97	94,10	4,92	45,93	96,49	95,47
50	Konsantre	5,42	11,44	39,19	33,05	62,60	4,35	88,63	3,65	4,80
	Artık	94,58	0,08	44,20	0,24	94,80	4,95	11,37	96,35	95,20
100	Konsantre	6,18	11,05	40,60	31,92	66,36	1,72	97,51	4,40	2,16
	Artık	93,82	0,02	44,15	0,05	94,81	5,13	2,49	95,60	97,84
250	Konsantre	6,18	10,61	39,06	30,63	63,89	5,48	93,68	4,25	6,88
	Artık	93,82	0,05	44,25	0,14	94,98	4,88	6,32	95,75	93,12
Besleme		100,00	0,70	43,93	2,02	93,06	4,92	100,00	100,00	100,00

Çizelge 4.53. Düşük tenörlü cevher ile yapılan flotasyon deneylerinde DK50'nin etkisi

Bastırıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
0	Konsantre	4,58	8,26	40,44	23,86	71,28	4,86	54,07	3,51	4,53
	Artık	95,42	0,34	44,10	0,97	94,10	4,92	45,93	96,49	95,47
50	Konsantre	5,95	11,20	40,78	32,34	66,46	1,20	95,23	4,25	1,45
	Artık	94,05	0,04	44,13	0,10	94,74	5,16	4,77	95,75	98,55
100	Konsantre	5,59	11,43	41,07	33,00	66,65	0,35	91,32	4,01	0,39
	Artık	94,41	0,06	44,10	0,19	94,62	5,19	8,68	95,99	99,61
250	Konsantre	5,67	11,12	40,82	32,11	66,70	1,19	90,04	4,06	1,37
	Artık	94,33	0,07	44,12	0,21	94,64	5,15	9,96	95,94	98,63
Besleme		100,00	0,70	43,93	2,02	93,06	4,92	100,00	100,00	100,00

Çizelge 4.54. Düşük tenörlü cevher ile yapılan flotasyon deneylerinde Cyquest 4000'in etkisi

Bastırıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
0	Konsantre	4,58	8,26	40,44	23,86	71,28	4,86	54,07	3,51	4,53
	Artık	95,42	0,34	44,10	0,97	94,10	4,92	45,93	96,49	95,47
50	Konsantre	5,49	11,50	40,84	33,20	66,03	0,77	90,14	3,89	0,86
	Artık	94,51	0,07	44,11	0,21	94,63	5,16	9,86	96,11	99,14
100	Konsantre	5,37	11,59	41,02	33,48	66,25	0,27	88,98	3,83	0,30
	Artık	94,63	0,08	44,10	0,24	94,58	5,18	11,02	96,17	99,70
250	Konsantre	5,61	10,98	41,27	31,72	67,93	0,35	87,98	4,09	0,39
	Artık	94,39	0,09	44,09	0,26	94,55	5,19	12,02	95,91	99,61
Besleme		100,00	0,70	43,93	2,02	93,06	4,92	100,00	100,00	100,00



Şekil 4.74. DK55 (d1-kalkopirit, d2-pirit), DK50 (e1-kalkopirit, e2-pirit) ve CYQUEST4000 (f1-kalkopirit, f2-pirit) miktarlarının tenör ve verime etkisi

AERO633, AERO7260 ve CMC'nin etkisinin araştırıldığı deney sonuçları Çizelge 4.55-4.57'de ve Şekil 4.75'te verilmiştir. 100 g/t AERO633, 50 g/t AERO7260 ve CMC miktarlarında kalkopirit için en uygun verim ve tenör değerleri elde edildiği görülmektedir. Reaktif miktarı arttıkça; tenörde düşüş olurken, verim açısından bir değişim görülmemektedir.

Çizelge 4.55. Düşük tenörlü cevher ile yapılan flotasyon deneylerinde AERO633'ün etkisi

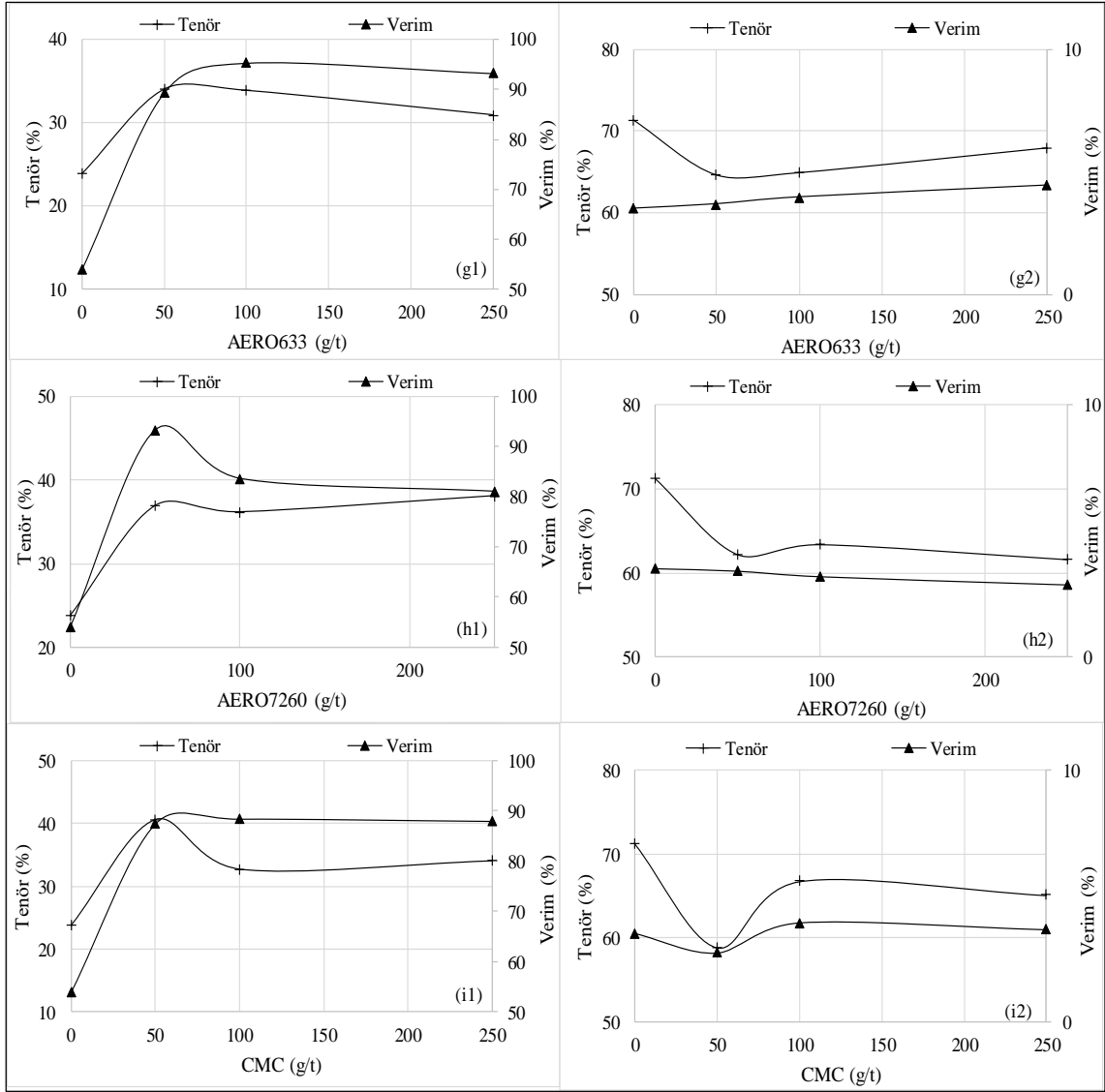
Bastırıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
0	Konsantre	4,58	8,26	40,44	23,86	71,28	4,86	54,07	3,51	4,53
	Artık	95,42	0,34	44,10	0,97	94,10	4,92	45,93	96,49	95,47
50	Konsantre	5,31	11,78	40,45	34,02	64,66	1,32	89,37	3,69	1,42
	Artık	94,69	0,08	44,13	0,23	94,65	5,12	10,63	96,31	98,58
100	Konsantre	5,69	11,72	40,53	33,86	64,94	1,20	95,30	3,97	1,39
	Artık	94,31	0,03	44,14	0,10	94,75	5,15	4,70	96,03	98,61
250	Konsantre	6,10	10,70	41,03	30,92	67,93	1,15	93,23	4,45	1,43
	Artık	93,90	0,05	44,12	0,15	94,69	5,17	6,77	95,55	98,57
Besleme		100,00	0,70	43,93	2,02	93,06	4,92	100,00	100,00	100,00

Çizelge 4.56. Düşük tenörlü cevher ile yapılan flotasyon deneylerinde AERO7260'ın etkisi

Bastırıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
0	Konsantre	4,58	8,26	40,44	23,86	71,28	4,86	54,07	3,51	4,53
	Artık	95,42	0,34	44,10	0,97	94,10	4,92	45,93	96,49	95,47
50	Konsantre	5,10	12,80	40,17	36,97	62,14	0,89	93,35	3,41	0,92
	Artık	94,90	0,05	44,13	0,14	94,72	5,14	6,65	96,59	99,08
100	Konsantre	4,67	12,54	40,50	36,22	63,33	0,45	83,69	3,18	0,43
	Artık	95,33	0,12	44,10	0,35	94,51	5,14	16,31	96,82	99,57
250	Konsantre	4,30	13,21	40,25	38,15	61,53	0,32	81,11	2,84	0,28
	Artık	95,70	0,14	44,10	0,40	94,47	5,13	18,89	97,16	99,72
Besleme		100,00	0,70	43,93	2,02	93,06	4,92	100,00	100,00	100,00

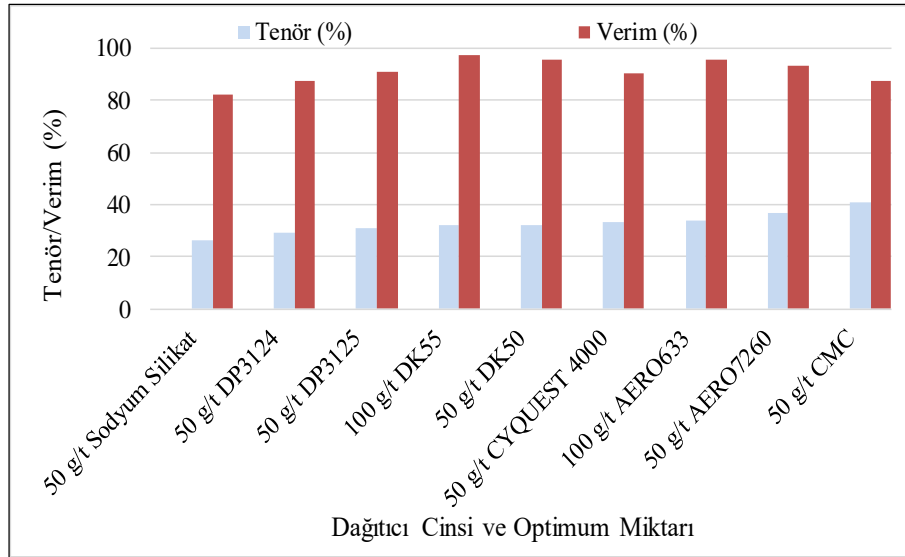
Çizelge 4.57. Düşük tenörlü cevher ile yapılan flotasyon deneylerinde CMC'nin etkisi

Bastırıcı Miktarı (g/t)	Ürünler	Ağırlık (%)	Tenör (%)		Mineral (%)			Verim (%)		
			Cu	Fe	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang	CuFeS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	Gang
0	Konsantre	4,58	8,26	40,44	23,86	71,28	4,86	54,07	3,51	4,53
	Artık	95,42	0,34	44,10	0,97	94,10	4,92	45,93	96,49	95,47
50	Konsantre	4,35	14,08	39,77	40,66	58,87	0,47	87,45	2,75	0,42
	Artık	95,65	0,09	44,12	0,27	94,61	5,12	12,55	97,25	99,58
100	Konsantre	5,46	11,34	41,03	32,74	66,75	0,51	88,38	3,91	0,57
	Artık	94,54	0,09	44,10	0,25	94,58	5,18	11,62	96,09	99,43
250	Konsantre	5,22	11,79	40,67	34,06	65,10	0,83	87,94	3,65	0,88
	Artık	94,78	0,09	44,11	0,26	94,60	5,15	12,06	96,35	99,12
Besleme		100,00	0,70	43,93	2,02	93,06	4,92	100,00	100,00	100,00



Şekil 4.75. AERO633 (g1-kalkopirit, g2-pirit), AERO7260 (h1-kalkopirit, h2-pirit) ve CMC (i1-kalkopirit, i2-pirit) miktarlarının tenör ve verime etkisi

Dağıtıcı tür ve miktarlarının etkisini, birbirleri arasında değerlendirebilmek için Şekil 4.76’da elde edilen en iyi sonuçlar tek grafikte toplanmıştır. Konsantrenin kalkopirit tenörü ve verimi açısından, konsantreye gelen kalkopirit miktarı en iyi DK55 ile elde edilmiş ve diğer reaktiflerinde önemli şekilde etkisi olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlarda, tüm reaktifler sodyum silikata göre daha iyi sonuç vermektedir. Lignosülfonat biyopolimerleri, kil minerallerinin flotasyondaki olumsuz etkilerini, pülp viskozitesini değiştirerek azaltmaktadır (Wang ve ark., 2016). Biyopolimerlerin dağıtıcı özelliği, fonksiyonel grupların içeriği, moleküler ağırlık ve karşı iyonlar gibi yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Biyopolimerlerle elde edilen sonuçlarla sülfür minerallerinin flotasyonunda çevre dostu bir alternatif bastırıcı olarak kullanılabileceği saptanmıştır.



Şekil 4.76. Kalkopirit tenörü ve verimi açısından elde edilen optimum reaktif dozajları

Çevre ve insan sağlığına olumsuz etkileri bilinen inorganik bastırıcıların yerine, doğal bozunmaya uğrayabilen, zehirli olmayan ve uzun süre depolanabilme özelliklerine sahip organik bastırıcıların flotasyonda kullanımı konusunda son yıllarda çok yoğun araştırmalar yapılmaktadır (Ekmekçi ve ark., 2006). Farklı kimyasal ve yüzey özelliklerine sahip polisakkarit bastırıcılardan karboksimetil selüloz (CMC) kalkopirit mineraline etkisinde tenör açısından en uygun bastırıcı/dağıtıcı olmuştur. CMC, dış yapısındaki OH<sup>-</sup> grupları nedeniyle oldukça yüksek negatif yüke sahiptir. Polisakkaritler, toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilen doğal organik polimerdir. Ayrıca inorganik bastırıcılardan daha ucuz ve oksidasyona karşı daha dirençlidir. Birçok farklı cevherin flotasyonunda da seçimli olarak bastırıcı potansiyeli olduğu belirtilmektedir (Liu ve ark., 2000).

Polisakkaritler hidrojen bağı, hidrofobik etkileşim ve daha çok mineral yüzeyindeki metal hidroksitlerle etkileşimleri sayesinde minerallerin yüzeyine adsorplanmaktadır. Farklı pH'larda farklı metal hidroksitlerin oluşması ve polisakkaritlerin farklı metal hidroksitlere farklı ilgi göstermesi bu polimerlerin seçimli olarak yüzeye adsorplanması ve dolayısıyla minerallerin seçimli olarak ayrılmasını sağlamaktadır. CMC gibi hem hidroksit hem de karboksil grubuna sahip olan modifikasyona uğramış polisakkaritler ise hidroksit grupları sayesinde metal hidroksitlerle, karboksil grupları sayesinde de hem metal hidroksitlerle hem de metal katyonlarıyla etkileşimleri ile yüzeye soğrulabilmektedir (Bıçak ve Ekmekçi, 2005).

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışmadan şu ana sonuçlar çıkarılmıştır:

Deneysel çalışmalarda kullanılan kalkopirit cevherinde XRD ile tanımlanan ana mineraller; kalkopirit, pirit, manyetit ve kaolin olmuştur. Yarı nicel XRD analizleri sonucunda gang mineralleri olarak kaolin, illit ve klorit türü kil mineralleri bulunduğu görülmektedir. ICP sonuçlarına göre düşük tenörlü cevher %0,70 Cu içerirken, yüksek tenörlü cevher %2,63 Cu içermektedir.

Temas açısının; kalkopirit için bazik ortamda, pirit için ise asidik ortamda arttığı belirlenmiştir. Pirit için pH'ın artmasıyla yüzeyde oksitlenme artmaktadır. En uygun toplayıcı olarak belirlenen 3418A'nın temas açısına etkileri bazik (pH 10, 11 ve 12) ortamda ve toplayıcının farklı miktarlarında ölçülmüş, maksimum temas açısı 58,4° pH 12 de 0,1 g/L toplayıcı miktarında elde edilmiştir.

Zeta potansiyeli ölçümlerinde; montmorillonit için sıfır yük noktası (syn) tespit edilemezken, kalkopirit, kaolin ve illit için tespit edilen syn noktaları sırasıyla 4,5-2,5-2,1'dir. Başlangıçta alkali pH'larda -30 ve -38 mV aralığında yüzey yüküne sahip olan kalkopiritin, 3 farklı kil mineralleri ile karıştırılmasıyla ve kil miktarı arttıkça zeta potansiyelinin kile benzer yüzey yüküne sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kalkopirit yüzeyinin zıt yüklü kil mineralleri ile elektrostatik çekim mekanizmasıyla kaplandığını göstermektedir.

%2,63 Cu tenörlü kalkopirit cevherinin flotasyon ile zenginleştirilebilirliği araştırılmış, deneylerin değerlendirilmesi sonucu; 10 dk öğütme süresi, pH 11,5 ve 5 dk pH kıvamlama süresinde en uygun kalkopirit verimi ve tenörünün elde edildiği bulunmuştur. Yüksek pH değerinde pirit minerali bastırıldığından dolayı, pH 11,5 değeri optimum olarak belirlenmiştir. Deneylerde sodyum silikat, sodyum polifosfat ve sodyum hegzametafosfat test edilmiş, 100 g/t sodyum silikat miktarı ve 3 dk kıvamlama süresi en uygun koşul olarak saptanmıştır.

Toplayıcı olarak 3418A, MX-515, HX-231, NaIPX ve KAX kullanılarak flotasyon deneyleri yapılmıştır. 3418A'nın kalkopirit için daha iyi seçiciliğe sahip olduğu, 50 g/t 3418A toplayıcı miktarı ve 3 dk toplayıcı kıvamlama süresi optimum olarak belirlenmiştir. Köpürtücü cinsinin tayini için; MIBC, DF-250, F-521, F-531 ve F-583 kullanılmış, 80 g/t MIBC köpürtücü miktarı olduğunda optimum sonuçların alındığı tespit edilmiştir. Bu koşullarda yapılan flotasyon deneylerinde; kaba konsantre %29,85 kalkopirit tenörü ve %65,97 kalkopirit verimi ile elde edilmiştir.

Kil minerallerinin kalkopirit flotasyon performansına etkisinin belirlendiği deneysel çalışmalarda, çalışılan üç kil mineralinde de cevherde artan kil içeriği konsantre tenöründe düşüşe sebep olurken konsantre verimini artırmıştır. Bu durum killerin çok ince tane boyutunda (yaklaşık  $D_{80}$  40  $\mu\text{m}$ 'nin altında) olmasından dolayı köpüğe mekanik taşınmasından kaynaklanmaktadır. Kil miktarının artmasıyla birlikte, ince boyutlu kil mineralleri su içerisinde askıda kalmakta ve köpük bölgesine doğru hareket ederek mekanik taşıma mekanizmasıyla konsantreye alınmaktadır. Kalkopirit tenörü açısından, köpük derinliği ve kil miktarının etkisi önemli flotasyon değişkenleri olarak belirlenmiştir. Köpük derinliği arttıkça konsantre tenörünün arttığı saptanmıştır. Bu da konsantreye istenmeyen değersiz minerallerin gelmesinin engellenmesi ve mekanik taşımının azalmasından kaynaklanmaktadır. Hava akış hızındaki artış konsantreye daha fazla gang minerallerinin taşınmasına neden olarak kalkopirit tenörünü genelde düşürmüştür. Köpük derinliği arttıkça flotasyon verimi azalmaktadır. Bunun nedeni, ince tanelerin (hidrofobik veya hidrofilik) seçimli olmayan bir şekilde taşınması yoluyla, kabarcıklar arası sıvının daha fazla drenajına neden olmasıdır. Hidrofobik mineral tanelerinin bazıları birleşen kabarcıklardan ayrıldığından ve bu tanelerin bazıları pülpe geri döndüğünden, flotasyon verimi azalmaktadır. Kalkopirit veriminde köpük derinliğinin artmasıyla montmorillonit ve kaolin varlığında düşüşe neden olurken, illit varlığında artış olmuştur. Kalkopirit veriminin düşmesinin diğer bir nedeni şlam kaplamadan kaynaklanmıştır. Kil tanelerinin elektrostatik çekim yoluyla birçok değerli mineralin yüzeyinin şlam kaplamasına izin vererek yüzey hidrofobikliğini azaltmıştır. Köpük derinliğinin artması, köpük fazında kabarcıktan ayrılma ihtimali yüksek olacağından, flotasyon veriminin azalması anlamına gelmektedir.

Kil minerallerinin reaktif konsantrasyonuna etkisi ile ilgili olarak, sodyum silikat ve MIBC miktarı arttıkça kalkopirit veriminde artış olmuştur. Bastırıcı ve köpürtücü miktarı, killerin kalkopirit flotasyonu üzerindeki farklı etkilerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamıştır. Kil miktarı arttıkça reaktif miktarı kullanımı artış göstermiştir.

Pirit tenörünü etkileyen önemli değişkenlerden birisi köpük derinliğidir. Üç farklı kil için oluşturulan model denklemde köpük derinliğinin artmasının pirit tenörünü azalttığı sonucuna varılmıştır. Kil miktarının artması; montmorillit ilavesiyle pirit tenörünü artırırken, illit ve kaolin için etkili değişken arasında yer almadığı belirlenmiştir. Köpük derinliğinin artmasıyla pirit verimi düşerken, kil miktarının artmasıyla pirit veriminde artış gözlenmiştir. 3 farklı kil minerali arasında sadece kaolin ilavesinde, dağıtıcı miktarı önemli değişken olarak belirlenmiş ve dağıtıcı miktarının artmasıyla pirit tenör ve verimi azalmıştır.

Dinamik köpük kararlılığı tüm kil minerallerinin artmasıyla artmıştır. Kil minerallerinin dinamik köpük kararlılığına etkisinde köpürtücü miktarı, köpük derinliği ve hava akış hızı önemli değişkenler olarak belirlenmiştir. Her üç kil için de köpürtücü miktarının ve köpük derinliğinin artmasıyla kararlılık artarken; hava akış hızının artması kararlılık üzerinde ters etkiye sebep olmuştur. Montmorillonit ilavesiyle pülp viskozitesinin artmasıyla, dinamik köpük kararlılığı artmıştır. Dinamik köpük kararlılığı ve kil miktarı arasında güçlü bir ilişki olduğu saptanmıştır. Köpük derinliğini artırmak, köpük tutma süresini aynı zamanda dinamik köpük kararlılığını da artırmıştır. Bu nedenle, köpük derinliği arttıkça, ortalama kabarcık çapında artış görülmüştür. Hava akış hızı, köpük kalma sürelerini değiştirerek dinamik köpük kararlılığını azaltmıştır.

En iri kabarcık çapı montmorillonit ilavesiyle olmuştur. Kabarcık çapı arttıkça, yüzey alanı da azalmıştır. Böylelikle, kabarcıklar arasında daha fazla su taşınmaktadır. Hava kabarcıklarına tutunamayan ince taneler, su ile birlikte köpük içine seçimli olmayacak bir şekilde taşınacağından, köpük içindeki aşırı miktardaki su, konsantre tenörünü önemli şekilde düşürmüştür. Kabarcık büyüklüğü veya bir hücredeki kabarcık miktarı, köpürtücü tipine ve miktarına bağlıdır. Kil minerallerinin kabarcık çapına etkisinde; montmorillonit ile 0,96-1,29 mm çaplarında ortalama 1,09 mm kabarcık, illit ile 0,56-0,67 mm çaplarında ortalama 0,62 mm kabarcık ve kaolin ile 0,53-0,87 mm çaplarında ortalama 0,63 mm kabarcık elde edilmiştir. 2 ve 3 cm köpük derinliğinde üretilen kabarcıkların büyüklüğü 1 cm köpük derinliğinde üretilen kabarcıktan daha büyüktür. Hava akış hızı arttıkça, tüm kil minerallerinin varlığında kabarcık çapı azalmıştır. Kabarcıkların boyutları büyüdükçe pülp içindeki yükselme hızları artmış ve hareketleri düzensizleşip kararsızlaşmıştır.



Kil minerallerinin (montmorillonit, illit ve kaolin) kalkopirit flotasyonuna etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, kil türlerinin farklı sorunlara neden olduğu tespit edilmiştir. Montmorillonit varlığında kalkopirit tenörünün önemli derecede azaldığı sonucuna varılmıştır. İnce tane boyutundaki kaolin ve illit taneleri, daha küçük kabarcık boyutu ve daha yüksek dinamik köpük kararlılığı ile mekanik taşımaya neden olmuştur.

Montmorillonitin, illit ve kaoline göre yapısal farkı; tane yapısı, şişme davranışı ve kation değişim kapasitesidir. Montmorillonit su içinde şişerken, artan viskozite ile suyun köpük bölgesine daha fazla taşınmasına neden olmaktadır. Montmorillonit daha büyük kation değişim kapasitesine sahip olması ve kalkopirit tenör ile veriminde daha fazla etki göstermesi, farklı iyon değişim kapasiteleri ile de açıklanabilir. Sudaki iyonların varlığı, killerin şlam kaplama oluşumunu etkileyebilir. Kalkopirit yüzeyinde montmorillonit kaplama yaparak, kalkopirit tanelerinin hidrofobikliğin azaldığı ve kabarcık tane adsorpsiyonunun engellendiği varsayılmıştır.

Kalkopirit flotasyonunda kil minerallerinden etkilenen diğer parametre hız sabiti olmuştur. Flotasyon kinetiği deneylerinde tüm kil minerallerinin ilavesinde k sabiti önemli derecede düşerek, flotasyon hızını yavaşlatmıştır. Montmorillonit ile daha yüksek k sabiti elde edilmesine rağmen, kalkopirit tenörü ve verimi açısından en kötü sonuçlar montmorillonit ile elde edilmiştir.

Mekanik taşıma deneylerinde her kil minerali için, %5 kil miktarından sonra konsantre tenörü düşerken; kalkopirit verimi, su verimi ve gerçek verim artmıştır. Kil miktarının artması, konsantreye aşırı miktarda mekanik olarak ince boyutlu susever minerallerin taşınmasına, bu nedenle konsantre tenörünün düşmesine ve kalkopirit verimi, su verimi ve gerçek verimin artmasına sebep olmuştur.

FTIR spektrum analizi, 3418A'nın kalkopirit yüzeyine adsorbe olduğunda kimyasal adsorpsiyonun ve hidrofobik  $\text{Cu}(\text{DTPI})_2$  ile  $(\text{DTPI})_2$ 'nin meydana geldiğini göstermektedir. Cevherde 500-700  $\text{cm}^{-1}$  dalga aralığında pik görülmezken, kil ilavesi ile 1020-500  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayısı aralığında Si-O bağları gözlenmiştir.

SEM-EDS çalışması ile kalkopirit yüzeyinde kil elementlerinin varlığına dair kanıt sağlanmıştır. Killerin içerdiği farklı elementler konsantrede artmıştır. Toplayıcı deneylerden elde edilen konsantre içindeki bu elementlerin toplam konsantrasyonları kaolin>montmorillonit>illit şeklinde olmuştur. Toplayıcısız deneylerden elde edilen konsantredeki bu elementler daha da artmıştır. Bu sonuçlar göstermiştir ki, kaolin ilavesiyle mekanik taşınmaya daha fazla sebebiyet vermiştir.

İyileştirme deneylerinde farklı bastırıcıların kalkopirit flotasyonu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Biyopolimerlerle elde edilen sonuçlarla sülfür minerallerinin flotasyonunda çevre dostu bir alternatif bastırıcı olarak kullanılabilceği saptanmıştır. DK50'nin kalkopirit mineraline etkisinde verim açısından en uygun bastırıcı/dağıtıcı olmuş ve DK50 sülfürlü cevherde gang mineralleri olarak bulunan kil minerallerinin (özellikle kaolin) için çok yönlü bir dağıtıcı özelliğine sahip olduğu firma tarafından bildirilmiştir. Farklı kimyasal ve yüzey özelliklerine sahip polisakkarit bastırıcılardan karboksimetil selüloz (CMC) kalkopirit mineraline etkisinde tenör açısından en uygun bastırıcı/dağıtıcı olmuştur.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında yapısal özellikleri farklı üç kil türünün bakır cevheri içinde farklı oranlarda bulunması durumu flotasyon işletme koşullarıyla ilişkilendirilerek flotasyon verimi/tenörü üzerindeki etkilerinin matematiksel olarak modellenmesi yapılmıştır. Etkin bir flotasyon için kil tipi ve oranına bağlı olarak uygulanabilecek flotasyon şartları matematiksel olarak ortaya konulmaya çalışılmıştır. Böylece tesis içerisinde zamanla değişen kil oranına bağlı olarak modelde yer alan çalışma parametrelerinde yapılabilecek değişiklikler ile flotasyon sonucunda ulaşılabilir verim ve tenör değerlerinin öngörüsü sağlanabilecektir.

Ayrıca elde edilen genel bulgular çerçevesinde kil minerallerinin kalkopirit flotasyonuna etkisini en aza indirmek için yapılması gerekenler;

- Cevherde kil içeriği artınca köpük derinliği artırılmalı ve konsantreye istenmeyen değersiz minerallerin taşınması engellenmelidir.
- Hava akış hızındaki artış kalkopirit tenörünü düşürmüştü; fakat kalkopirit verimini artırmıştır. Bu durum, konsantreye daha fazla gang minerallerinin taşınmasından kaynaklanmıştır. Hava akış hızı, köpük akış hızını değiştirerek dinamik köpük kararlılığını ciddi şekilde azalmasına sebep olmuştur. Bu yüzden kil içeriği arttıkça düşük hava akış hızlarında çalışılması gerekmektedir.
- Kil minerallerinin ağırlıkça oranı arttıkça reaktif tüketimi artmış; sodyum silikat ve MIBC miktarı arttıkça kalkopirit verimi artmıştır. Bu sonuçlarla cevherdeki kil minerali içeriği ve miktarına bağlı olarak, reaktif konsantrasyonunun kontrol altında olması ihtiyacı duyulmaktadır.

- Montmorillonit içeriği yüksek olan cevherlerde flotasyon verimini artırmak için pülp viskozitesi azaltılmalı ve viskozite düzenleyiciler kullanılmalı; yüksek kaolin ve illit içeren cevherlerde ise konsantre tenörünü artırmak ve mekanik taşımayı azaltmak gerekmektedir.

## 5.2. Öneriler

Bu tez çalışmasında, çalışılan her bir kil cinsi için (kaolin, montmorillonit, illit) kil oranı ve çalışılan diğer flotasyon değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak flotasyon verimi ve/veya konsantre tenörü ampirik modellerle tanımlanmıştır. Ancak cevherleşmeler kendi içerisinde birden fazla kil mineralini birlikte içermektedir. Bu nedenle her bir kilin birlikte ve farklı oranlarda cevherleşme içinde bulunması halinde ampirik modellerin geliştirilmesi bu çalışmanın devamı açısından önem taşımaktadır.

Cevherleşmeler bölgeden bölgeye değişen yapısal özellikler arz etmekte ve bu durum onların zenginleştirilmelerinde mevcut rezerve yönelik spesifik farklılıklar gerektirmektedir. Bu nedenle elde edilen bulguların farklı cevherleşmelere ait numuneler üzerinde test edilerek modellerin doğrulanması veya optimize edilmesi de bu tez çalışmasında elde edilen bulguların yaygın etkisini geliştirecektir.

Flotasyon çok sayıda değişkeni bünyesinde bulunduran kompleks bir zenginleştirme yöntemidir. Çalışılan deneysel parametrelere ek olarak katı oranı, karıştırma hızı vb. fiziksel değişkenlerin de model içerisinde ele alınması hem modelin temsil niteliği açısından hem de literatürü destekleyici bulguların genişlemesi açısından faydalı olacaktır.

Etkili flotasyon sürecinin varsayımlarından biri, flotasyon reaktifleri yönetiminde doğru bir şekilde geliştirilmiş stratejidir. Bu çalışmada toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilen doğal organik polimer olan polisakkaritlerin bastırıcı olarak etkin bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir. Ancak farklı yapıdaki polisakkaritlerin minerallere adsorpsiyon mekanizmaları tam olarak açıklanmamıştır. Bu konuda daha detaylı çalışmaların yapılması gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

- Akıncı, Ö., 1968, Seramik killeri ve jeolojisi, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 71 (71).
- Aksoy, B. and Yarar, B., 1989, Natural hydrophobicity of native gold flakes and their flotation under different conditions, *In: Processing of complex ores, Eds: Elsevier*, p. 19-27.
- Aslan, A., 1996, Subvolkanik kompleks polimetalik sülfürlü cevherlerde birincil şlam ve kilin özellikleri ve flotasyon seçimliliğine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Atak, S., 1990, Flotasyon ilkeleri ve uygulaması, *İstanbul Teknik Üniversitesi Vakfı*, Kitap Yayın No:34.
- Azizi, A., 2015, Optimization of rougher flotation parameters of the Sarcheshmeh copper ore using a statistical technique, *Journal of Dispersion Science Technology*, 36 (8), 1066-1072.
- Baba, A. A., Ayinla, K. I., Adekola, F. A., Ghosh, M. K., Ayanda, O. S., Bale, R. B., Sheik, A. R. and Pradhan, S. R., 2012, A review on novel techniques for chalcopryrite ore processing, *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, 1 (1), 1-16.
- Bakker, C. W., Meyer, C. J. and Deglon, D. A., 2009, Numerical modelling of non-Newtonian slurry in a mechanical flotation cell, *Minerals Engineering*, 22 (11), 944-950.
- Barbian, N., Ventura-Medina, E. and Cilliers, J., 2003, Dynamic froth stability in froth flotation, *Minerals Engineering*, 16 (11), 1111-1116.
- Basnayaka, L., Subasinghe, N. and Albijanic, B., 2017, Influence of clays on the slurry rheology and flotation of a pyritic gold ore, *Applied Clay Science*, 136, 230-238.
- Bayoğlu, Y., 2013, Eskişehir-Kaymaz epitermal altın cevherleri üzerinde çevreye duyarlı nitelikli ön zenginleştirme yöntemlerinin araştırılması, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Bayraktar, İ., 2014, Some considerations in mineral processing plant design, *Proc. 14th Int. Miner. Process. Symp.*, Kuşadası, Turkey, 35-45.
- Bıçak, Ö. ve Ekmekçi, Z., 2005, Polisakkaritlerin flotasyonda bastırıcı olarak kullanımı ve soğurum mekanizmaları, *Madencilik*, 44-1, 19-31.
- Bishop, J. L., Pieters, C. M. and Edwards, J. O., 1994, Infrared spectroscopic analyses on the nature of water in montmorillonite, *Clays and clay minerals*, 42 (6), 702-716.
- Bremmell, K. E., Fornasiero, D. and Ralston, J., 2005, Pentlandite-lizardite interactions and implications for their separation by flotation, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 252 (2), 207-212.

- Bulatovic, S., 2007, Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice: Volume 1: Flotation of sulfide ores, Boston, *Elsevier*.
- Bulatovic, S. M., Wyslouzil, D. M. and Kant, C., 1998, Operating practices in the beneficiation of major porphyry copper/molybdenum plants from Chile: innovated technology and opportunities, a review, *Minerals Engineering*, 11 (4), 313-331.
- Bulatovic, S., Wyslouzil, D. M. and Kant, C., 1999, Effect of clay slimes on copper, molybdenum flotation from porphyry ores, *Proceedings of the Copper*, 95-111.
- Bulut, G., 1999, Piritlerin flotasyon davranışı ve yüzey özellikleri, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Cao, M. and Liu, Q., 2006, Reexamining the functions of zinc sulfate as a selective depressant in differential sulfide flotation-The role of coagulation, *Journal of Colloid and Interface Science*, 301 (2), 523-531.
- Chander, S. and Briceno, A., 1987, Kinetics of pyrite oxidation, *Mining, Metallurgy Exploration*, 4 (3), 171-176.
- Chanturia, V., Ivanova, T. and Koporulina, E., 2009, Interaction of sodium diisobutyl dithiophosphinate and platinum in aqueous solutions and on sulphide surface, *Journal of mining science*, 45 (2), 164-172.
- Chen, X. and Peng, Y., 2018, Managing clay minerals in froth flotation-A critical review, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 39 (5), 289-307.
- Çilek, E. and Umucu, Y., 2001, A statistical model for gangue entrainment into froths in flotation of sulphide ores, *Minerals Engineering*, 14(9), 1055-1066.
- Çilek, E., Akçıl, A. ve Özgen, S., 2009, Ultrasonik dalganın ince boyutlu tanelerin flotasyonu üzerine etkisi ve ultrasonik dalga uygulanan kolon ve mekanik flotasyonun köpük ve pulp bölgelerinin modellenmesi, *TÜBİTAK Projesi*, Isparta.
- Çilek, E. C., 2006, Mineral flotasyonu, *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, Isparta.
- Çilek, E. C. and Karaca, S., 2015, Effect of nanoparticles on froth stability and bubble size distribution in flotation, *International Journal of Mineral Processing*, 138, 6-14.
- Çilek, E. C. and Uysal, K., 2018, Froth stabilisation using nanoparticles in mineral flotation, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 54 (3), 878-889.
- Deng, W., Xu, L., Tian, J., Hu, Y. and Han, Y., 2017, Flotation and adsorption of a new polysaccharide depressant on pyrite and talc in the presence of a pre-adsorbed xanthate collector, *Minerals*, 7 (3).

- Edwards, C., Kipkie, W. and Agar, G., 1980, The effect of slime coatings of the serpentine minerals, chrysotile and lizardite, on pentlandite flotation, *International Journal of Mineral Processing*, 7 (1), 33-42.
- Ekmekçi, Z. ve Demirel, H., 1997, Palp potansiyeli ve galvanik etkileşimin kalkopirit-pirit flotasyonuna etkisi, *Türkiye 15 Madencilik Kongresi*.
- Ekmekçi, Z., Can, M., Sutterland, D., Aslan, A., Bağcı, E. ve Ökten, Ç., 2005, Flotasyonda palp kimyasındaki değişimlerin köpük fazına etkilerinin görüntü analiz sistemi ile belirlenmesi, *TÜBİTAK Projesi*, Ankara.
- Ekmekçi, Z., Bıçak, Ö. ve Bağcı, E., 2006, Sülfürlü minerallerin flotasyonunda polisakkaritlerin kullanımı, *TÜBİTAK PROJE NO: 104M361*, Ankara.
- Elkhalifah, A. E. I., Murugesan, T. and Bustam, M. A., 2011, Characterization of different cationic forms of montmorillonite by FTIR, XRD and TGA techniques, *2011 National Postgraduate Conference*, 1-6.
- Eşgün, S., 2006, Siirt-Madenköy cevherinin flotasyon yöntemi ile zenginleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Evcin, A. ve Kavas, T., 2004, Söğüt ve Konya killlerinden hazırlanan çamurların viskozitesine farklı deflokulantların etkilerinin incelenmesi, *5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 120-124.
- Farrokhpay, S., 2011, The significance of froth stability in mineral flotation-A review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 166 (1), 1-7.
- Farrokhpay, S. and Bradshaw, D., 2012, Effect of clay minerals on froth stability in mineral flotation-A review, *XXVI. IMPC, New Delhi, India* (313).
- Farrokhpay, S., Morris, G. E. and Britcher, L. G., 2012, Stability of sodium polyphosphate dispersants in mineral processing applications, *Minerals Engineering*, 39, 39-44.
- Farrokhpay, S. and Zanin, M., 2012, An investigation into the effect of water quality on froth stability, *Advanced Powder Technology*, 23 (4), 493-497.
- Farrokhpay, S. and Ndlovu, B., 2013, Effect of phyllosilicate minerals on the rheology, colloidal and flotation behaviour of chalcopyrite mineral, *Chemeca : Challenging Tomorrow*, 733.
- Feng, B., Lu, Y., Feng, Q., Zhang, M. and Gu, Y., 2012, Talc-serpentine interactions and implications for talc depression, *Minerals Engineering*, 32, 68-73.
- Forbes, E., Davey, K. J. and Smith, L., 2014, Decoupling rheology and slime coatings effect on the natural flotability of chalcopyrite in a clay-rich flotation pulp, *Minerals Engineering*, 56, 136-144.

- Fuerstenau, D., Gaudin, A. and Miaw, H., 1958, Iron oxide slime coatings in flotation, *Trans. AIME*, 211, 792-793.
- Gaudin, A., Fuerstenau, D. and Miaw, H., 1960, Slime coatings in galena flotation, *CIM Bulletin*, 53, 960-963.
- Gong, J., Peng, Y., Bouajila, A., Ourriban, M., Yeung, A. and Liu, Q., 2010, Reducing quartz gangue entrainment in sulphide ore flotation by high molecular weight polyethylene oxide, *International Journal of Mineral Processing*, 97 (1), 44-51.
- Guan, F., Zhong, H., Liu, G., Zhao, S. and Xia, L., 2009, Flotation of aluminosilicate minerals using alkylguanidine collectors, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19 (1), 228-234.
- Guggenheim, S. and Martin, R. T., 1995, Definition of clay and clay mineral: joint report of the AIPEA and CMS Nomenclature Committees, *Clay Minerals*, 30 (3), 257-259.
- Güler, T., Hiçyılmaz, C. and Akdemir, Ü., 1999, Sivas-Nasır selestit-kalsit cevheri flotasyonunda köpürtücülerin etkisi, *Türkiye 16. Madencilik Kongresi*.
- Güler, T., Hiçyılmaz, C., Gökağaç, G. and Ekmeçi, Z., 2006, Adsorption of dithiophosphate and dithiophosphate on chalcopyrite, *Minerals Engineering*, 19 (1), 62-71.
- Gülgönül, İ., Özdemir, O., Mart, U. ve Çelik, M. S., 1995, Üleksitin anyonik flotasyonunda şlamın etkileşim mekanizması, *Madencilik*.
- He, M., Addai-Mensah, J. and Beattie, D., 2009, The influence of polymeric dispersants on sericite-chalcocite particle interactions in aqueous media, *Chemical Engineering Journal*, 152 (2), 471-479.
- Hou, J., Li, H., Zhu, H. and Wu, L., 2009, Determination of clay surface potential: a more reliable approach, *Soil Science Society of America Journal*, 73 (5), 1658-1663.
- Huynh, L., Feiler, A., Michelmore, A., Ralston, J. and Jenkins, P., 2000, Control of slime coatings by the use of anionic phosphates: A fundamental study, *Minerals Engineering*, 13 (10), 1059-1069.
- Jorjani, E., Barkhordari, H. R., Tayebi Khorami, M. and Fazeli, A., 2011, Effects of aluminosilicate minerals on copper-molybdenum flotation from Sarcheshmeh porphyry ores, *Minerals Engineering*, 24 (8), 754-759.
- Kılıçkaplan, I., 2009, Effect of pulp rheology on flotation: the nickel sulfide ore with asbestos gangue system, *University of British Columbia, Vancouver*.
- Kitchener, J., 1973, Surface forces in the deposition of small particles, *Journal of the Society of Cosmetic Chemists*, 24 (11), 709-725.

- Kou, J., Xu, G., Tao, D., Dopico, P. G., Hines, J. and Kennedy, D. J., 2012, Phosphate flotation enhancement using clay binder, *Beneficiation of Phosphates: New Thought, New Technology, New Development*, 335.
- Kökkılıç, O., 2011, Falcon santrifüjli gravite ayırıcısında zenginleştirmenin modellenmesi, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Kurniawan, A. U., Ozdemir, O., Nguyen, A. V., Ofori, P. and Firth, B., 2011, Flotation of coal particles in MgCl<sub>2</sub>, NaCl, and NaClO<sub>3</sub> solutions in the absence and presence of Dowfroth 250, *International Journal of Mineral Processing*, 98 (3), 137-144.
- Laskowski, J. S. and Pugh, R. J., 1992, Dispersions stability and dispersing agents, In: *Developments in mineral processing*, Eds, *Amsterdam: Elsevier*, p. 115-171.
- Le, T. N., Phan, C. M., Nguyen, A. V. and Ang, H. M., 2012, An unusual synergistic adsorption of MIBC and CTAB mixtures at the air-water interface, *Minerals Engineering*, 39, 255-261.
- Liu, D. and Peng, Y., 2014, Reducing the entrainment of clay minerals in flotation using tap and saline water, *Powder Technology*, 253, 216-222.
- Liu, Q., Wannas, D. and Peng, Y., 2006, Exploiting the dual functions of polymer depressants in fine particle flotation, *International Journal of Mineral Processing*, 80 (2-4), 229-254.
- Liu, Q., Zhang, Y. and Laskowski, J. S., 2000, The adsorption of polysaccharides onto mineral surfaces: an acid/base interaction, *International Journal of Mineral Processing*, 60, 244-245.
- Luckham, P. F. and Rossi, S., 1999, The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions, *Advances in Colloid and Interface Science*, 82 (1), 43-92.
- Lyu, F., Gao, J., Sun, N., Liu, R., Sun, X., Cao, X., Wang, L. and Sun, W., 2019, Utilisation of propyl gallate as a novel selective collector for diasporite flotation, *Minerals Engineering*, 131, 66-72.
- Malayoğlu, U. ve Akar, A., 1995, Killerin sınıflandırmasında ve kullanım alanlarının saptanmasında aranan kriterlerin irdelenmesi, *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 125-133.
- Mineralogy, 2010, <http://www.webmineral.com>, [Ziyaret Tarihi:5 Aralık 2010].
- Monte, M. B. M., Lins, F. F. and Oliveira, J. F., 1997, Selective flotation of gold from pyrite under oxidizing conditions, *International Journal of Mineral Processing*, 51 (1), 255-267.



- Moolman, D., Eksteen, J., Aldrich, C. and Van Deventer, J., 1996, The significance of flotation froth appearance for machine vision control, *International Journal of Mineral Processing*, 48 (3-4), 135-158.
- Murray, H., 1999, Applied clay mineralogy today and tomorrow, *Clay minerals*, 34 (1), 39-49.
- Ndlovu, B., Forbes, E., Farrokhpay, S., Becker, M., Bradshaw, D. and Deglon, D., 2014, A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals, *Minerals Engineering*, 55, 190-200.
- Norori-McCormac, A., Brito-Parada, P., Hadler, K., Cole, K. and Cilliers, J., 2017, The effect of particle size distribution on froth stability in flotation, *Separation Purification Technology*, 184, 240-247.
- Oats, W. J., Ozdemir, O. and Nguyen, A. V., 2010, Effect of mechanical and chemical clay removals by hydrocyclone and dispersants on coal flotation, *Minerals Engineering*, 23 (5), 413-419.
- Özcan, A. S., 2010, Doğal bentonitin karakterizasyonu ve kurşun (II) iyonlarını adsorpsiyon yeteneği, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12 (2), 85-97.
- Özdemir, O., Çinku, K., Uslu, T., Kılıç, E. ve Çelik, M. S., 2013, Taşkömürü ve linyit kömürlerinin tuzlu su içerisinde flotasyon davranışları, *AKÜ Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13, 1-14.
- Özer, H., 2007, Oksit flotasyonunda tane boyutu, hidrofobiklik, köpük yapısı ve mekanik taşıma arasındaki ilişki, Yüksek Lisans Tezi, *SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Özgen, T., 2014, An investigation of the flotation behaviour of the sulphide gold ores, Degree of Master of Science, *Institute of Science of Hacettepe University*, Ankara.
- Özmetin, E., 2009, İllit mineralinin elektrokinetik özelliklerinin belirlenmesi, *CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, Manisa, 1-11.
- Öztürk, Y. E., 2012, Kil mineralleri açısından ince daneli zeminlerin fizikokimyasal özellikleri ile kıvam limitleri arasındaki ilişkiler, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Niğde*.
- Patra, P., Nagaraju, D. and Somasundaran, P., 2011, Impact of pulp rheology on selective recovery of value minerals from ores, *Proceedings of the XI International Seminar on Mineral Processing Technology (MPT-2010)*, 1223-1231.
- Patra, P., Bhambhani, T., Nagaraj, D. and Somasundaran, P., 2012, Impact of pulp rheological behavior on selective separation of Ni minerals from fibrous serpentine ores, *Colloids Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, 411, 24-26.

- Peng, Y. and Zhao, S., 2011, The effect of surface oxidation of copper sulfide minerals on clay slime coating in flotation, *Minerals Engineering*, 24 (15), 1687-1693.
- Petruk, W., 2000, Applied mineralogy: Porphyry copper deposits, In: Applied Mineralogy in the Mining Industry, Eds: Petruk, W., Elsevier, Amsterdam, p. 135-147.
- Piantadosi, C., Jasieniak, M., Skinner, W. M. and Smart, R. S. C., 2000, Statistical comparison of surface species in flotation concentrates and tails from TOF-SIMS evidence, *Minerals Engineering*, 13 (13), 1377-1394.
- Reyes-Bozo, L., Herrera-Urbina, R., Escudey, M., Godoy-Faúndez, A., Sáez-Navarrete, C., Herrera, M. and Ginocchio, R., 2011, Role of biosolids on hydrophobic properties of sulfide ores, *International Journal of Mineral Processing*, 100 (3), 124-129.
- Roonasi, P., Yang, X. and Holmgren, A., 2010, Competition between sodium oleate and sodium silicate for a silicate/oleate modified magnetite surface studied by in situ ATR-FTIR spectroscopy, *Journal of Colloid and Interface Science*, 343 (2), 546-552.
- Sağol, E., 2015, İstatistiksel deney tasarımının Çayırhan bölgesi linyitlerinin flotasyonunda uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi*, Eskişehir.
- Savaş, H., 2000, Toprak dolgu barajlarda kullanılan yüksek plastisiteli killerin dispersibilite özelliğinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi*, Eskişehir.
- Seaman, D., Lauten, R., Kluck, G. and Stoitis, N., 2012, Usage of anionic dispersants to reduce the impact of clay particles in flotation of copper and gold at the Telfer Mine, *Proceedings of the 11th AusIMM Mill Operators' Conference*, Hobart, Australia, 29-31.
- Senior, G. D. and Thomas, S. A., 2005, Development and implementation of a new flowsheet for the flotation of a low grade nickel ore, *International Journal of Mineral Processing*, 78 (1), 49-61.
- Shabalala, N., Harris, M., Leal Filho, L. and Deglon, D., 2011, Effect of slurry rheology on gas dispersion in a pilot-scale mechanical flotation cell, *Minerals Engineering*, 24 (13), 1448-1453.
- Sihvonen, T., 2012, Determination of collector chemicals from flotation process waters using capillary electrophoresis, Master's thesis, *Lappeenranta Teknillinen Yliopisto*.
- Song, S., Lopez-Valdivieso, A. and Espinoza-Ortega, O., 2009, Role of sodium hexametaphosphate in the flotation of acanthite fines from finely disseminated ores, *Separation Science and Technology*, 44 (12), 2971-2982.

- Stanojlović, R. D. and Sokolović, J. M., 2014, A study of the optimal model of the flotation kinetics of copper slag from copper mine Bor, *Archives of Mining Sciences*, 59 (3), 821-834.
- Sun, S. C., 1943, The mechanism of slime coating, *Trans. AIME*, 153, 479-492.
- Swartzen-Allen, S. L. and Matijevic, E., 1974, Surface and colloid chemistry of clays, *Chemical Reviews*, 74 (3), 385-400.
- Szyszkka, D., 2014, Measurement of contact angle of copper-bearing shales using the captive bubble method, *Mining Science*, 21.
- Şen, S. ve Çilingir, Y., 2009, CuSO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>S ve farklı toplayıcı birleşimlerinin kullanımının altın flotasyonu üzerindeki etkisinin belirlenmesi, *Yerbilimleri Dergisi*, 30 (2), 105-112.
- Tao, D., Dopico, P., Hines, J. and Kennedy, D., 2010, An experimental study of clay binders in fine coal froth flotation, *Proceedings of the International Coal Preparation Congress*, 478-487.
- Termes, S. and Richardson, P., 1986, Application of FT-IR spectroscopy for in situ studies of sphalerite with aqueous solutions of potassium ethyl xanthate and with diethyldixanthogen, *International Journal of Mineral Processing*, 18 (3-4), 167-178.
- Toklu, H. Ö. ve Çilek, E. C., 2010, Kuyucak yöresine ait barit cevherinin flotasyonla zenginleştirilmesi, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 49 (3), 23-29.
- Trahar, W. J., 1981, A rational interpretation of the role of particle size in flotation, *International Journal of Mineral Processing*, 8 (4), 289-327.
- Uribe, L., Gutierrez, L. and Jerez, O., 2016, The depressing effect of clay minerals on the floatability of chalcopyrite, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 37 (4), 227-235.
- USGS, 2013, <http://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/htmldocs/clays>, [Ziyaret Tarihi: 5 Aralık 2013].
- Ünal, İ. H., Tuncel, S., Yücel, M. B., Yoleri, B. ve Arslan, M., 2016, Türkiye ve dünyada bakır, *MTA*, Ankara.
- Visser, P. R., Coetzee, M. L. and Kendall, S. G., 1994, Flotation of autogenously milled material, *Minerals Engineering*, 7 (2-3), 357-369.
- Wang, L., 2016, Entrainment of fine particles in froth flotation, Doctoral Thesis, *The University of Queensland*, Australia.
- Wang, Y., Peng, Y., Nicholson, T. and Lauten, R. A., 2015, The different effects of bentonite and kaolin on copper flotation, *Applied Clay Science*, 114, 48-52.

- Wang, Y., Peng, Y., Nicholson, T. and Lauten, R. A., 2016, The role of cations in copper flotation in the presence of bentonite, *Minerals Engineering*, 96-97, 108-112.
- Wei, R., Peng, Y. and Seaman, D., 2013, The interaction of lignosulfonate dispersants and grinding media in copper-gold flotation from a high clay ore, *Minerals Engineering*, 50-51, 93-98.
- Wen, W. W. and Sun, S., 1977, Electrokinetic study on the amine flotation of oxidized coal, *Transactions of AIME*, 262 (2).
- Xu, D., Ametov, I. and Grano, S. R., 2011, Detachment of coarse particles from oscillating bubbles-The effect of particle contact angle, shape and medium viscosity, *International Journal of Mineral Processing*, 101 (1), 50-57.
- Xu, D., Ametov, I. and Grano, S. R., 2012, Quantifying rheological and fine particle attachment contributions to coarse particle recovery in flotation, *Minerals Engineering*, 39, 89-98.
- Zhang, L., 2013, Enhanced phosphate flotation using novel depressants, *University of Kentucky*, Kentucky.
- Zhang, M. and Peng, Y., 2015, Effect of clay minerals on pulp rheology and the flotation of copper and gold minerals, *Minerals Engineering*, 70, 8-13.
- Zhao, H., Bhattacharjee, S., Chow, R., Wallace, D., Masliyah, J. H. and Xu, Z., 2008, Probing surface charge potentials of clay basal planes and edges by direct force measurements, *Langmuir*, 24 (22), 12899-12910.
- Zhao, K., Gu, G., Wang, H., Wang, C., Wang, X. and Luo, C., 2015, Influence of depressant foenum-graecum on the flotation of a sulfide ore which contains hydrophobic gangue, *International Journal of Mineral Processing*, 141, 68-76.
- Zhong, H., Huang, Z., Zhao, G., Wang, S., Liu, G. and Cao, Z., 2015, The collecting performance and interaction mechanism of sodium diisobutyl dithiophosphate in sulfide minerals flotation, *Journal of Materials Research and Technology*, 4 (2), 151-161.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Hasan Ali TANER  
**Uyruğu** : Türkiye Cumhuriyeti  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Konya/12.03.1986  
**Telefon** : +90 543 533 2181  
**E-Posta** : hataner@ktun.edu.tr

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Akseki Şahinler Ç.P.L., Akseki, Antalya	2003
Üniversite	: Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak	2008
Yüksek Lisans	: Bülent Ecevit Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim dalı, Zonguldak	2012
Doktora	: Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Anabilim dalı, Konya	2019

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2008-2009	Burdur Krom ve Mad.	Maden Mühendisi
2009-2010	Alagözler Kum Çakıl Tic.	Teknik Nezaretçi
2010-2011	Marfam Madencilik	Teknik Nezaretçi
2011-2012	İnönü Üniversitesi Maden Müh. Böl.	Araştırma Görevlisi
2012-2018	Selçuk Üniversitesi Maden Müh. Böl.	Araştırma Görevlisi
2018-devam ediyor.	Konya Teknik Üniv. Maden Müh. Böl.	Araştırma Görevlisi

### YABANCI DİLLER

İngilizce

## YAYINLAR

1. Taner, H. A., Toroğlu, İ., 2012, Dikey pinli karıřtırılmalđ değirmende mermer artıklarının kuru öğütölmesi ve bazı çalışma parametrelerinin öğütme verimine etkisi, *MERSEM'2012 8. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi*, Afyon.
2. Taner, H. A., Toroğlu, İ., 2013, Effect of operational parameters on the particle size distribution of marble wastes in stirred media mill, *MPES 2013 Mine Planning and Equipment Selection*, Dresden, Germany.
3. Taner, H. A., Önen, V., 2014, Taşkömürü artıklarının susuzlandırılmasında polimerlerin etkisi, *Türkiye 19. Kömür Kongresi*, Zonguldak.
4. Taner, H. A., Önen, V., 2016, Killerin pölöp ortamındaki davranışı ve flotasyona etkisi, *Madencilik TMMOB Maden Mühendisleri Odası Dergisi*, 55(2), 45-51.
5. Taner, H. A., Ağaçayak, T., Aras, A., 2016, Leaching of zinc and manganese from spent zinc-carbon batteries in acetic acid solution, *Selcuk University, Journal of Engineering, Science&Technology*, 4(3), 231-236.
6. Taner, H. A., Önen, V., 2016, Control of clay minerals effect in flotation: A Review, *MEC 2016 Mineral Engineering Conference*, Swieradow-Zdroj, Poland.
7. Taner, H. A., Ağaçayak, T., Aras, A., 2016, Determination of dissolution kinetics of manganese and zinc from spent zinc-carbon batteries in acidic media, *INES 2016 1<sup>st</sup> International Academic Research Congress*, Antalya.
8. Önen, V., Taner, H. A., 2016, Effects of pH and coagulant-flocculant combinations on settling behaviour of Na Bentonite suspensions, *ISCAS 2016 Selçuk International Scientific Conference on Applied Sciences*, Antalya.
9. Önen, V., Göçer, M., Taner, H. A., 2018, Effect of coagulants and flocculants on dewatering of kaolin suspensions, *Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 7(1), 297-305.
10. Toroğlu, İ., Taner, H.A., Bilen, M., Kizgut, S., Çuhadaroglu, D., Yilmaz, S., 2018, Investigation of usage potential for marble wastes as calcite, *EurAsia Waste Management Symposium*, 551-558, İstanbul.
11. Taner, H. A., Önen, V., 2018, Investigation of some flotation parameters and the role of dispersants in the flotation of chalcopyrite, *ICMPG 2018:20th International Conference on Mineral Processing and Geochemistry*, France.
12. Taner, H. A., Önen, V., 2018, The effect of fly ash in dewatering of marble processing wastewaters, *ICMPG 2018: 20th International Conference on Mineral Processing and Geochemistry*, France.

13. Taner, H. A., Önen, V., 2018, Investigation of some flotation parameters and the role of dispersants in the flotation of chalcopyrite, World Academy of Science, Engineering and Technology, *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 12 (11), p. 666-669.
14. Taner, H., A., 2018, Bakır Cevherinin flotasyonunda farklı kil minerallerinin etki mekanizmalarının belirlenmesi, *BAP Projesi*, Selçuk Üniversitesi, Araştırmacı.
15. Çağlar, A. Z., Önen, V., Taner, H. A., 2019, Effects of clay minerals on the coal flotation, *6th International Congress on Mathematics, Engineering, Natural and Medical Sciences*, Adana.
16. Khalidova, S., Önen, V., Taner, H. A., 2019, Flotation of chalcopyrite in the presence of electrolytes, *6th International Congress on Mathematics, Engineering, Natural and Medical Sciences*, Adana.
17. Taner, H. A., Önen, V., 2019, The Effect of fly ash in dewatering of marble processing wastewaters, World Academy of Science, Engineering and Technology, *International Journal of Geological and Environmental Engineering*, 13 (3), p. 180-183.
18. Patra, A., Taner, H. A., Bordes, R., Holmberg, K., Larsson, A. C., 2019, Selective flotation of calcium minerals using double-headed collectors, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 40:8, 1205-1216.