



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KÖMÜRÜN FARKLI FLOTASYON
MAKİNALARINDAKİ FLOTASYON
PERFORMANSLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI

Güldane NACAK

DOKTORA TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır
TEZ KABUL VE ONAYI

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.

Güldane NACAK

Tarih: 11/08/2025

ÖZET**DOKTORA TEZİ****KÖMÜRÜN FARKLI FLOTASYON MAKİNALARINDAKİ FLOTASYON
PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI****Güldane NACAK****Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Prof. Dr. Selma DÜZYOL****2025, 119 Sayfa****Jüri****Prof. Dr. Selma DÜZYOL****Prof. Dr. Ali UÇAR****Prof. Dr. Neslihan İYİT****Prof. Dr. Salih AYDOĞAN****Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali TANER**

Flotasyon tanelerin yüzey özelliklerinden yararlanarak zamana bağlı olarak yapılan kinetik bir zenginleştirme işlemidir. Hava akış hızı, yüzey aktif madde miktarı, katı oranı gibi çeşitli parametrelerin etki ettiği flotasyon kinetiğini etkileyen en önemli parametrelerden birisi de tane boyutudur. Çok temiz taşkömürü ile yapılan flotasyon çalışmalarında flotasyon kolonu, jameson hücresi ve mekanik flotasyon hücresi kullanılarak bu cihazların performansları değerlendirilmiştir.

2³ tam faktöriyel deney tasarım yöntemi kullanılarak yapılan flotasyon deneylerinde istatistiksel değerlendirmek için köpürtücü miktarı, bias hızı/hava hızı ve tane boyutunun, flotasyon kolonu, Denver cihazı ve Jameson hücresi kinetiğine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla deneyler -106+75, -75+38 ve -38 µm tane boyutları, 0,3-0,525-0,75 cm/s bias hızları, 3,5-3,75-4 cm/s hava hızları ve 5, 10, 15 ppm köpürtücü miktarlarındaki parametrelerin flotasyon hız sabitine ve verimine olan etkileri, istatistiksel modelleme programları kullanılarak matematiksel modeller oluşturulmuştur.

Denver hücresi, özellikle -38 µm tane boyutunda, yüksek köpürtücü ve yüksek hava hızı koşullarında daha yüksek k değerleri üretse de Jameson hücresinin ince tanelerle çalışmadaki üstünlüğü, bias oranının baskın etkisi, enerji verimliliği ve endüstriyel uygulamalardaki pratik avantajları nedeniyle göz önüne alındığında, Jameson hücresi daha avantajlı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kömür, Kinetik, Jameson Hücresi, Flotasyon Kolonu, Denver Hücresi

ABSTRACT**PhD THESIS****A COMPARATIVE STUDY ON THE FLOTATION PERFORMANCE OF
COAL IN DIFFERENT FLOTATION MACHINES****Guldane NACAK****Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mining Engineering****Advisor: Prof. Dr. Selma DÜZYOL****2025, 119 Pages****Jury
Prof. Dr. Selma DÜZYOL
Prof. Dr. Ali UÇAR
Prof. Dr. Neslihan İYİT
Prof. Dr. Salih AYDOĞAN
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Ali TANER**

Flotation is a kinetic beneficiation process that utilizes the surface properties of particles over time. Among various parameters affecting flotation kinetics such as air flow rate, surfactant dosage, and solid concentration, one of the most significant parameters is particle size. In flotation studies conducted with very clean hard coal, the performances of a flotation column, Jameson cell, and mechanical flotation cell were evaluated.

Using a 2³ full factorial experimental design, flotation tests were conducted to statistically evaluate the effects of frother dosage, bias/air velocity, and particle size on the flotation kinetics of a flotation column, Denver cell, and Jameson cell. For this purpose, experiments were performed at particle size fractions of -106+75, -75+38, and -38 µm; bias velocities of 0.3, 0.525, and 0.75 cm/s; air velocities of 3.5, 3.75, and 4 cm/s; and frother dosages of 5, 10, and 15 ppm. The influence of these parameters on both the flotation rate constant and recovery was mathematically modeled using statistical modeling software.

Although the Denver cell produced higher *k* values, particularly at -38 µm particle size under high frother and high air flow rate conditions, the Jameson cell was found to be more advantageous due to its superior performance with fine particles, the dominant effect of bias rate, energy efficiency, and practical advantages in industrial application

Keywords: Coal, Kinetics, Jameson Cell, Flotation Column, Denver Cell

ÖNSÖZ

Öncelikle, bu çalışmanın her aşamasında bilgi ve deneyimiyle beni yönlendiren, sabrı ve anlayışıyla bana akademik olduğu kadar manevi olarak da destek veren danışman hocam Prof. Dr. Selma DÜZYOL'a en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Sadece akademik bilgi aktarımıyla değil, karşılaştığım zorluklar karşısında gösterdiği anlayış, verdiği cesaret ve motivasyonla da bu süreci benim için çok daha anlamlı ve verimli hale getirdi. Yorulduğum ve tereddüt yaşadığım anlarda desteğini hissetmek, bu tezi tamamlamamda en büyük güçlerden biri oldu.

Analiz çalışmalarım süresince gösterdiği nazik yapıcı yaklaşımıyla bana destek olan, değerli katkı ve yönlendirmeleriyle çalışmamın tamamlanmasında katkı sağlayan sevgili Prof. Dr. Neslihan İYİT hocama, deneysel çalışmalarım süresince bana bütün laboratuvar olanaklarını sağlayan ve sürecin sorunsuz ilerlemesine katkıda bulunan Sayın Prof. Dr. Ali UÇAR hocama ve bütün tez savunma jürisi hocalarıma katkıları için şükranlarımı sunarım.

Bana her zaman destek olan ve moral veren, sıcak veya soğuk demeden deney çalışmalarına yardım eden canım annem Hatun ŞAHİN ve babam İsmail ŞAHİN'e, özellikle sabrı, teşviki ve deney çalışmalarımda büyük yardımları ve bu süreci daha kolay hale getirmek için yardımlarını esirgemeyen sevgili eşim Çağatay NACAK'a ne kadar teşekkür etsem az kalır.

Son olarak, bu araştırma sürecinde gerek akademik gerekse kişisel olarak yanımda olan tüm hocalarıma, sevdiklerime teşekkür ederim.

Güldane NACAK

KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL VE ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Kömür	3
2.2. Kömür Zenginleştirme	9
2.3. Flotasyonda Köpük Fazı	12
2.4. Köpük Stabilitesi ve Flotasyon Performansı	13
2.5. Flotasyon Kinetiği.....	19
2.6. Flotasyon Makineleri	22
2.6.1. Mekanik Flotasyon Hücresi	22
2.6.2. Flotasyon Kolonu.....	25
2.6.3. Jameson Flotasyon Hücresi	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
3.1. Materyal	39
3.2. Yöntem.....	39
3.2.1. Numune hazırlama	41
3.2.2. Elek analizi	41
3.2.3. Kalori tayini	42
3.2.4. Temas açısı ölçümü	42
3.2.5. Zeta potansiyeli ölçümü.....	43
3.2.6. XRD ve XRF analizleri.....	43
3.2.7. Flotasyon deneyleri.....	44
3.2.7.1. Jameson flotasyonu deneyleri.....	45
3.2.7.2. Kolon flotasyonu deneyleri.....	46
3.2.7.3. Mekanik flotasyon hücresi deneyleri.....	48
3.2.7.4. Yanabilir verim hesabı.....	49
3.2.7.4. İstatiksel yöntemler.....	49
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	52
4.1. Malzemenin Karakterizasyonu	52
4.2. Flotasyon Analizleri.....	52
4.2.1. Jameson flotasyon hücresi analizleri	52
4.2.2. Flotasyon kolonu analizleri.....	56
4.2.3. Denver flotasyon hücresi analizleri	59

4.3. İstatiksel Analizler	62
4.3.1. Flotasyon hız sabiti analizleri	62
4.3.1.1. Jameson flotasyon hücresi flotasyon hız sabiti analizleri	62
4.3.1.2. Flotasyon kolonu flotasyon hız sabiti analizleri	68
4.3.1.3. Denver flotasyon hücresi flotasyon hız sabiti analizleri	74
4.3.2. Yanabilir kısım verimi analizleri	80
4.3.2.1. Jameson flotasyon hücresi flotasyon verimi analizleri	80
4.3.2.2. Flotasyon kolonu flotasyon verimi analizleri	85
4.3.2.3. Denver flotasyon hücresi flotasyon verimi analizleri	91
4.4. Jameson Hücresi, Flotasyon Kolonu ve Denver Flotasyon Hücresinin Karşılaştırılması	97
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	101
5.1. Sonuçlar	101
5.2. Öneriler	102
KAYNAKLAR	104
ÖZGEÇMİŞ	118

ŞEKİL VE ÇİZELGELER DİZİNİ

Şekiller

Şekil 2.1. Kömürleşme sürecinin şematik gösterimi

Şekil 2.2. Farklı kömür türlerine ait rezerv yüzdeleri ve kullanım alanları

Şekil 2.3. Homojen köpük sisteminin şematik gösterimi

Şekil 2.4. (a) Hava kabarcığına tutunan tane ve (b) temas açısı ve yüzey gerilim kuvvetlerinin klasik gösterimi

Şekil 2.5. Mekanik flotasyon hücresi ve temel bileşenleri

Şekil 2.6. Flotasyon kolonunun şematik olarak gösterimi

Şekil 2.7. Jameson hücresi şematik gösterimi

Şekil 2.8. Jameson hücresindeki hidrodinamik bölgeler

Şekil 3.1. Tez çalışmasına ait akım şeması

Şekil 3.2. Numuneye ait boyut dağılım grafiği

Şekil 3.3. Temas açısı ölçüm yöntemi şematik görünümü

Şekil 3.4. Numunenin zeta potansiyelinin pH'a bağlı değişimi

Şekil 3.5. Taşkömürü XRD Grafiği

Şekil 3.6. Jameson flotasyon hücresi deney düzeneği

Şekil 3.7. Flotasyon kolonu deney düzeneği

Şekil 3.8. Denver flotasyon hücresi deney düzeneği

Şekil 4.1. Farklı tane boyutlarında Jameson flotasyon hücresinde elde edilen birinci dereceden kinetik analizleri

Şekil 4.2. Jameson flotasyon hücresinde oluşturulan kabarcıklar

Şekil 4.3. Farklı tane boyutlarında flotasyon kolonundan elde edilen birinci dereceden kinetik analizleri

Şekil 4.4. Flotasyon kolonunda oluşturulan kabarcıklar

Şekil 4.5. Farklı tane boyutlarında Denver flotasyon hücresinden elde edilen birinci dereceden kinetik analizleri

Şekil 4.6. Jameson flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon hız sabitine etkisi (SPSS)

Şekil 4.7. Gerçek değerler ile tahmini değerlerin karşılaştırılması (Jameson hücresi)

Şekil 4.8. Jameson flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon hız sabitine etkisi (DE-13)

Şekil 4.9. Kolon flotasyonu deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon hız sabitine etkisi (SPSS)

Şekil 4.10. Gerçek değerler ile tahmini değerlerin karşılaştırılması (flotasyon kolonu)

Şekil 4.11. Flotasyon kolunu deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon hız sabitine etkisi (DE-13)

Şekil 4.12. Denver flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon hız sabitine etkisi (SPSS)

Şekil 4.13. Gerçek değerler ile tahmini değerlerin karşılaştırılması (Denver hücresi)

Şekil 4.14. Denver flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon hız sabitine etkisi (DE-13)

Şekil 4.15. Jameson flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon verimine etkisi (SPSS)

Şekil 4.16. Gerçek değerler ile tahmini değerlerin karşılaştırılması (Jameson hücresi)

Şekil 4.17. Jameson flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon verimine etkisi (DE-13)

Şekil 4.18. Kolon flotasyonu deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon verimine etkisi (SPSS)

Şekil 4.19. Gerçek değerler ile tahmini değerlerin karşılaştırılması (Flotasyon kolonu)

Şekil 4.20. Flotasyon kolunu deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon verimine etkisi (DE-13)

Şekil 4.21. Denver flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon verimine etkisi (SPSS)

Şekil 4.22. Gerçek ve tahmini değerlerin karşılaştırılması (Denver hücresi)

Şekil 4.23. Denver flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon verimine etkisi (DE-13)

Şekil 4.24. 3 farklı flotasyon cihazında yapılan deneylerin tane boyutuna bağlı olarak flotasyon hız sabitinin karşılaştırılması

Şekil 4.25. 3 farklı flotasyon cihazında yapılan deneylerin tane boyutuna bağlı olarak yanabilir verimin karşılaştırılması

Çizelgeler

Çizelge 2.1. Kömürlerin ASTM sınıflandırılması

Çizelge 2.2. Uluslararası genel kömür sınıflaması

Çizelge 2.3. Genel sınıflandırmada yer alan kömürlerin tanıtıcı özellikleri

Çizelge 3.1. Konsantre kömür numunesinin analizi

Çizelge 3.2. Kömür Numunesinin Elek Analizi

Çizelge 3.3. Kömür numunesi kimyasal analiz sonuçları

Çizelge 3.4. Flotasyon deneylerinde kullanılan parametreler

Çizelge 3.5. Jameson hücresine ait parametreler

Çizelge 3.6. Deneylerde kullanılan bağımsız parametreler ve değerleri

Çizelge 3.7. 2^3 tam faktöriyel deney tasarımı

Çizelge 4.1. Jameson flotasyon hücresinden elde edilen kinetik deneylere ait flotasyon hız sabiti, R^2 ve YKV değerleri

Çizelge 4.2. Flotasyon kolonundan elde edilen kinetik deneylere ait flotasyon hız sabiti, R^2 ve YKV değerleri

Çizelge 4.3. Denver flotasyon hücresinden elde edilen kinetik deneylere ait flotasyon hız sabiti, R^2 ve YKV değerleri

Çizelge 4.4. Jameson flotasyon deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (SPSS)

Çizelge 4.5. Jameson flotasyon deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (DE-13)

Çizelge 4.6. Kolon flotasyonu deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (SPSS)

Çizelge 4.7. Kolon flotasyonu deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (DE-13)

Çizelge 4.8. Denver flotasyon deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (SPSS)

Çizelge 4.9. Denver flotasyon deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (DE-13)

Çizelge 4.10. Jameson flotasyon deneylerinden elde edilen flotasyon verimine ait varyans analizi sonuçları (SPSS)

Çizelge 4.11. Jameson flotasyon deneylerinden elde edilen flotasyon verimine ait varyans analizi sonuçları (DE-13)

Çizelge 4.12. Kolon flotasyonu deneylerinden elde edilen flotasyon verimine ait varyans analizi sonuçları (SPSS)

Çizelge 4.13. Kolon flotasyonu deneylerinden elde edilen flotasyon verimine ait varyans analizi sonuçları (DE-13)

Çizelge 4.14. Denver flotasyon deneylerinden elde edilen flotasyon verimine ait varyans analizi sonuçları (SPSS)

Çizelge 4.15. Denver flotasyon deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (DE-13)



1. GİRİŞ

Ekonomik kalkınmanın temeli olan enerji gereksinimi, yaşam kalitesinin artmasıyla orantılı olarak artmakta olup yaşadığımız yüzyılda bu talebin karşılanması için ülkeler çeşitli çözüm yolları aramaktadır. Fosil yakıtlardan olan kömür ise dünya çapında geniş rezervlere sahip, güvenilir, üretimi kolay ve ekonomik bir kaynak olarak enerji sektöründe önemli bir yer tutmaktadır. Kömürün kükürt ve kül gibi istenmeyen bileşenlerden arındırılması hem enerji üretiminde verimliliği artırmak hem de ekonomik fayda sağlamak açısından kritik bir adımdır.

Kömür hazırlama tesislerinde gravite ayırma, ağır ortam ayırması ve flotasyon gibi farklı teknikler uygulanmaktadır. Köpük flotasyonu ise ince taneli kömürlerin ekonomik ve verimli bir şekilde işlenmesini sağlayan, yaygın kullanılan önemli bir zenginleştirme yöntemidir.

Köpük flotasyonu, minerallerin yüzey özelliklerindeki farklılıklardan yararlanılarak değerli minerallerin gang minerallerinden etkin bir şekilde ayrılmasını sağlayan bir zenginleştirme yöntemidir. Bu yöntemde, hidrofobik özellikteki mineraller, hava kabarcıklarına tutunarak yüzeye taşınır ve köpük fazında toplanır. Hidrofilik mineraller ise hava kabarcıkları ile etkileşime girmeyerek sulu fazda kalır ve uzaklaştırılır. İşlem sırasında flotasyon reaktifleri kullanılarak minerallerin yüzey özellikleri değiştirilebilir. Toplayıcılar hidrofobikliği artırırken, bastırıcılar istenmeyen minerallerin flotasyona katılımını engeller. Köpürtücüler ise kabarcıkların oluşumunu ve köpüğün stabilitesini sağlar. Böylece yüzey kimyası kontrol edilerek yüksek verimli ve seçici bir ayırma gerçekleştirilir. Endüstride bu prensip farklı tasarımlara sahip flotasyon ekipmanları ile uygulanır. Mekanik karıştırma prensibiyle çalışan Denver flotasyon hücreleri, yaygın kullanım alanı ve operasyonel esnekliği ile öne çıkar. Daha yoğun kabarcık üretimi ve hızlı flotasyon kinetiği sağlayan Jameson hücreleri, özellikle ince taneli minerallerin zenginleştirilmesinde yüksek verimlilik sunar. Kolon flotasyon cihazları ise derin köpük yatağı ve karşı akım prensibi sayesinde seçiciliği artırarak yüksek kaliteli konsantreler elde edilmesini sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, ince boyutlu temiz içerikli taşkömürünün farklı flotasyon ekipmanlarındaki (Jameson hücresi, flotasyon kolonu ve Denver flotasyon hücresi) performanslarının karşılaştırmalı analizi hedeflenmiştir. Araştırmada, Türkiye Taşkömürü Kurumu'na (TTK) ait Zonguldak Kozlu bölgesin lavvar tesisinden temin

edilen çok temiz taşkömürü kullanılmıştır. Taşkömürünün tercih edilmesinin temel gerekçesi, flotasyon sürecinde kül içeriğinin minimum düzeyde olması ve kömürün yüksek hidrofobik karakteristiğinden yararlanılabilesidir. Beslemenin katı oranı besleme tane boyutu, reaktiflerin türü ve miktarı, bias oranı/hava akış hızı ile flotasyon süresi deneyler için kritik parametreler olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerden besleme katı oranı, reaktiflerin türü ve konsantre alma süreleri sabit olarak alınmıştır. Bağımsız değişkenlerin (tane boyutu, bias hızı/hava akış hızı ve köpürtücü miktarı) yanabilir kısım verimi ve flotasyon kinetiği üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla, 2^3 tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak, 4 adet düşük seviyede, 4 adet yüksek seviyede ve 4 adet orta seviyede olmak üzere 12 adet farklı deney şartı belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar Design Expert-13 ve SPSS programları kullanılarak analiz edilmiş, parametrelerin ana ve çoklu etkilerini gösteren modeller oluşturulmuş ve önceki çalışmalar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

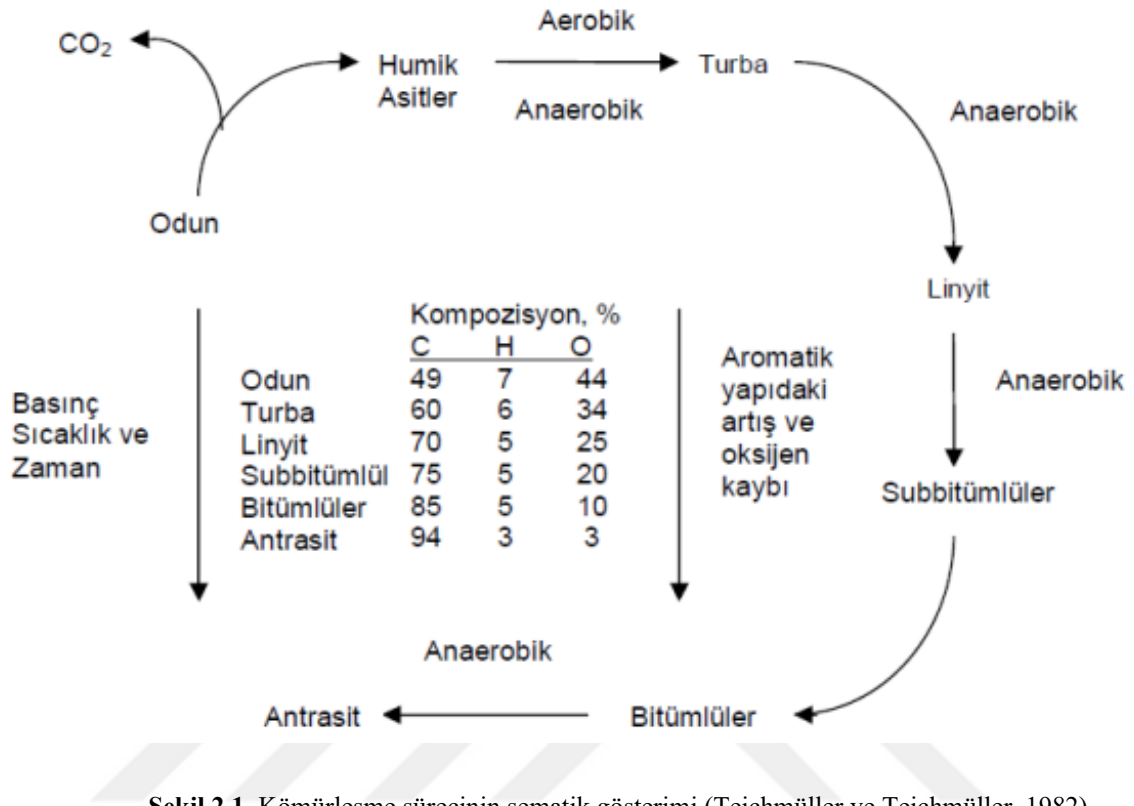
2.1. Kömür

Yenilenemeyen bir fosil yakıt olan ve eski çağlardan beri çeşitli alanlarda kullanılan kömür, günümüzde de başlıca enerji kaynaklarından biri olup (Pudasainee ve diğ., 2020) organik maseraller ve inorganik minerallerden oluşan karmaşık bir yapıya sahiptir. Organik bileşenler kömürün enerji potansiyelini belirlerken, inorganik kısım kil, kuvars ve sülfidler gibi mineraller enerji potansiyelini düşürmektedir (Levine, 1993). Kömürün mineralojik bileşimi, oluşum koşulları ve diyajenez süreçlerine bağlı olarak çeşitlilik gösterir. Bu mineraller, kömürün fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyerek derecesini belirlemede önemli bir rol oynar. Bu nedenlerle bu inorganik maddelerin kömürden uzaklaştırılması gerekir. Bu da ancak kömür zenginleştirme ile mümkün olur.

Kömürleşme, bitkisel materyallerin jeolojik koşullarda, yüksek sıcaklık, basınç ve uzun zaman dilimlerinde kömüre dönüşmesini sağlayan termal ve kimyasal bir süreçtir. Bataklık gibi anaerobik ortamlarda biriken organik maddeler turba aşamasından başlayarak linyit, bitümlü kömür ve antrasite doğru evrilir. Sıcaklık ve basınç uçucu bileşenleri azaltıp karbon içeriğini artırırken, zaman bu dönüşümü tamamlar. Sonuçta, kömürün karbon oranı, enerji değeri, yoğunluk ve sertlik gibi kimyasal-fiziksel özellikleri şekillenir. Bu süreç, kömürün türüne ve kullanım alanlarına bağlı olarak farklılık göstermektedir (Teichmüller ve Teichmüller, 1982).

Kömürleşme süreci ilerledikçe, kömürün yapısındaki basit yapıli karbon zincirleri (yani düz veya dallı zincirler) zamanla ortadan kalkar ve onların yerine halka şeklinde düzenlenmiş karbon yapıları oluşur. Benzen gibi bu aromatik halkalar, karbon atomlarının birbirine bağlanarak kapalı bir halka oluşturduğu özel yapılardır. Bu halkaların en önemli özelliğı, içlerindeki elektronların halka içinde serbestçe hareket edebilmesidir. Bu durum, bu yapıları çok kararlı ve dayanıklı hale gelir (Wu ve diğ., 2023). Bu dönüşümle birlikte, kömürün içindeki karbon oranı artar, buna karşılık oksijen içeren kimyasal grupların sayısı azalır. Oksijenli grupların azalması, bu grupların ancak daha yüksek sıcaklıklarda tepkimeye girmesine (oksidasyona uğramasına) neden olur. Sonuç olarak, kömür daha az tepkimeye giren (reaktif olmayan) ve daha kararlı bir yapı oluşturur. Kömürleşme seviyesi arttıkça kömürün oksijen tüketiminin azaldığı belirtilmektedir. Ayrıca düşük kömürleşme düzeyindeki kömürlerde daha fazla gözenek bulunması, oksijen moleküllerinin tutunabileceğı yüzey alanını artırarak oksidatif tepkimeleri kolaylaştıran bir diğ er etken olarak

değerlendirilmektedir (Şensöğüt ve Ören, 2020). Kömürleşmeye ait süreç aşağıda Şekil 2.1. de verilmiştir.



Şekil 2.1. Kömürleşme sürecinin şematik gösterimi (Teichmüller ve Teichmüller, 1982)

Kömürlerin kömürleşme derecelerine göre daha kesin bir şekilde ayrılması amacıyla birçok sınıflama yöntemi geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan kömür sınıflaması, 1983 yılında Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) tarafından geliştirilen sınıflamadır. Bu sınıflandırmada, kömürün ısı değeri ve uçucu madde miktarı temel kriterler olarak alınır. ASTM sınıflaması, kömürlerin enerji içeriği ve yanma özelliklerine göre ayrılmasını sağlayarak, sanayi ve enerji sektörlerinde pratik ve güvenilir bir referans oluşturur. Bu sınıflama sistemine göre kömürler linyit, altbitümlü, bitümlü kömür ve antrasit olmak üzere dört ayrı kategoride sabit karbon, uçucu madde ve kalorifik değerlerine göre sıralanmaktadır. Çizelge 2.1’de bu sınıflamada yer alan kömür türlerinin özelliklerine yer verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kömürlerin ASTM sınıflandırılması (ASTM, 2004)

Sınıf	Grup	Sabit Karbon ^a (%)	Uçucu Madde ^b (%)	Isıl Değer ^b (Btu/Lb)	Isıl Değer ^b (Kcal/Kg)
Antrasit	Meta-antrasit	> 98	2		
	Antrasit	92-98	2-8		
	Yarı-antrasit	86-92	8-14		
Bitümlü	Düşük uçuculu	78-86	14-22		
	Orta uçuculu	69-78	22-31		
	Yüksek uçuculu A	< 69	> 31		
	Yüksek uçuculu B			>14000	>7778
	Yüksek uçuculu C			13000-14000	7222-7778
	Altbitümlü A			10500-11500	5833-6388
	Altbitümlü B			9500-10500	5277-5833
Altbitümlü	Altbitümlü C			8300-9500	4611-5277
Linyit	Linyit A			6300-8300	3500-4611
	Linyit B			<6300	<3500

^a Kuru, mineral maddesiz^b Mineral maddesiz, orijinal nemli

Uluslararası düzeyde kabul gören bir diğer sınıflama sistemi ise, 1983 yılında Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Teşkilatı (OECD) tarafından oluşturulan uluslararası genel kömür sınıflamasıdır. Bu sınıflama, farklı ülkelerdeki kömür türlerinin standart kriterlere göre karşılaştırılmasını kolaylaştırmak ve uluslararası enerji ticareti ile politika geliştirme süreçlerinde ortak bir dil oluşturmak amacıyla geliştirilmiştir (Stach ve diğ.,1982). Çizelge 2.2’de bu sınıflamada yer alan kömür türlerinin tanıtıcı özelliklerine yer verilmiştir.

Çizelge 2.2. Uluslararası genel kömür sınıflaması (OECD, 1983)

A. Sert Kömürler	B. Kahverengi Kömürler
1. Koklaşabilir Kömürler	1. Alt Bitümlü Kömürler
Yüksek fırınlarda kullanıma uygun kok üretimine izin veren kalitededir.	4.165-5.700 kcal/kg arasında kalorifik değerde topaklaşma özelliği göstermez)
2. Koklaşmayan Kömürler	2. Linyit
a. Bitümlü Kömürler	4.165 kcal/kg'ın altında ısı değerinde olup
b. Antrasit	topaklaşma özelliği göstermez

Bunlara ek olarak, Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) da kömür için daha genel bir sınıflandırma sunmaktadır. ISO sınıflamasında kömürler, temel olarak “sert kömür” ve “kahverengi kömür” olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır (Çizelge 2.3). Türkiye’de kullanılan sınıflama sistemi ise bu uluslararası yaklaşımlarla büyük ölçüde örtüşmektedir. Ülkemizde kömürler genellikle turba, linyit, taşkömürü ve antrasit şeklinde sınıflandırılmakta, bu da ISO sınıflamasındaki kategorilerle uyum göstermektedir.

Çizelge 2.3. Genel sınıflandırmada yer alan kömürlerin tanıtıcı özellikleri (Mervit ve Roy, 1986).

Linyit	Alt Bitümlü Kömür	Bitümlü Kömür	Antrasit
Kahverengi	Siyah	Koyu Siyah	Parlak Siyah
Kırılğan Çabuk toz halinde ufalanma	Oksidasyonla veya kurutma sonucunda ince parçalar ve toz halinde ufanma	Bloksu kırılma	Merceksi kırılma
Masif, odunsu veya üniform kilsli doku	Masif	Bantlı ve kompakt	Sert ve dayanıklı
Isı Değeri; 4610 kcal/kg’ın altında	Isı Değeri; 4610-6390 kcal/kg arasında	Isı Değeri; 5390- 7700 kcal/kg arasında	Isı Değeri; 7000 kcal/kg’ın üzerinde
Uçucu madde miktarı ve nem içeriği yüksek	Uçucu madde ve nem içerikleri bitümlü kömürlerden daha yüksek	Uçucu madde miktarı ve nem içeriği düşük	Uçucu madde ve nem içerikleri düşük
Düşük sabit karbon içeriği	Sabit karbon içeriği bitümlü kömürlerden düşük	Sabit karbon içeriği yüksek	Sabit karbon içeriği yüksek

Turba, biyokimyasal kömürleşme sürecinden geçmiş ve organik madde içeriği yüksek olan en genç kömür formudur. Genellikle sarımsı, kahverengimsi ya da siyah renkte görülebilir ve düşük sertlik derecesine sahiptir. Turbanın fiziksel ve kimyasal özellikleri bitki türlerine, çevresel oluşum koşullarına ve organik bileşenlerin ayrışma düzeyine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Gülsuna, 2007; Güldan, 2010; Çolpan, 2019).

Linyit, turba ile taşkömürü arasında bir geçiş niteliği taşır. Linyitler, jeolojik süreçlerdeki dönüşüm düzeyine bağlı olarak farklı oranlarda doğal nem içermektedir. Nem oranı arttıkça kömürleşme seviyesi düşmekte ve özellikle yumuşak linyitlerde bu durum belirginleşmektedir. Yumuşak linyitler, %35 ila %75 arasında orijinal nem oranına sahip olup, düşük mekanik dayanıklılık göstermektedirler. Zamanla ufalanarak toz haline dönüşebilir ve suyla temas ettiklerinde şişerek dağılma eğilimindedirler. Sert linyitler ise daha düşük nem içermekte, daha dayanıklı yapıya sahiptir ve taşkömürüne yakın özellikler göstermektedir (Kemal, 1991; Güldan, 2010; Çolpan, 2019).

Taşkömürü, yüksek karbon içeriği ve düşük doğal nem oranı ile ayırt edilir, bu da taşıma ve depolama sırasında parça bütünlüğünün korunmasını sağlar. Güncel çalışmalarda, taşkömürünün yüksek enerji yoğunluğu ve karbon verimliliği nedeniyle özellikle termik enerji üretimi ve ağır sanayi uygulamalarında tercih edildiği vurgulanmaktadır (Thielemann ve diğ., 2007). Ayrıca taşkömürünün düşük nem oranı, depolama sırasında enerji kaybını minimize ederek ekonomik avantaj sağlamaktadır (Rawat ve Kumar, 2022). Çevresel kaygılar doğrultusunda yapılan araştırmalarda, taşkömürünün yanma verimliliğini artırmak ve zararlı emisyonları azaltmak amacıyla gelişmiş yakma teknolojileri ve temiz kömür teknolojileri üzerine yoğunlaşmıştır (Franco ve Diaz, 2009; Li ve diğ., 2020). Bu gelişmeler, taşkömürünün enerji sektöründeki önemini korumasına ve sürdürülebilir enerji üretiminde rol oynamasına olanak tanımaktadır.

Antrasit, bazı bölgelerde “kaya kömürü” veya “sert kömür” olarak adlandırılır ve kömürleşmenin en ileri aşamalarından biridir. Metalik parlaklığa yakın yüzeyi ve koyu siyah rengiyle ayırt edilmektedir. İs ve toz oluşturmada uzun süre yanabilmesi sayesinde evsel kullanımda tercih edilmektedir (Gülsuna, 2007; Güldan, 2010; Çolpan, 2019).

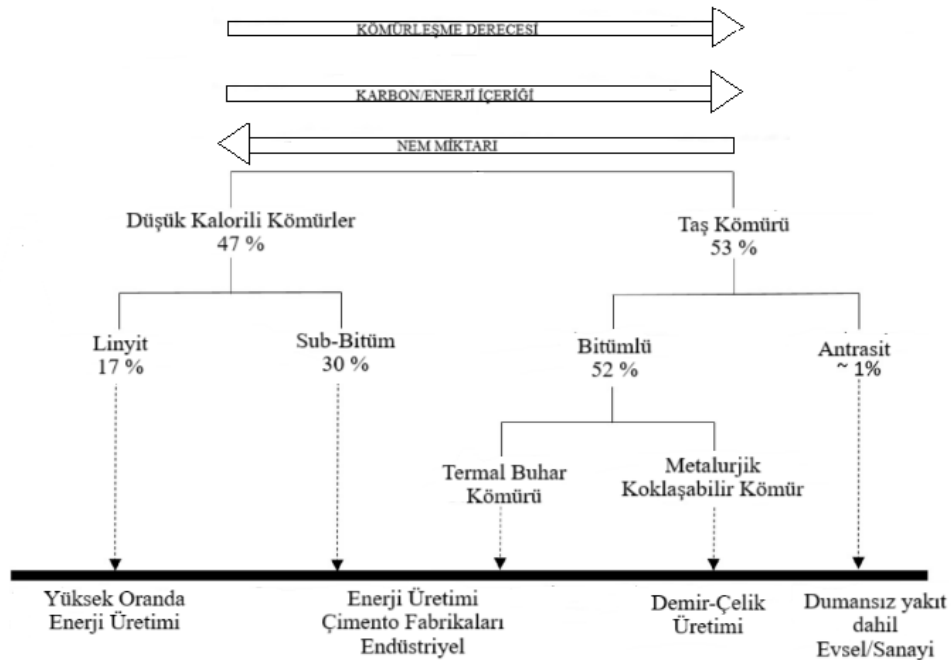
Grafit, kömürleşmenin son aşamalarında ortaya çıkan, lamelli yapıda ve yumuşak bir karbon formudur. Siyah ile gri arasında değişen renge sahip olan grafitin

çizgi rengi genellikle kül tonundadır. Elektrik iletkenliği ve ısıl kararlılığı nedeniyle ileri teknolojik uygulamalarda da değerlendirilmektedir (Gülden, 2010).

Günümüzde kömür yalnızca enerji kaynağı olarak değil, aynı zamanda birçok sektörde kimyasal hammaddelerin üretiminde de kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yüksek enerji gereksinimi olan çimento üretimi gibi sektörlerde hem yakıt olarak hem de üretim proseslerinin doğrudan bir bileşeni olarak önemli yer tutmaktadır.

Kömürün türlerine göre değişkenlik gösteren çeşitli kömür türlerine ait rezervleri, endüstriyel ve enerji amaçlı kullanım alanlarını Şekil 2.2’de verilmiştir. Özellikle yüksek karbon içeriği ve yüksek ısıl değeri nedeniyle taşkömürü ve antrasit gibi ileri düzeyde kömürleşmiş türler, sanayi sektörlerinde önemli bir enerji ve hammadde kaynağı olarak öne çıkar.

Özellikle kok kömürü, demir cevherinin yüksek sıcaklıklarda eritilmesi ve çeliğin saflaştırılması süreçlerinde hem ısıl enerji kaynağı hem de kimyasal indirgen olarak kullanılmakta ve bu özelliğiyle inşaat, otomotiv ve ağır sanayi gibi sektörlerin sürdürülebilir üretiminde kilit rol oynamaktadır. Tüm bu kullanım alanları, kömürün yalnızca fosil bir yakıt değil, aynı zamanda sanayi ve kimya teknolojileri açısından stratejik ve çok yönlü bir doğal kaynak olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 2.2. Farklı kömür türlerine ait rezerv yüzdeleri ve kullanım alanları (Van Krevelen, 1993)

2.2. Kömür Zenginleştirme

Kömür zenginleştirmenin ilk aşaması olan boyut küçültme işlemi kömürün yüzey alanını artırarak temizleme süreçlerini kolaylaştırır. Kömürün içerdiği kül, kükürt ve diğer istenmeyen maddeler farklı tekniklerle ayrıştırılır. Temizleme yöntemleri, kömürün boyutuna ve özelliklerine göre çeşitlilik gösterir. İri ve orta boyuttaki kömürler için kömür ile gang mineralleri arasındaki yoğunluk farklarından yararlanılır ve bu yöntem büyük parçaların etkili bir şekilde ayrılmasında tercih edilir. Napier-Munn (2005), yoğunluk farkına dayanarak yapılan yöntemlerin özellikle yüksek kül içerikli kömürlerde başarılı sonuçlar verdiğini ifade etmiştir. İnce taneli kömürlerin yüzey özelliklerine dayalı olarak ayrıştırıldığı flotasyon yönteminde, kömür ve gang mineralleri arasında yoğunluk farklarının az olduğu durumlarda bile yüksek verim sağlanmaktadır. Bulatovic (2007), flotasyonun ince taneli kömürlerin temizlenmesinde en yaygın kullanılan yöntem olduğunu ve kömürün hidrofobik doğasının bu süreçte belirleyici olduğunu vurgulamıştır.

Flotasyon, minerallerin yüzey özelliklerindeki farklılıklara dayanarak değerli minerallerin değersiz minerallerden ayrılmasını sağlayan, özellikle ince taneli cevherler için son derece etkili bir fiziko-kimyasal zenginleştirme yöntemidir. Bu yöntem minerallerin hidrofobik ya da hidrofilik karakterleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Flotasyon işlemi, cevherin öğütülüp su ile karıştırılarak pülp haline getirilmesiyle başlamaktadır. Pülpe, minerallerin yüzey özelliklerini değiştiren veya belirginleştiren çeşitli reaktifler eklenmektedir. Flotasyon hücresine verilen hava kabarcıkları değerli mineral tanelerine tutunmakta ve bu taneleri yüzeye doğru taşımaktadır. Böylece değerli mineraller, köpük fazı adı verilen üst tabakada toplanırken, değersiz mineraller süspansiyonda kalmaktadır (Düzyol, 2009).

Flotasyon yöntemi özellikle sülfürlü metal cevherleri (bakır, çinko, kurşun, altın), kömür, oksitli mineraller ve endüstriyel hammaddelerin (feldspat, fluorit, grafit vb.) ayrılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca geri dönüşüm süreçlerinde ve atıkların yeniden değerlendirilmesinde de etkin bir yöntemdir. Bu yöntemin yüksek seçicilik, düşük enerji tüketimi ve ince taneli malzeme ile çalışabilme gibi avantajları, flotasyonu modern cevher zenginleştirme sistemlerinde vazgeçilmez kılmaktadır (Wills ve Finch, 2015)

Kömür flotasyonunda verimliliği etkileyen başlıca ana faktörler; tane boyu, yüzey oksidasyonu, kül içeriği, katı oranı ve pH değeridir. Bu parametreler, flotasyonun hem

ayırma etkinliğini hem de elde edilen ürünün kalitesini belirlemede önemli rol oynamaktadır.

Tane boyutu flotasyon sırasında hava kabarcıkları ile kömür tanecikleri arasındaki etkileşimi belirleyen kritik bir faktördür. Çok ince veya çok iri taneler, hava kabarcıkları ile uygun temas kurmakta zorlandıkları için flotasyon verimini düşürebilir. İnce taneler yüzey gerilimini bozarken, iri taneler kabarcıklardan kolayca ayrılabilir (Ahmed ve Jameson, 1985).

Yüzey oksidasyonu, kömür yüzeyinde zamanla oluşan oksitlenme tabakası nedeniyle hidrofobik karakterin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, kömürün hava kabarcıklarına tutunma kabiliyetini düşürerek flotasyon verimini azaltmaktadır. Oksitlenmiş kömürlerin kazanımı, genellikle daha fazla reaktif kullanımını gerektirmektedir (Kelebek ve diğ., 2008; Kadagala ve diğ., 2023).

Kül içeriği, kömürün gang mineralleriyle ne ölçüde karıştığını gösteren kritik bir parametredir ve kül oranı arttıkça flotasyon konsantresinin kalitesi düşmektedir. Bu nedenle düşük kül içeriğine sahip konsantre elde etmek, flotasyon sürecinin önemli hedeflerinden biridir (Noble ve Luttrell, 2015). Li ve diğ., (2025), çalışmalarında düşük kaliteli ve yüksek kül içeren kömürlü pülpün temizlenmesi için sınıflandırılmalı flotasyon yöntemini kullanarak kül oranını düşürmüş ve verimi artırmışlardır. Wen ve diğ., (2021); Lu ve diğ., (2023); Zhu ve diğ., (2023), derin öğrenme tabanlı görüntü analizleriyle flotasyon köpüğündeki kül oranını yüksek doğrulukla tahmin etmiş ve düşük kül oranının temiz kömür kalitesi için belirleyici olduğunu göstermişlerdir.

Flotasyon sürecinde süspansiyonun katı oranı, hidrodinamik koşulları ve kabarcıkların taneciklerle temasını belirlemektedir. Çok düşük katı oranları verimi düşürürken, yüksek katı oranları partiküller arasında çekim kuvvetlerinin artmasına ve böylece flokleşme olarak adlandırılan taneciklerin birbirine yapışması olayına yol açabilmektedir. Flokleşme, süspansiyonda büyük ve düzensiz agregaların oluşmasına neden olarak, kabarcıklarla taneciklerin temasını zorlaştırmakta ve köpük fazının kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu durum flotasyon etkinliğinin azalmasına, yani istenilen minerallerin yeterince ayrışamamasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, katı oranının genellikle %10-30 arasında tutulması optimal kabul edilmekte ve flokleşmanın önlenmesi için deney koşullarının dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir (Cole ve diğ., 2022).

pH, flotasyon ortamının yüzey yüklerini, reaktiflerin etkinliğini ve minerallerin yüzey potansiyelini etkileyen önemli bir parametredir. Kömür flotasyonunda genellikle

nötr ya da hafif alkali ortam tercih edilmektedir (pH 6–8) çünkü bu aralıkta kolektörlerin kömür yüzeyine tutunması daha etkin gerçekleşmektedir (Brown, 1962; Özbayoğlu, 1994; Aksoy, 2016).

Flotasyon sürecinde ayırma işlemi; pülp içerisinde oluşturulan hava kabarcıklarıyla hidrofob mineral parçacıklarının yukarı taşınması, hidrofil taneciklerin ise aşağıya yönelmesi ilkesine dayanmaktadır (Yeşilyurt, 2014). Bu mekanizma minerallerin yüzey özelliklerine, özellikle de suyu itme kabiliyetine bağlıdır. Yüzey moleküllerinin polar yapıya sahip olması durumunda su ile etkileşerek hidrofobik özellik azalır. Kömür ise doğal olarak polar olmayan yapıdadır ve bu nedenle flotasyona uygun bir hidrofobik karakter sergilemektedir (Hacıfazlıoğlu, 2011). Farklı kömür türlerinin flotasyon performansları da büyük farklılık göstermektedir. Orta uçuculu taş kömürleri en iyi özelliklere sahipken, uçucu madde oranı yüksek olan kömürler flotasyon işlemiyle daha kolay temizlenmekte ve ayıklanmaktadır. Yüksek uçuculu taş kömürleri, antresitlere kıyasla daha kolay bir flotasyon gösterirken, linyitler flotasyonu gerçekleştirmesi en zor olan kömür çeşididir (Öney ve Bilgin, 2016). Son yıllarda bu zorlukları aşmak için alternatif reaktifler ve yüzey modifiyeleri üzerine yoğunlaşmıştır. Cheng ve diğ., (2024), düşük kalitedeki kömürlerin flotasyonuna yönelik yaptığı çalışmada, atık bitkisel kızartma yağı kullanarak kömür yüzeyinin hidrofobikliğini artırmış ve dizele göre %88'e kadar verim sağlamıştır. Benzer şekilde He ve diğ., (2018), iyonik kolektörlerle düşük uçuculu kömürlerde hem flotasyon veriminde iyileşme hem de kül oranında azalma elde ederken; Cassandra Austen ve diğ., (2025) çalışmalarında MIBC ve yağ asidi ester kombinasyonlarının daha kararlı köpük yapısı ve yüksek seçicilik sağladığını rapor etmişlerdir. Geleneksel yöntemlerin ötesine geçen en güncel yaklaşımlardan biri ise yüzey aktif madde kombinasyonları ile ilgili mekanizmayı moleküler düzeyde inceleyen çalışmalardır. Zhang ve diğ., (2024), anyonik SDBS (sodyum dodesil benzen sülfonat), katyonik CTAB (heksadesil trimetil amonyum bromür) ve non-iyonik AEO-9 (yağ alkolü etoksilat eter) yüzey aktif maddelerin kömür yüzeyinde zeta potansiyelini düzenleyerek hidrofobikliğin arttığını göstermiştir. Özellikle CTAB adlı katyonik yüzey aktif maddenin, kömürün su ıticiliğini artırmada ve yüzdürülmesini kolaylaştırmada diğer maddelere göre daha etkili olduğu bulunmuştur.

Flotasyon reaktifleri, zenginleştirme süreçlerinde değerli minerallerin seçici olarak ayrılmasını sağlamak için kullanılan kimyasal maddelerdir. Mineral tanelerinin yüzey özelliklerini değiştirerek su yüzeyinde yüzmelerini veya batmalarını sağlamakta,

böylece istenmeyen safsızlıklardan ayrılmasını kolaylaştırmaktadır. Bu reaktifler; toplayıcılar, köpürtücüler ve düzenleyiciler olarak sınıflandırılmaktadır (Bulatovic, 2007).

Toplayıcılar, mineral yüzeylerini hidrofobik hale getirerek hava kabarcıklarına tutunmalarını sağlar ve iyonize olan ve iyonize olmayan olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.

Köpürtücüler, su-hava arayüzünde adsorbe olarak köpük stabilitesini artırmaktadır.

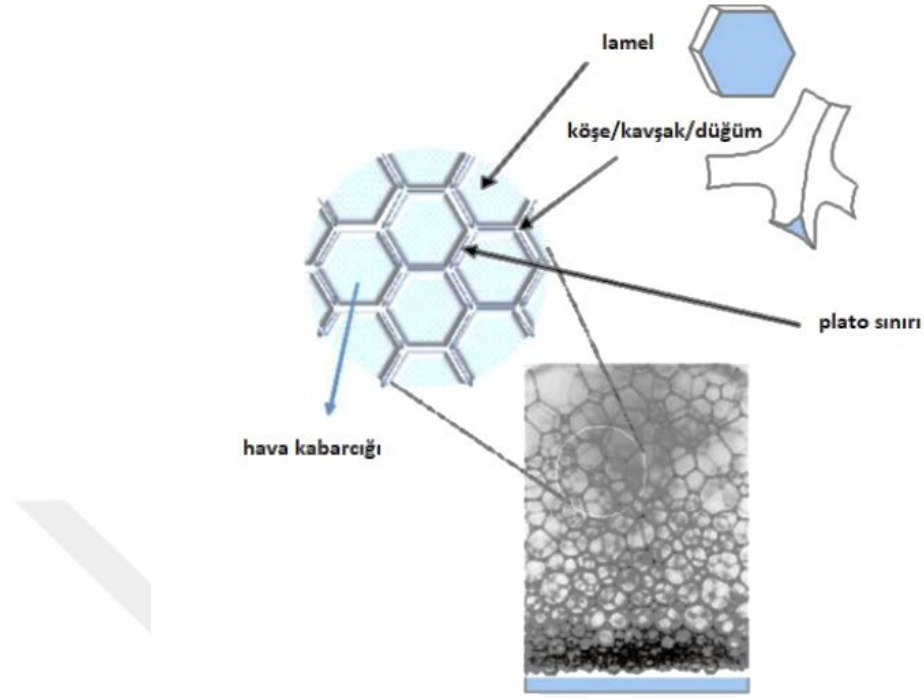
Düzenleyiciler, flotasyon ortamını kontrol etmek için kullanılmakta ve canlandırıcılar, bastırıcılar ve pH düzenleyiciler olmak üzere üç alt grupta incelenmektedir.

Dağıtıcılar kömür flotasyonu gibi süreçlerde, ince tanelerin aglomerasyonunu önleyerek kömürün seçici ayrılmasını kolaylaştırmaktadırlar. Kömür flotasyonunda genellikle gazyağı, fuel oil, mazot ve bazı kömür distilantları gibi toplayıcılar kullanılmaktadır (Sönmez ve Cebeci, 2006). Taşkömürü flotasyonunda yağların kullanım oranı genellikle 0.5-2 kg/t arasında iken kömürleşme derecesi düşük olan linyit flotasyonunda bu oran, 6-8 kg/t seviyelerine kadar çıkabilmektedir (Hacıfazlıoğlu, 2011). Kömür flotasyonunda yaygın olarak kullanılan bir alifatik alkol olan Metil İzobütil Karbinol (MIBC) aynı zamanda toplayıcı özelliklere sahiptir. Yüksek kil, silikat ve özellikle kuvars içeren kömürlerde sodyum silikat, sodyum hegzametafosfat, lignin, polimerik sülfonatlar, quebrecho ve tanin gibi bastırıcılar kullanılmaktadır (Öney ve Bilgin, 2016).

2.3. Flotasyonda Köpük Fazı

Flotasyon hücresinde hidrofobik özellikteki taneler, hava kabarcıklarına bağlanarak sistemin üst kısımlarına taşınmaktadır. Kabarcık yüzeyine tutunan bu taneler, kabarcıkların yüzeye doğru ilerlemesi sırasında kabarcıkların yoğunlaşmasına ve birbirine yaklaşmasına neden olmaktadır. Yükselen ve yoğunlaşan kabarcıklar, hücrenin üst yüzeyinde toplanarak köpük fazını oluşturur. Köpük fazında biriken hava kabarcıkları, aralarında ince bir sıvı film sayesinde birbirinden ayrılmaktadır. Bu ince film, literatürde “lamel” olarak tanımlanmaktadır. Üç lamelin birleşme noktalarında yaklaşık 120° açıyla oluşan yapılar ise “plato sınırları” şeklinde adlandırılır. Dört plato sınırının bir araya geldiği noktalarda ise yaklaşık 109,6°'lik açılarla oluşan düğüm veya köşe bölgeleri meydana gelir (Neethling ve Cilliers, 2003). Şekil 2.3’de verilen köpük

fazında ortaya çıkan bu yapılar, su ve katı tanelerin akışına olanak tanıyan, birbiriyle bağlantılı üç boyutlu bir kanal ağı oluşturur (Farrokhpay, 2011).



Şekil 2.3. Homojen köpük sisteminin şematik gösterimi (Koursari, 2019)

2.4. Köpük Stabilitesi ve Flotasyon Performansı

Köpük stabilitesi (dayanımı/kararlılığı), hava kabarcıklarının lamel yapılarının ortamda meydana gelen rastgele salınımlara ve mekanik etkilere karşı direnç göstermesi olarak tanımlanmaktadır. Köpük fazında kabarcıkların birleşme ve patlama olaylarının artması düşük köpük stabilitesine işaret eder. Bu nedenle köpük yüzeyindeki hava kabarcıklarının boyutları ve bu kabarcıkların davranışları, sistemin köpük stabilitesine dair genel bir gösterge olarak değerlendirilebilir (Farrokhpay, 2011).

Köpük yüzeyinde gerçekleşen kabarcık patlamaları hem konsantre edilen köpüğün akışını hem de yüzey alanının azalması yoluyla tanelerin kabarcıklara tutunma olasılığını düşürmektedir (Morar ve diğ., 2006). Dolayısıyla köpük stabilitesinin, genel flotasyon performansı üzerinde belirleyici bir etkisi bulunmaktadır (Banford ve diğ., 1998). Genel olarak, yüksek stabiliteye sahip köpüklerde daha yüksek köpük fazı verimi ve sürüklenen malzeme miktarında artış beklenmektedir. Buna karşılık, düşük stabiliteye sahip köpükler hücrenin toplam verimini olumsuz etkileyebilmektedir (Alexander ve diğ., 2003). İdeal koşullarda flotasyon köpüğünün, hidrofobik taneler konsantre edilene kadar stabil kalması, konsantre alımı sırasında ise kolayca kırılarak taşınmayı kolaylaştırması istenmektedir (Morar ve diğ., 2006). Ancak köpük fazının

davranışı birçok farklı parametreye bağlı olmakta ve bu nedenle köpüğün stabilitesini ve performansını tek bir yöntemle tanımlamak mümkün olmamaktadır (Banford ve diğ., 1998; Barbian ve diğ., 2005; Tsatouhas ve diğ., 2006; Barbian ve diğ., 2007; Rahman ve diğ., 2015a; 2015b). Hücre yüzeyinde oluşan köpüğün yapısal ve dinamik özellikleri tanelerin hava kabarcıklarına bağlanması, tanelerin köpük faza taşınması, kabarcıkların yüzeyde patlaması ve kabarcıkların birleşmesi gibi çeşitli süreçlerden etkilenmektedir. Bu nedenle, flotasyon sırasında gerçekleşen ayırma verimliliğini değerlendirmek için köpük fazının yapısal ve dinamik özellikleri önemli bir gösterge olarak kullanılabilir (Barbian ve diğ., 2007). Flotasyon olasılığı, Eşitlik 2.1’de verilen denklemle belirlenir (Sutherland, 1948; Schuhmann Jr., 1942 ve Tomlinson ve Fleming, 1963):

$$P = P_c \times P_a \times (1 - P_d) \quad (2.1)$$

Flotasyon sürecinde tane-kabarcık etkileşimi, çarpışma olasılığı (P_c), yapışma olasılığı (P_a) ve ayrılma olasılığı (P_d) olmak üzere üç temel olasılıkla tanımlanır.

Flotasyon olasılığı ve kinetik hız, tane boyutuna bağlıdır. Çarpışma olasılığı boyuta göre artarken, yapışma ve ayrılma olasılıkları azalır (Trahar, 1981). Kabarcık çarpışmasını modelleme ve anlama üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Sutherland (1948) tarafından önerilen aşağıdaki Eşitlik 2.2’de verilen denklem tane-kabarcık çarpışma olasılığının genel bir modelini temsil eder:

$$P_c = a \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^n \quad (2.2)$$

a ve n değerleri, kabarcık-parçacık etkileşimi sırasındaki hidrodinamik koşullara bağlıdır. Tao (2005), kabarcık boyutunun hem iri hem de ince parçacıkların flotasyonuna etkisine dair eleştirel bir inceleme sunmuş ve ince parçacıkların düşük veriminin düşük çarpışma verimliliğinden, iri parçacıkların ise ayrılma sınırlamalarından kaynaklandığını sonucuna varmıştır. Çarpışma verimliliğini artırmak için kabarcık boyutlarının küçültülmesini önermişlerdir. Yoon (2000), kabarcık boyutlarının çarpışma verimliliğine etkisinin mevcut hidrodinamik koşullara bağlı olduğunu belirtmiştir.

Her ne kadar kabarcık-parçacık çarpışması parçacık veriminin ilk adımı olsa da bu çarpışmanın parçacıkların kabarcıklara başarılı bir şekilde tutunmasıyla sonuçlanması gerekir ki verim gerçekleşsin. Parçacıkların kabarcıklara tutunması, yüzey kuvvetleri tarafından yönetilir (Albiganic ve diğ., 2010). Stabil bir tutunma oluşmadan önceki adımlar da yüzey kuvvetlerinden etkilenir. Bu adımlar şunlardır:

1. Yaklaşan bir parçacık ile kabarcık arasındaki ince filmin kritik bir kalınlığa kadar incelmesi,
2. Filmin yırtılması ve kritik bir yarıçapla üç fazlı temasın oluşması,
3. Üç fazlı temas hattının yayılması ve stabil bir ıslanma dengesi temas açısının oluşması (Derjaguin ve Dukhin, 1993).

Birinci adımdan filmin yırtılmasına kadar geçen süre indüksiyon zamanı olarak tanımlanırken, üçüncü adıma kadar geçen süre ise temas zamanı olarak adlandırmıştır (Yoon ve Luttrell, 1989; Albijanic ve diğ., 2010).

Tam anlamıyla doğrudan bir ilişki bulunmamakla birlikte, ıslanabilirlik ve yüzeybilirlik arasında bağlantı vardır. Genellikle, temas açısı sıfırdan büyük olan parçacıkların flotasyonda yüzebileceği kabul edilir. Bu nedenle temas açısı, kömür yüzey özelliklerinin belirlenmesinde temel bir parametre olarak değerlendirilir.

Temas açısı (θ), hava kabarcığı ile tanenin temas ettiği noktada suya doğru ölçülen açı olarak tanımlanır. Kabarcık ile tanenin birleşmesi ve bu yapının kararlı kalması, hava/su, su/katı ve katı/hava yüzeyleri arasındaki yüzey gerilimlerine bağlıdır (Laskowski, 2001; Rao ve Gouricharan, 2016). Bu ilişki ideal yüzeyler için Eşitlik 2.3'te ifade edilen Young denklemi ile tanımlanır:

$$\gamma_{K/H} = \gamma_{K/S} + \gamma_{S/H} \times \cos\theta \quad (2.3)$$

Burada;

$\gamma_{K/H}$: Katı/hava arayüzey gerilimi; $\gamma_{K/S}$: Katı/sıvı arayüzey gerilimi; $\gamma_{H/S}$: Hava/sıvı arayüzey gerilimi ve θ : Temas açısıdır.

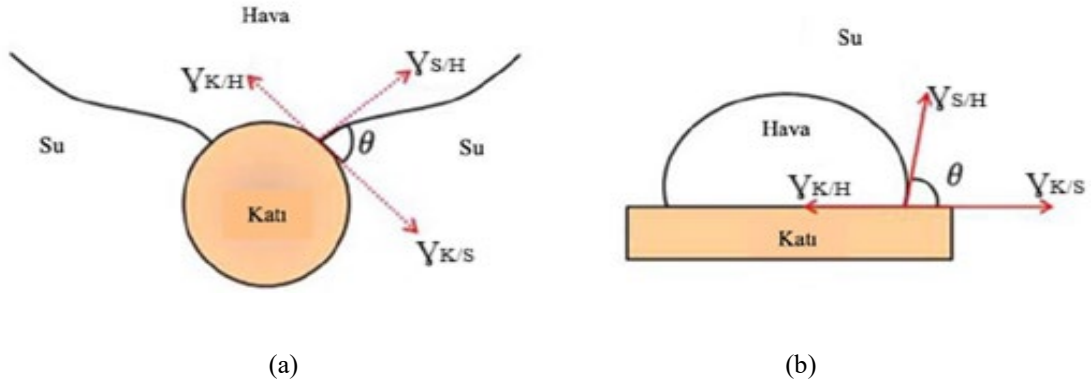
Şekil 2.4' de verilen sıvı damlası katı bir yüzey üzerinde yayıldığında temas açısı bu üç yüzey geriliminin dengesiyle belirlenir.

Eğer $\theta < 90^\circ$ ise, sıvı yüzeyi ıslatır (hidrofilik yüzey).

Eğer $\theta > 90^\circ$ ise, sıvı yüzeyi ıslatmaz (hidrofobik yüzey).

$\theta = 0^\circ$ ise, mükemmel ıslanma (sıvı tamamen yayılır).

$\theta = 180^\circ$ ise, tamamen ıslanmama (sıvı yüzeyde top gibi kalır).



Şekil 2.4. (a) Hava kabarcığına tutunan tane ve (b) temas açısı ve yüzey gerilim kuvvetlerinin klasik gösterimi (Wills ve Finch, 2015).

Köpük stabilitesini etkileyen ana faktörler tanelerin hidrofobiklik dereceleri, köpürtücü türü ve dozajı, tane boyutları ve hava hızının etkisi olup sırası ile açıklanmıştır (Subrahmanyam ve Forssberg, 1988; Barbian ve diğ., 2005; Tsatouhas ve diğ., 2006; Farrokhpay, 2011).

Hidrofobiklik derecesinin etkisi; köpük fazında drenaj gerçekleşmediği süreçte hidrofobik tanelerle kaplanmış hava kabarcıklarının hareket kabiliyeti, ortamdaki yüksek katı/su oranı nedeniyle azalır. Drenaj devam ettiğinde ise kabarcıkların patlaması ve birleşmesi sonucu bir miktar malzeme yeniden pülp fazına geçebilir. Ancak birçok flotasyon sisteminde, hidrofobik tanelerin kabarcık yüzeyine bağlanması, kabarcıkların mekanik dayanımını artırmakta ve bu sayede köpük stabilitesini güçlendirmekte, drenajı ise yavaşlatmaktadır. Bu nedenle, kabarcıkların hidrofobik taneler ile hangi oranda kaplandığı hem ayırım verimliliği hem de konsantreye alınan köpüğün stabilitesi açısından kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir (Barbian ve diğ., 2007).

Eğer drenaj hızlı olursa köpük daha kuru olmakta, kabarcıkların birleşme ve patlama olasılığı artmakta ve bazı hidrofobik taneler pülpe geri düşebilmektedir.

Eğer drenaj yavaş ve kontrollü olursa köpük stabilitesi artmakta, taneler daha iyi taşınmakta ve flotasyon performansı iyileşmektedir (Dippenaar, 1982a,b; Johansson ve Pugh, 1992; Ata ve diğ., 2003).

Schwarz ve Grano (2005), gerçekleştirdikleri bir çalışmada, 69° temas açısına sahip tanelerle yapılan deneylerde, köpük yüksekliğinin artmasıyla hem köpük fazındaki hem de genel katı kazanımlarında azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, köpük stabilitesindeki düşüşe ve artan kabarcık birleşmesi nedeniyle azalan kabarcık yüzey

alanına bağlanmıştır. Benzer şekilde Ata (2009), yaptığı çalışmada da 66° temas açısına sahip cam tanelerin köpük fazı veriminin, artan köpük yüksekliğiyle birlikte, 55° temas açısına sahip tanelere göre daha düşük olduğu belirtmiştir. En yüksek köpük stabilitesinin orta seviyede hidrofobiklik gösteren tanelerle, en düşük stabilitenin ise düşük hidrofobiklikteki tanelerle elde edildiği rapor edilmiştir.

Köpürtücü etkisi; köpürtücülerin temel işlevi, hava-su arayüzündeki yüzey gerilimini azaltarak köpük stabilitesini artırmaktır (Subrahmanyam ve Forssberg, 1988). Vera ve diğ., (1999) tarafından yapılan çalışmada, flotasyon sırasında kullanılan köpürtücü miktarının, pülp fazında yani sıvı içerisindeki taneciklerin ayrışma verimi üzerinde anlamlı bir etkisinin bulunmadığı belirlenmiştir. Ancak köpürtücü miktarının artırılması köpük fazındaki verimi yükselterek, daha fazla mineralin köpükle birlikte yüzeye taşınmasını sağlamıştır. Bu durum, köpürtücünün özellikle köpük fazının stabilitesi ve taşınabilirliği üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Köpürtücü miktarındaki artış, kabarcık stabilitesini geliştirerek köpük fazındaki verimi artırmaktadır (Barbian ve diğ., 2005; Rahman ve diğ., 2015a). Daha stabil kabarcıkların birleşme olasılığı azalırken, yükselme hızları artmakta ve bu durum tanelerin köpük fazında kalma süresini ve drenaj süresini kısaltmaktadır (Ventura-Medina ve Cilliers, 2002). Bilindiği üzere, köpürtücü dozajı arttıkça yüzeyde oluşan hava kabarcıklarının boyutları küçülmektedir. Bu küçülme, artan köpük stabilitesinin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Genel olarak, köpürtücü dozajındaki artış sonucu artan köpük stabilitesi ile birlikte konsantredeki değerli mineral verimi artarken, aynı zamanda artan sürüklenme nedeniyle konsantrenin tenöründe düşüş gözlemlenmektedir. Chen ve diğ., (2022), farklı kolektör ve köpürtücü kombinasyonlarının köpük stabilitesi üzerindeki etkilerini araştırmış ve özellikle benzin temelli toplayıcılarla yapılan deneylerde, reaktif etkileşimlerinin köpük yüksekliği ve çökme süresi üzerinde doğrudan etkili olduğu saptanmıştır. Uygun dozajlarla oldukça kararlı köpükler elde edilmiş, bu da flotasyon verimliliği açısından önemli kazanımlar sağlamıştır. Köpürtücünün miktarı ve türü kadar, kolektörle nasıl etkileştiği de köpük kalitesini etkilemektedir. Bu yüzden flotasyonun verimli olması için kullanılan kimyasalların birbiriyle uyumu iyi analiz edilmelidir.

Tane boyutunun etkisi; literatürde ince taneler için köpük fazı veriminin daha yüksek olduğu buna karşılık artan tane boyutuyla birlikte bu verimin azaldığı belirtilmiştir (Seaman ve diğ., 2006; Rahman ve diğ., 2015a). Bu durum, iri tanelerin köpük fazındaki mekanizmalar sonucunda daha hızlı drenaj eğiliminde olmalarıyla

açıklanmaktadır (Seaman ve diğ., 2006; Zanin ve diğ., 2009). Ek olarak, köpük fazı verimini etkileyen faktörler arasında yalnızca tane boyutu değil, aynı zamanda yüzey hidrofobikliği, köpük stabilitesi ve flotasyon kimyasalları da önemli rol oynar. Örneğin, Ata ve diğ., (2003), köpük fazındaki drenaj hızının, köpük yapısının viskozitesi ve sıvı içeriğiyle doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda, iri tanelerin drenaj eğilimi, köpük filminin incilmesi ve sıvı drenajının artmasıyla daha da belirginleşir. Jameson ve diğ., (2020), iri tanelerin flotasyon verimini artırmak için daha yüksek hidrofobiklik sağlayan yüzey aktif maddelerin kullanımının etkili olabileceğini belirtmiştir. Bununla birlikte, iri tanelerin düşük verimi, genellikle flotasyon hücresi tasarımındaki hidrodinamik koşulların optimize edilmesiyle kısmen giderilebilir (Shahbazi, 2023).

Hava hızının etkisi; hava hızı, pülp fazında kabarcık boyutunu ve kabarcıkların üzerindeki tanecik yüklenmesini köpük fazında ise tanelerin sürüklenmesini ve köpükte kalma süresini etkiler (Barbian ve diğ., 2005; Hadler ve diğ., 2012). Yapılan çalışmalarda, hava hızının artmasıyla yüzeydeki hava kabarcıklarının hareketliliğinin arttığı gözlenmiştir (Ventura-Medina ve Cilliers, 2002; Rahman ve diğ., 2015a). Hava hızının yükselmesi tanelerin köpükte kalma süresini kısaltır ve bu nedenle köpük fazı veriminde artış olur. Ancak bu durum, konsantredeki değerli mineral oranının düşmesine neden olabilir. Çok yüksek hava hızlarında ise taneler kabarcıklardan koparak flotasyon verimi azalabilir. Öte yandan, düşük hava hızlarında tanelerin köpükte daha uzun kalması kabarcıkların patlamasına ve kabarcık hareketliliğinin azalmasına yol açarak konsantre verimini düşürebilir (Barbian ve diğ., 2005).

Flotasyonda kabarcık boyutlarını ölçme ve tahmin etme teknikleri şu kategorilere ayrılabilir:

- Fotografik ve görüntü analizi yöntemleri
- Elektriksel iletkenlik problemleri
- Elektriksel direnç tomografisi
- Akustik yöntemler
- Drift akış hesaplama
- Eşdeğer hacim silindir yöntemi/UCT yöntemi
- Optik problemler
- Manyetik rezonans görüntüleme.

Kabarcık boyutu ölçümü, fotografik yöntem kullanılarak iki ve üç fazlı sistemlerde kabarcık boyutlarını tahmin etmek için iyi kabul görmüş tekniklerden biridir. Fotografik yöntemler iki ana yönetime ayrılabilir:

- Köpüklerde (iki fazlı) genellikle şeffaf sistemlerde ölçüm,
- Köpüklerde (üç fazlı) veya/opak flotasyon sistemlerinde ölçüm.

İki fazlı fotografik yöntem: Bu yöntem köpük sütununa göre en az iki farklı konumdan kabarcık boyutlarının ölçülmesine olanak tanır. Videolar veya fotoğraflar flotasyon sütununun üstünden ve herhangi bir yanından çekilebilir (Cole, 2011).

Üç fazlı ölçüm yöntem: Endüstriyel ölçekli flotasyonda, köpük kabarcık boyutları genellikle fotografik yöntem kullanılarak köpüğün yüzeyinden tahmin edilmektedir. Köpük flotasyonunu kontrol etmek amacıyla köpüğün yüzeyinden video çekilmesi, flotasyon makine görüş kontrolünün temelini oluşturmaktadır. Makine görüşü, köpük kabarcık boyutlarını tahmin etmek için en yaygın kullanılan, en çok incelenen ve ticari olarak mevcut olan yöntemdir (Aldrich ve diğ., 2010; Nakhaei ve diğ., 2023a;b).

2.5. Flotasyon Kinetiği

Flotasyon kinetiği, mineral tanelerinin hava kabarcıklarıyla etkileşimini ve bu etkileşimin zamanla nasıl gerçekleştiğini inceleyen bir alandır ve tane-kabarcık çarpışmaları ve bağlanma süreçlerine odaklanmaktadır (Arbiter ve Harris, 1962). Yani, flotasyon sürecinin kinetiği, başarılı kabarcık-parçacık çarpışmasına, tutunmaya ve kabarcık-parçacık agregasının, flotasyon hücresinin pülp fazındaki türbülanslı ortamdan kaynaklanan ayrılma kuvvetlerini aşma yeteneğine bağlıdır. Kinetik, başarılı kabarcık-parçacık çarpışması ve tutunma süreçlerinin kümülatif bir sonucudur. Flotasyon sürecinin optimizasyonu, simülasyonu ve kontrolü için çok önemlidir (Chander ve Polat, 1995). İlk flotasyon kinetik model, Zuniga (1935) tarafından geliştirilmiş olup tane-kabarcık çarpışma oranının tane sayısına göre birinci dereceden olduğu ve sistemdeki kabarcık konsantrasyonunun sabit kaldığı varsayımına dayanır. Yıllar içinde literatürde çok sayıda farklı flotasyon kinetik modeli önerilmiş ve yayınlanmıştır ancak Zuniga (1935) tarafından tanıtılan birinci dereceden kinetik model yaygın şekilde kullanılmaya devam etmektedir. Örneğin, Kolombiya'daki bir kömür hazırlama tesisinden atıklardaki kömürün flotasyon hızını modellemek için beş farklı kinetik model değerlendirilmiş ve klasik birinci dereceden modelin en iyi uyumu sağladığı bulunmuştur (Chaves ve Ruiz, 2009).

Flotasyon hız sabiti (k), yalnızca toplama bölgesinde gerçekleşen süreçler için kullanılmaktadır. Bu sabit, yüzeysel gaz hızına, çarpışma ve yapışma olasılıklarına ve kabarcık boyutuna bağlıdır ve kömürün yüzme kabiliyetini yansıtmak için kullanılmaktadır (Arbiter ve Harris, 1962; Huber-Panu ve diğ., 1976; Cheng ve diğ., 2013). Kinetik modellerin geliştirilmesi genellikle flotasyon hız sabiti dağılımlarına bağlıdır ve farklı dağılım fonksiyonları önerilmiştir. Birinci dereceden kinetik denklemi Eşitlik 2.4'teki gibi ifade edilmektedir (Vanangamudi ve Rao, 1986; Govindarajan ve diğ., 1991; Polat ve Chander, 2000).

$$R = R_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (2.4)$$

Burada, R yanıcı madde verimini % cinsinden ifade ederken, k birinci dereceden hız sabitidir (s^{-1}). t flotasyon süresi (s), e^{-kt} eksponansiyel azalma faktörü ve R_{∞} nihai (teorik maksimum) verimi temsil etmektedir. Bu model, flotasyon kinetiklerini tanımlamak için nihai verim ve birinci dereceden hız sabiti olmak üzere iki parametre kullanılmaktadır. Bu parametreler, verim-zaman eğrisinden deneysel verilerle belirlenebilmektedir. Nihai verim kimyasal değişkenlere, hız sabiti ise besleme tane boyutu, hava akış hızı ve karıştırma hızı gibi fiziksel değişkenlere bağlıdır (Nguyen ve Schulze, 2003).

Eğer $R_{\infty} = 1$ alınırsa (normalize edilmiş durumda):

$$R = 1 - e^{-kt}$$

1) Her iki taraftan 1 çıkarılır:

$$1 - R = e^{-kt}$$

2) Doğal logaritma alınır:

$$\ln(1 - R) = -k * t$$

Yani $\ln(1-R)$, zamanla doğrusal olarak azalan bir fonksiyon olur ve eğimi -k'dır. Bu, deneysel veriden k değerini bulmak için çok kullanılır:

t eksenine karşı $\ln(1-R)$ grafiği çizilir. Eğimi -k çıkar.

Sripriya ve diğ., (2003), kömür flotasyon sürecini verimliliğini artırmak için klasik birinci dereceden flotasyon modelini kullanarak “değiştirilmiş flotasyon parametreleri” k_{mod} ve SI'yı Eşitlik 2.5'te tanımlamıştır. SI seçicilik indeksi olup kömürün değiştirilmiş hız sabitinin külün değiştirilmiş hız sabitine oranı olarak tanımlanır:

$$SI = \frac{k_{\text{mod}_{\text{kömür}}}}{k_{\text{mod}_{\text{kül}}}} \quad (2.5)$$

Burada k_{mod} , değiştirilmiş flotasyon hız sabitidir ve R_{∞} ile k 'dan $k_{\text{mod}} = R_{\infty} \times k$ olarak hesaplanır.

Kömür flotasyon kinetikleri ve dolayısıyla flotasyon hız sabiti, reaktif türü ve dozajı, pülp pH'ı ve yoğunluğu, tane boyutu, gaz akış hızı (yüzeysel gaz hızı), kabarcık boyutu, sıcaklık, karıştırma hızı, köpük derinliği, flotasyon hücresi tasarımı gibi birçok fiziksel ve kimyasal değişkenlerden etkilenmektedir (Sokolović ve diğ., 2012; Fan ve diğ., 2013). Sabit koşullar altında çalışan bir süreç için, flotasyon hız sabitinin, flotasyon olasılığı (P) ve kabarcık yüzey alanı akışı (S_b) ile doğrudan orantılı olduğu bulunmuştur; bu ilişki Eşitlik 2.6'da verildiği gibi ifade edilebilir (Yoon ve Mao, 1996).

$$k = \frac{1}{4} S_b \cdot P \quad (2.6)$$

Kabarcık yüzey alanı akışı (S_b), tanelerin yapışabileceği kabarcık yüzey alanını ifade eder ve ortalama kabarcık boyutu (d_b) ile yüzeysel hava hızı (J_g) kullanılarak;

$S_b = \frac{d_b}{6J_g}$ formülüyle hesaplanır.

Szatkowski (1985) tane boyutu (d_p), kabarcık boyutu (d_b), hava tutunum(C_a), hava akış hızı (J) ve pülp hacmi (V_s) gibi kritik işletme parametrelerine bağlı olarak flotasyon hız sabiti için alternatif bir deneysel model önermiştir; bu model Eşitlik 2.7'de verildiği gibi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$k = A \frac{d_p (0.806 C_a^{-0.33} - 0.5) \cdot J}{V_s d_b^2} \quad (2.7)$$

İnce kok kömürünün flotasyonu üzerine yapılan başka bir çalışmada, şekli uzun ve ince olan köpüklerin daha fazla kömür parçası topladığı görülmüştür. Ayrıca bu süreçte elde edilen deney verilerinin, birinci dereceden ve dikdörtgen dağılımlı bir matematiksel modele iyi uyum sağladığı belirlenmiştir (Ma ve diğ., 2018). Farklı boyutlardaki kömür numunelerinin flotasyon testlerinde, doğrusal birinci dereceden modelin 37 μm ve 375 μm için, fraksiyonel (kesirli) dereceli modelin ise 188 μm ve 100 μm için en uygun olduğu belirlenmiştir (Bu ve diğ., 2017). İnce kömür taneciklerinin boyut, bileşim ve yoğunluk bilgileri mikroskopik görüntüleme ile analiz edilerek flotasyon performansını iyileştirecek modeller geliştirilmiştir (Ofori ve diğ., 2006).

2.6. Flotasyon Makineleri

Flotasyon işlemi mineral zenginleştirmede kullanılan ve özel olarak tasarlanmış makineler veya hücreler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu ekipmanlar, flotasyon sürecinin etkinliğini sağlamak için belirli görevleri yerine getirecek şekilde geliştirilmiştir. Öncelikle, pülpteki tüm taneciklerin işlem süresince süspansiyonda kalması sağlanmaktadır. Hava kabarcıklarının oluşumu için pülpe hava enjeksiyonu yapılır veya alternatif yöntemlerle kabarcık üretimi desteklenmektedir. Değerli minerallerin bu kabarcıklarla çarpışması ve etkileşime girmesi, ayırma sürecinin temelini oluşturmaktadır. Kabarcıklara tutunan değerli minerallerin gang mineralinden ayrılabilmesi için kararlı bir köpük tabakası oluşturulması kritik bir gerekliliktir. Bunun yanı sıra, yapılan besleme sonucu elde edilen konsantre ve atıkların sistemden düzenli bir şekilde alınabilmesi için gerekli düzenekler bulunmaktadır.

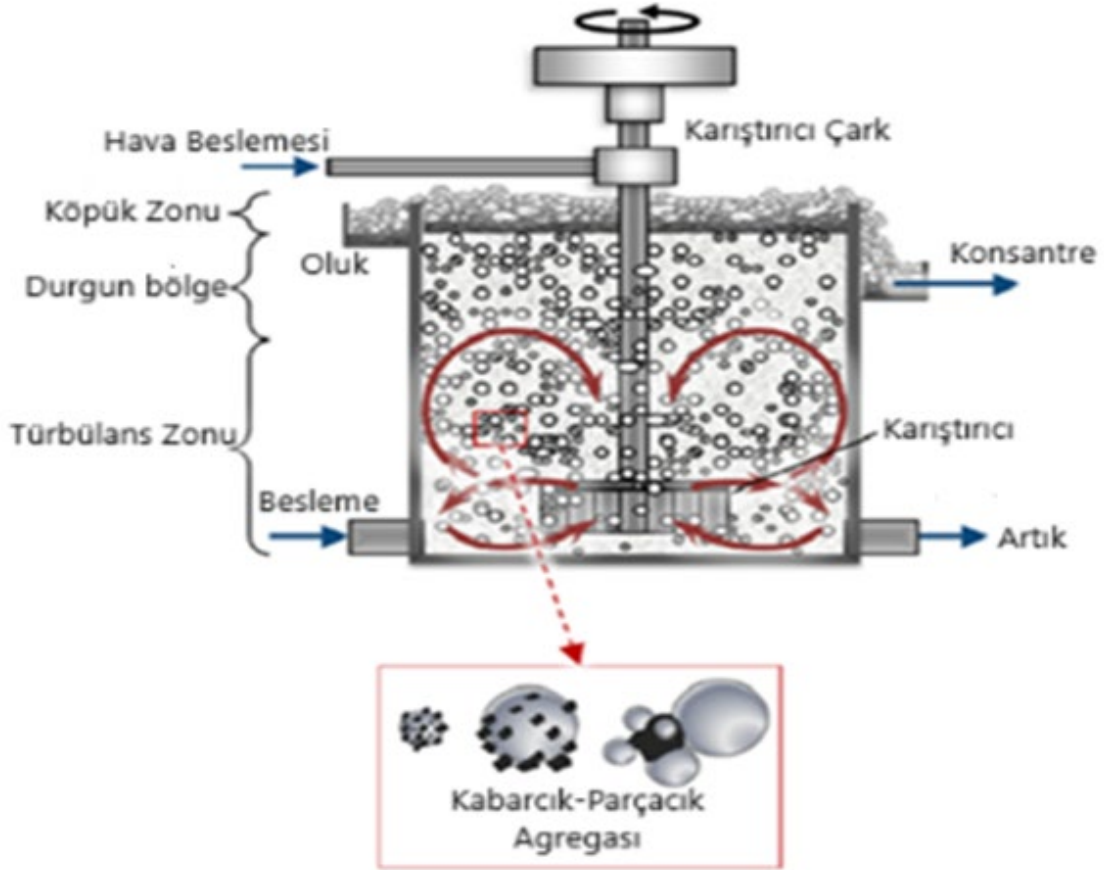
Flotasyon makinelerinde pülp seviyesi, köpük yüksekliği ve reaktif dozajı gibi işletme parametrelerinin kontrol edilebilmesi için uygun mekanizmalar tasarlanmıştır. Flotasyon makineleri, bu işlevleri etkin bir şekilde yerine getirecek şekilde üretilmektedir. Endüstri ihtiyacına uygun çok sayıda flotasyon makinesi tasarlanmış olmasına rağmen yalnızca birkaçı yaygın kullanım kazanmıştır. Günümüzde öne çıkan makineler arasında mekanik karıştırırmalı hücreler ile hava karıştırırmalı (pnömatik) kolon tipi hücreler ve Jameson flotasyon hücreleri yer alır. Bu makineler, ticari olarak erişilebilir olmaları ve proses gereksinimlerini karşılamaları nedeniyle yaygın kabul görmektedir (Kohmuench ve diğ., 2018).

Mekanik karıştırırmalı hücreler, karıştırıcılar aracılığıyla süspansiyonu homojen tutar ve hava dağılımını sağlar. Kolon hücreleri yüksekliği ve kabarcık kontrolü ile seçiciliği artırır. Jameson hücreleri ise jet akımıyla yoğun kabarcık üretimi sunarak hızlı flotasyon sağlamaktadır.

2.6.1. Mekanik Flotasyon Hücresi

Mekanik hücrelerden olan Denver flotasyon hücreleri genellikle küçük tesislerde ve çok aşamalı temizleme devrelerinde tercih edilen, hücreden hücreye çalışan makineler arasında en iyi bilinenidir. Makinenin adı ve tasarımı Minerals Separation Corporation'ın eski bir modelinden esinlenmiş gibi görünse de Arthur W. Fahrenwald tarafından 1922'de patentlenmiştir (Lynch ve diğ., 2007). Çeşitli cevherlerin işlenmesinde ve atık su arıtma uygulamalarında sağladığı yüksek verimlilik Denver hücrelerinin türbülanslı ve durgun bölgelerdeki optimize edilmiş hidrodinamik koşulları

ile köpük fazındaki etkin toplama süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.5'te mekanik flotasyon hücresi ve hidrodinamik koşulları verilmiştir. Flotasyon hücresinde farklı işlevlere sahip üç temel hidrodinamik bölge bulunmaktadır. Türbülanslı bölge (bölge I), durgun bölge (bölge II) ve köpük bölgesi (bölge III) (Miskovic, 2011).



Şekil 2.5. Mekanik flotasyon hücresi ve temel bileşenleri (Miskovic, 2011).

Türbülanslı bölge karıştırıcı civarında yer almaktadır. Bu bölgede oluşturulan güçlü türbülans ile pülp sıvısı ve hava kabarcıkları yoğun şekilde karışmaktadır. Katı parçacıkların süspansiyonda tutulması ve iri kabarcıkların ince kabarcıklara parçalanması için kritik önemdedir. Pervanenin dönme hareketi parçacıkları süspansiyonda tutmak için gerekli enerjiyi sağlarken, küçük kabarcıkların oluşmasını desteklemekte ve verimli kabarcık-parçacık etkileşimi için uygun hidrodinamik koşulları korumaktadır. Sawant ve diğ., (1981), Denver tipi flotasyon hücrelerinde hava indüksiyon hızı (Q), etkili arayüz alanı (a) ve kütle transfer katsayısı (k_{La}) ölçümlerinde, pervane hızının ve sıvı batma derinliğinin bu bölgeyi doğrudan etkilediğini göstermiştir.

Durgun bölge; türbülansın azaldığı daha stabil bir tabaka olarak karıştırıcının üstünde yer almaktadır. Kabarcıklar bu bölgede yükselirken içlerindeki parçacıkların

büyük kısmını taşıyabilmekte, ancak yüksek enerjili girdap etkisi azalmakta ve daha seçici hareket kabiliyeti sağlamaktadır. Türbülanslı bölgeye göre daha az enerji içermekte ve gang tanelerinin ayrılmasını sağlayarak köpük fazını sabit tutan pülp-köpük arayüzünü korumak için uygun koşullar sunmaktadır (Yianatos, 2007).

Köpük zonu, köpük yüzeyinin oluşturduğu flotasyon işleminin üst temizleme bölgesidir. Burada yoğun kabarcık-parçacık agregaları pülp-köpük arayüzünden hava-köpük arayüzüne taşınarak mineral konsantresi olarak toplanmaktadır (Yianatos, 2007).

Yüksek türbülans bölgesi, karıştırıcının hemen çevresinde yer alır ve en yoğun enerji girdisinin sağlandığı alandır. Bu bölgede kabarcıklar parçalanarak küçük boyutlara gelir ve mineral-kabarcık çarpışmaları ile ilk agregat oluşumu en yüksek seviyede bulunmaktadır. Orta türbülans bölgesi, karıştırıcı pervaneden uzaklaştıkça enerji seviyesinin azaldığı, mineral-kabarcık agregatlarının daha stabil hale geldiği geçiş alanı olarak adlandırılmaktadır. Düşük türbülans bölgesi ise hücrenin üst kısmında, köpük tabakasının hemen altında bulunmaktadır. Bu bölgede türbülansın düşük olmasından dolayı agregatların parçalanmadan köpük fazına geçmesini sağlamakta, böylece seçicilik ve köpük stabilitesi korunmaktadır (Yianatos, 2007).

Denver flotasyon hücrelerinin ideal hidrodinamik koşulları ve köpük fazındaki verimli toplama mekanizmaları sayesinde yüksek verim oranları sağlamaktadır. Pita (2015), kaolinit cevheri ile yapılan testlerde sürüklenmenin tane boyutu arttıkça azaldığını rapor etmiştir. İnce tane flotasyonunda operatör kaynaklı değişkenliği azaltmak amacıyla, Roberts ve diğ. (1982), Denver flotasyon hücresine şeffaf ve dayanıklı bir plastik malzeme olan perspex'ten yapılmış bir ek parça takarak modifikasyon yapmıştır. Bu şeffaf ek parça, hücrenin iç yapısının daha iyi gözlemlenmesini sağlayarak operatörün kontrolünü artırmış ve böylece daha tutarlı, yani daha az değişken sonuçlar elde edilmiştir. Fosfat flotasyonunda ise Hernainz ve diğ., (2005), Denver D-12 hücresinin oleik asitle daha hızlı flotasyon sağladığını ve farklı boyutlardaki mineraller ile flotasyon hız sabiti arasında doğrusal bir ilişki olduğunu belirlemiştir. Atık su arıtımında da Denver hücreleri etkili bir çözüm sunmaktadır. Yel ve diğ., (2024), mermer işleme ve deterjan üretim atık sularının %90-%10 karışımında, Denver flotasyon sistemiyle 10 dakika ve 2 L dk⁻¹ hava akış hızında yüksek giderim oranları elde edildiğini bildirmişlerdir.

Denver flotasyon hücreleri mineral flotasyonundan atık su arıtımına kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu hücrelerin performansı türbülanslı ve durgun bölgelerdeki optimize edilmiş koşullar ve köpük fazındaki etkin toplama süreçleriyle desteklenmektedir.

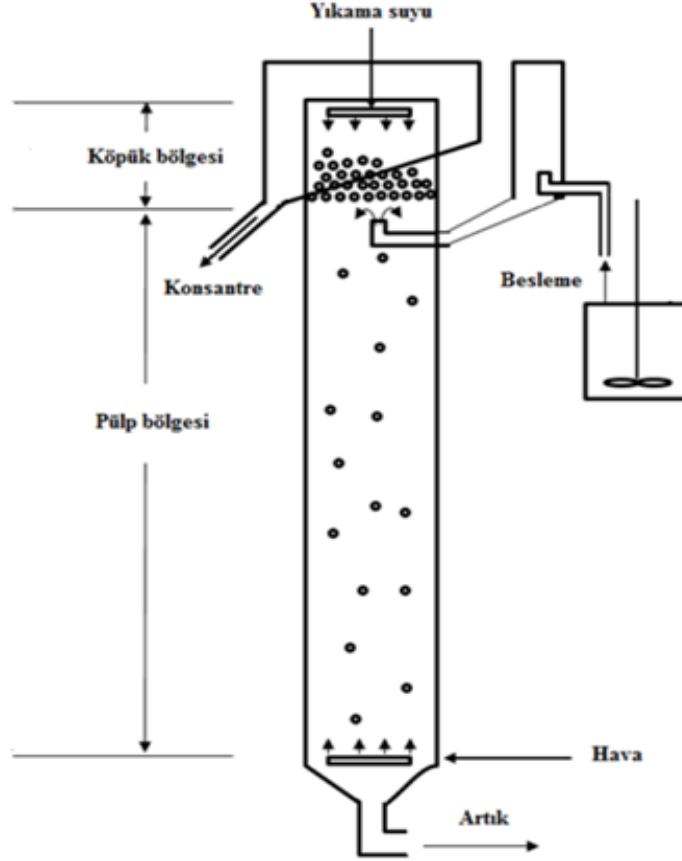
2.6.2. Flotasyon Kolonu

Kolon flotasyonu teknolojisi yirminci yüzyılın madencilik alanındaki en dikkat çekici buluşlarından biri olarak kabul edilir. Kolon flotasyonunun temelleri, 1961 yılında Pierre Boutin ve Remi Tremblay tarafından atılmış ve 1963 yılında patentlenmiştir (Boutin ve Tremblay, 1964). İlk geliştirildiği günden bu yana, kolon flotasyon teknolojisi çeşitli yeniliklerle evrilmiş ve ticari ölçekte yaygınlaşmıştır. Kolon flotasyonunda basınçlı havanın bir hava dağıtıcı (sparger) aracılığıyla kolona enjekte edilmesiyle daha ince ve homojen kabarcıklar sağlanmaktadır. Ayrıca, kolonlarda köpük yüzeyine uygulanan yıkama suyu, köpüğün temizliğini artırarak metalurjik performansı yükseltmektedir (Finch ve Dobby, 1990). Flotasyon kolonları düşük sermaye yatırımı ve işletme giderleriyle ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Yüksek köpük bölgesi daha etkili ayırıştırma sağlayarak verimliliği artırmaktadır. Basit yapısı sayesinde kullanımı kolay olan bu kolonlar aynı zamanda küçük izdüşümüyle daha az yer kaplayarak tesislerde alan tasarrufu sağlamaktadır. Bu özellikleri ile yüksek verim elde edilmesini sağlamaktadır (Yang, 1988; Yianatos ve diğ., 1988). Uzun yıllardır devam eden simülasyon ve kontrol odaklı çalışmalar, endüstrinin geçmişte elde edilen bilgi ve deneyimlerden yararlanarak flotasyon performansını artırabileceğini göstermekte ve gelecekteki araştırmalar için önemli odak alanları sunmaktadır (Bouchard ve diğ., 2009).

Kolon flotasyon hücresinin hidrodinamik bölgeleri ve işlevleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Besleme bölgesi (feed zone), kolonun orta kısmında, besleme giriş noktasının hemen altında yer alan ve katı parçacıkların hava kabarcıklarıyla ilk temasını sağlayarak çarpışma ve agregasyonun gerçekleştiği düşük türbülanslı alandır. Zenginleştirme ya da toplama bölgesi (collection zone), alt seviyeden orta seviyeye kadar uzanan ve karşı-akım etkisiyle kabarcıkların yukarı, parçacıkların ise aşağı hareket ederek kabarcık-parçacık agregalarının oluştuğu ana hattır. Köpük bölgesi (froth zone), üst kısımda yer alan ve köpüğün yoğunlaşp fazla suyun drenajla uzaklaştırılarak

konsantre kalitesinin artırıldığı yerdir. Artık bölgesi (tailings zone) ise kolonun en altında bulunan ve ağır, kabarcıkla taşınamayan parçacıkların toplandığı, sistemden uzaklaştırıldığı bölgedir (Yianatos, ve diğ., 1998). Flotasyon kolonuna ait bölgeler ve şematik gösterimi Şekil 2.6’de verilmiştir.



Şekil 2.6. Flotasyon kolonunun şematik olarak gösterimi (Kaya ve Laplante, 1985).

Bir flotasyon kolonu, temel olarak iki ana bölgeye ayrılır:

Köpük Bölgesi (Yıkama Bölgesi): Pülp-köpük arayüzünden kolonun tepesine kadar uzanan bu bölge, yüklü kabarcıkların toplandığı ve yıkama suyuyla temizlendiği alandır (Uribe-Salas ve diğ., 2003). Kabarcıklar arasındaki su, toplama bölgesine doğru ilerlerken kabarcıkları saran su tabakası incelmektedir. Köpük bölgesine ulaşıldığında, kabarcıkların yüzey alanı azalmaktadır. Eğer köpük yeterli stabiliteye sahip değilse, taşınan parçacıklar köpükten ayrılarak toplama bölgesine geri döner. Bu dinamik, köpük bölgesindeki verim oranını kolonun genel verimliliği açısından kritik bir unsur haline getirmektedir.

Toplama Bölgesi (Geri Kazanım Bölgesi): Pülp köpük arayüzünün altında yer alan ve temel mikro olayların gerçekleştiği alandır. Bu olaylar; parçacık ile kabarcığın

karşılılaşması, karşılaşan parçacığın, yeterli yüzey alanına sahip kabarcıkla çarpışması, parçacığın kabarcığa bağlanması (parçacık-kabarcık birleşiminin oluşması) ve parçacık-kabarcık birleşiminin kesme kuvvetlerine karşı dayanıklılık göstererek (stabilitesini koruyarak) yükselmesi şeklinde meydana gelmektedir (Yianatos, 1998).

Mikro olaylar sonucu tanenin yüzebilme olasılığı (PF) ise aşağıdaki Eşitlik 2.8'deki formül ile hesaplanmaktadır (Laskowski, 2001);

$$PF = P_i \times P_c \times P_a \times P_s \quad (2.8)$$

burada, P_i taneciklerin karşılaşma olasılığı, P_c taneciklerin çarpışma olasılığı, P_a taneciklerin yapışma olasılığı, P_s agreganın parçalanmama olasılığıdır. Flotasyonun başarısını belirleyen dört mikro olayın (karşılaşma, çarpışma, yapışma, parçalanmama) olasılıklarının çarpımıdır. Her bileşen kabarcık boyutu, parçacık özellikleri, hidrodinamik koşullar ve fiziksel-kimyasal faktörler gibi parametrelere bağlıdır. Eşitlik 2.9'da formülün genişletilmiş hali verilmektedir;

$$PF = P_i(D_p, D_b, V_g, V_s, \mu) \times P_c(D_p / D_b, R_e, \mu) \times P_a(\theta, \sigma, T_c, pH) \times P_s(F_a, \tau, H_f) \quad (2.9)$$

Burada;

D_p : Parçacık çapı, D_b : Kabarcık çapı, V_g : Gaz akış hızı, V_s : Pülp akış hızı, μ : Pülp viskozitesi, R_e : Reynolds sayısı, θ : Temas açısı, σ : Yüzey gerilimi, T_c : Temas süresi, F_a : Bağlanma kuvveti, τ : Kesme gerilmesi, H_f : Köpük yüksekliği.

Bu formül, flotasyon performansını verimli hale getirmek için hangi parametrelerin kritik olduğunu göstermektedir. Örneğin:

Küçük kabarcıklar ($D_b \downarrow$) P_i ve P_c 'yi artırır.

Hidrofobik yüzeyler ($\theta \uparrow$) P_a 'yı iyileştirir.

Stabil köpük ($H_f \uparrow$) P_s 'yi destekler.

Ancak, bu olasılıkların her biri deneysel olarak veya karmaşık hidrodinamik modellerle belirlenir. Çünkü sistemde çok fazla değişken etkileşime girer (Kaya ve Laplante, 1985).

Bir flotasyon kolonunun performansı, besleme özellikleri, tasarım ve işletme değişkenleri tarafından etkilenmektedir (Tuteja ve diğ., 1995)

Besleme özellikleri; besleme akış hızı, pH, tenör, katı içerik, mineralojik özellikler, parçacık boyut dağılımı ve serbestleşme ile ilişkilidir.

Tasarım değişkenleri; kolon çapı, yüksekliği (yükseklik-çap oranı), kolon şekli, dikey sabit plaka, yıkama suyu tasarımı ve pozisyonu (köpük üzerinde veya içinde), hava dağıtıcı türü ve pozisyonu ile besleme yüksekliği ile ilişkilidir.

Çalışma değişkenleri; aşağıya doğru pülp akış hızı, köpürtücü konsantrasyonu, pülp yoğunluğu, hava akış hızı, köpük kalınlığı, yıkama suyu akış hızı ve yıkama suyu dağılımı ile ilişkilidir.

Kolon Flotasyonu Verimine Etki Eden Parametreler:

Taşıma kapasitesi (C), flotasyon kolonlarında parçacık toplama sürecinin üst sınırını belirleyen temel bir parametredir ve birim zaman başına kolon kesit alanından toplanan yüzen mineralin ağırlığı olarak tanımlanmaktadır (Choung ve diğ., 1993). Sastri (1998), taşıma kapasitesinin belirlenmesi için besleme katı oranının sistematik bir şekilde artırılmasını ve bu oranın maksimum değere ulaştığı noktanın kolonun sınırını gösterdiğini belirtmektedir. Literatürde taşıma kapasitesi kolonun çapı, kabarcık boyutu ve köpük stabilitesi gibi tasarım unsurlarıyla yakından ilişkili olduğu vurgulanmıştır (Finch ve Dobby, 1990). Flotasyon kolonlarında köpük bölgesinin derinliğinin seçiciliğe önemli etkisi bulunmaktadır. Ayrıca taşıma kapasitesinin aşılması durumunda, köpük bölgesinde aşırı yüklenme meydana gelebileceği ve bu durumun verimi olumsuz etkileyebileceği ifade edilmektedir (Yianatos ve diğ., 1989). Bu nedenle, taşıma kapasitesi, flotasyon kolonlarının optimum performansını sağlamak için dikkatlice izlenmesi ve kontrol edilmesi gereken bir özelliktir. Taşıma kapasitesi hesabı Eşitlik 2.10'da verildiği gibidir:

$$C = 4 \times Q_g \times D_p \times \rho \times \beta / D_f \quad (2.10)$$

Burada;

C: Taşıma kapasitesi; D_f : Köpükteki kabarcık çapı; β : Kabarcık yüzeyindeki parçacık paketleme faktörü; D_p : Köpükteki parçacığın çapı; ρ : Parçacığın özgül ağırlığı ve Q_g : Gazın akış hızıdır.

Hava Tutunum Yüzdesi (Hold-up, ϵ_g), flotasyon kolonlarında sistem içindeki hava hacminin toplam hacme oranını ifade eden temel bir parametredir (Shah ve diğ., 1982). Hava tutunum kapasitesi, flotasyon performansını doğrudan etkileyen birden çok faktöre bağlıdır. Kabarcık boyutu, bu parametrenin en önemli belirleyicilerinden biridir. İnce kabarcıklar daha yüksek yüzey alanı sağlayarak gaz tutunum oranını artırabilir. Ayrıca, sparger tipi (sparger tasarımı), köpük oluşturu kimyasalların özellikleri, sistemdeki katı madde oranı, hava akış hızı ve pülp akış hızı gibi unsurlar da gaz hold-

up üzerinde etkili rol oynamaktadır (Klimpel ve diğ., 1979). Hava tutunma oranının kolayca hesaplanabileceğini öne sürülmüştür (Finch ve Dobby, 1990). Eşitlik 2.11 hava akış hızı ve kolonun hidrodinamik özelliklerine dayalı olarak pratik bir tahmin sağlamaktadır. Katı maddelerin varlığı ise sistemi karmaşıktır; çünkü katılar, kabarcıkların hareketini ve köpük yapısını etkileyerek gaz hold-up değerinde dalgalanmalara yol açabilecektir (Yianatos, 2007). Dolayısıyla, hava tutunum kapasitesi flotasyon kolonlarının tasarım ve işletme süreçlerinde optimize edilmesi gereken kilit bir değişkendir.

$$\varepsilon_g = 1 - \Delta P / (\rho_{sl} \times g \times \Delta L) \quad (2.11)$$

Burada;

ΔP : İki nokta arasındaki basınç farkı; ΔL : İki noktanın dikey mesafesi ve ρ_{sl} : Süspansiyon yoğunluğudur.

Kabarcık yüzey alanı akışı (S_b), kolonun birim kesit alanında birim zamanda yükselen kabarcık yüzey alanını ölçen bir parametredir ve kabarcık boyutu ile yüzey gaz hızına bağlıdır (Harbort ve Schwarz, 2010). Akış modelleri oluşturmak ve kinetikleri karakterize etmek için önemli bir parametredir. Aşağıdaki Eşitlik 2.12’de verilen denklemlerle hesaplanmaktadır (Tavera ve diğ., 1996):

$$S_b = 6 \times J_g / d_b \quad (2.12)$$

Burada;

S_b : Kabarcık yüzey alanı akışı; J_g : Yüzeysel gaz hızı ve d_b : Kabarcık çapıdır.

Yüzeysel gaz hızı (J_g), bir hücrenin havalandırma kapasitesini ölçen bir parametredir ve özellikle flotasyon kinetiğiyle yakından ilişkilidir. Köpükte sürüklenme yoluyla aşırı gang mineralinin birikmesine yol açarak köpüğün kararlılığını azaltabilir (Gorain ve diğ., 1997). Aşağıdaki Eşitlik 2.13’deki denkleme göre hesaplanır:

$$J_g = Q / A \quad (2.13)$$

Burada;

J_g : Yüzeysel gaz hızı, m/s; Q : Hacimsel hava akış hızı, m³/s ve A : Flotasyon hücresi kesit alanı, m²’dir.

Besleme oranı, literatürde besleme oranının etkisine ilişkin farklı sonuçlar mevcuttur. Genel görüş, besleme oranındaki azalmayla birlikte kalma süresinin arttığı ve buna bağlı olarak verimliliğin arttığıdır (Finch ve Dobby, 1990; Mavros ve diğ., 2013).

Yıkama Suyu (J_w), flotasyon kolonlarında köpük stabilitesiyle doğrudan ilişkili olan yıkama suyunun amacı, drenajı artırmak ve buna bağlı olarak sürüklenmeyi azaltmaktır. Yüksek köpük kalınlığı ve yıkama suyunun optimum değerlerde kullanımıyla verim artırmaktadır (Hacıfazlıoğlu ve Sütçü, 2007). Yıkama suyu miktarının gerekenden fazla olması artan su tüketimi, köpüğün seyrilmesi ve devam eden aşamalarda sorunlar yaratabileceği için istenmemektedir (Aksarı, 1998). Genel olarak optimum bir noktaya kadar verilen yıkama suyu konsantre derecesini artırır ancak optimum seviyeye ulaşıldıktan sonra bu değerlerin düşmesine neden olmaktadır (Peterson ve diğ., 1990).

Bias hızı, flotasyon kolonlarının performansını belirleyen temel özelliklerden biri olup, köpük bölgesindeki aşağı yönlü net su akışının, artık ve besleme akışları arasındaki su miktarı farkıyla tanımlanır (Finch ve Dobby, 1990). Kolona giren su miktarı, konsantreden geri kazanılan sudan fazlaysa pozitif bias oluşur. Tersine, su konsantreye doğru hareket ederse negatif bias meydana gelir (Yianatos ve Bergh, 1995). Pozitif bias genellikle yıkama suyunun etkisiyle ortaya çıkar. Köpük bölgesine eklenen yıkama suyu, bir yandan pozitif biası dengelerken diğer yandan konsantreye sürüklenen gang minerallerinin ayrılmasını sağlar (Finch ve Dobby, 1990). Ancak, bazı özel durumlarda negatif bias kullanımı da avantaj sağlayabilir. Öteyaka ve Soto 1995, laboratuvar ölçekli kolon flotasyon testlerinde, 126-714 mikrometre arasındaki iri parçacıkların negatif bias köpüksüz bir ortamda hızlı flotasyon kinetiği sergilediğini göstermiştir. Aşağıdaki Eşitlik 2.14’de verilen formül bias hızı ölçümü yaklaşımının temelini oluşturur (Uribe-Salas ve diğ., 2003):

$$B_f = \frac{Q_A - Q_B}{Q_w} \quad (2.14)$$

Burada;

B_f = Bias Faktör; Q_A = Artık Debisi, m^3/s ; Q_B = Besleme Debisi, m^3/s ve Q_w = Yıkama Suyu Debisi, m^3/s ’dir.

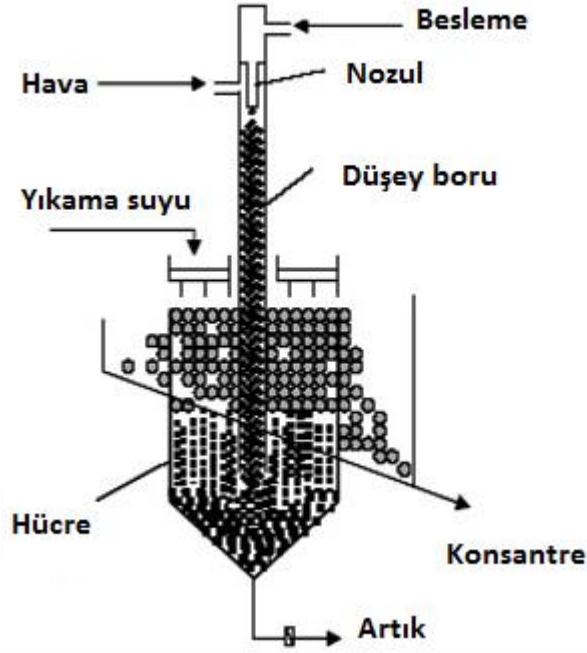
Flotasyon kolonları, geleneksel mekanik flotasyon hücrelerine kıyasla birçok avantaj sunarak daha yüksek performans sağlamaktadır. İlk olarak, düşük yatırım maliyetine sahiptirler. Genellikle kolonlar tesis bünyesinde inşa edilir ve yalnızca kabarcık üretici sistemler ile otomatik kontrol birimleri dışarıdan temin edilir. İşletme maliyetleri açısından da avantajlıdır; enerji ve reaktif tüketimi düşük olup, hareketli parçaların bulunmaması bakım ve yedek parça giderlerini önemli ölçüde azaltır. Basit tasarımı sayesinde sistemin kararlı ve düzenli çalışmasına olanak tanır ve az yer

kaplaması nedeniyle tesis alanından tasarruf sağlar. Ayrıca, kolon içindeki sakin akış koşulları ve ince kabarcık kullanımı, özellikle ince tanelerin ayrılmasında büyük avantaj sağlar. Kalın ve yıkanabilir köpük yapısı sayesinde yüksek tenörlü konsantre elde edilebilir. Bununla birlikte, mekanik hücrelerde sıklıkla karşılaşılan türbülans ve şlam taşınımı gibi problemler, flotasyon kolonlarında önemli ölçüde azaltılmıştır. Son olarak, çok aşamalı temizleme ihtiyacını azaltarak ekipman, enerji ve reaktif kullanımında tasarruf sağlar (Aksani, 1998; Karaca ve diğ., 2022).

Flotasyon kolonları birçok avantaj sunsa da bazı dezavantajlara da sahiptir. Öncelikle, tesislerde mevcut yapı yüksekliğinin sınırlayıcı olması, kolon kurulumunu zorlaştırabilir. Ayrıca, kabarcık üretici sistemler periyodik bakım gerektirdiğinden işletme açısından ilave emek ve zaman maliyeti oluşturur. Kolonlarda kullanılan yıkama suyu da ek bir işletme maliyeti yaratmaktadır. Bunun yanı sıra, artıkların sistemden atılmadan önce seyreltilmesi zorunludur, bu da prosesin karmaşıklığını artırabilir. Flotasyon kolonlarında mineral tanelerinin sistemde uzun süre kalması, özellikle oksidasyona duyarlı mineraller için bir risk oluşturarak flotasyon performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, hızlı oksidasyon eğilimi gösteren cevherlerin zenginleştirilmesinde flotasyon kolonları her zaman uygun bir seçenek olmayabilir (Aksani, 1998; Karaca ve diğ., 2022).

2.6.3. Jameson Flotasyon Hücresi

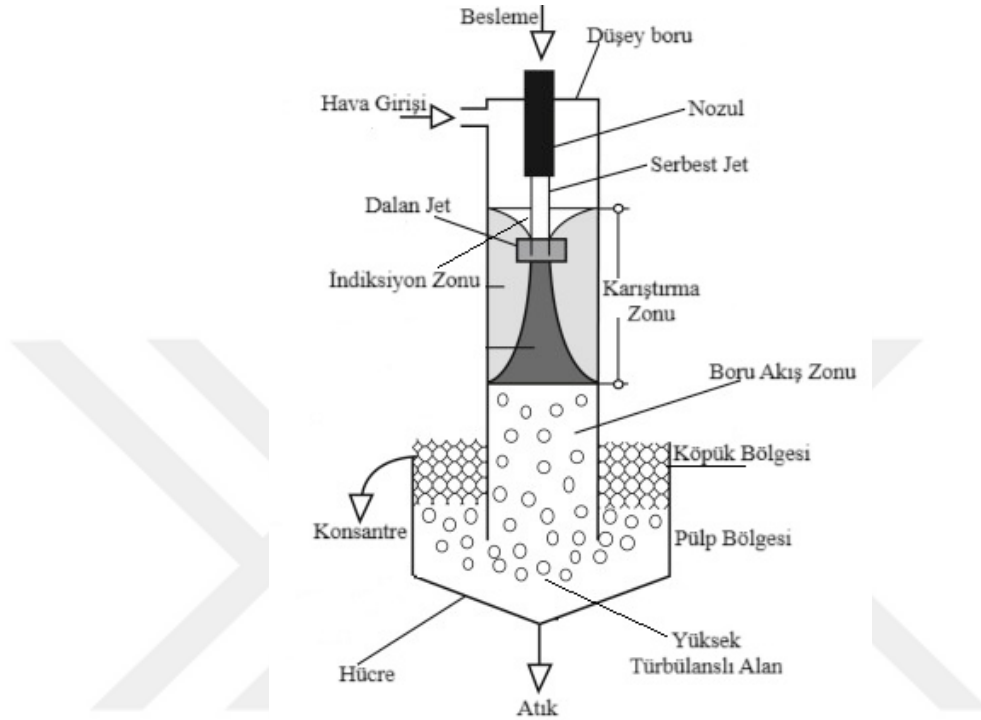
Jameson hücresi, 1980'li yıllarda Prof. Dr. Graeme J. Jameson tarafından geliştirilen ve günümüzde 300'den fazla zenginleştirme tesisinde kullanılan, göreceli olarak yeni bir flotasyon cihazıdır. Bu hücre, kömürden metalik minerallere kadar birçok farklı alanda kullanılmaktadır (Atkinson ve Conway, 1993; Evans ve Atkinson, 1995; Jameson, 2006). Ayrıca Jameson hücresi, kompakt tasarımıyla ince kabarcıklar üretebilmesi sayesinde her tür ince boyutlu mineralin flotasyonu için yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak, Jameson hücresinin performansı iri taneli beslemelerde düşüş göstermektedir (Cowburn ve diğ., 2006; Sahbaz, 2013). Bununla birlikte, mevcut flotasyon tesislerinde iri tanelerin Jameson hücresi ile zenginleştirilmesi operasyonel nedenlerden dolayı gereklidir. Bu nedenle araştırmacılar, hücrenin performansını artırmak için farklı modifikasyonlar ve tasarımlar üzerine çalışmalar yapmışlardır (Cowburn ve diğ., 2006; Şahbaz, 2010). Jameson Flotasyon hücresine ait şematik gösterim Şekil 2.7'de sunulmuştur.



Şekil 2.7. Jameson hücresi şematik gösterimi (Clayton ve diğ.,1991).

Jameson hücresinde hava ve pülp karışımı, ince kabarcıkların oluşturduğu yoğun bir yatağa dağıtılmaktadır. Bu yapı hidrofobik parçacıkların kabarcıklarla çarpışarak toplanması için elverişli bir ortam sağlamaktadır (Jameson, 2006). Oluşan kabarcıklı karışım daha sonra hücrenin ana gövdesine, yani kabarcıkların yüzen parçacıkları taşıyarak pülpden ayırdığı boşaltma bölgesine yönlendirilir. Bu bölgede değerli mineraller köpük halinde toplanırken, gang minerallerinden ayırtmak için köpüğe isteğe bağlı olarak temiz yıkama suyu uygulanabilmektedir. Yıkama suyu gang miktarını azaltarak ayrılma kalitesini artırır ve daha teniz bir konsantre eldesi sağlanır. Ancak, yıkama suyunun aşırı kullanımı hedef minerallerin verimini olumsuz etkileyebilir. Bu dengeyi sağlamak için yıkama suyu debisi, köpük üzerindeki dağılımı ve köpük yüksekliği gibi parametrelerin titizlikle kontrol edilmesi gerekmektedir (Cowburn ve diğ., 2006). Jameson hücresinin sade yapısı ek ekipman gerektirmeden yüksek toplama kapasitesi sunar ve bu da alan tasarrufu sağlayan bir teknoloji haline getirmektedir (Harbort ve diğ., 2003). Ayrıca, hücrenin kendiliğinden aspirasyon yapabilmesi, dışardan hava sağlamak için kompresör veya üfleyici gibi ek ekipmanlara olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Bu özellik, işletme maliyetlerini düşürmekte ve sistemin sade yapısını korumaktadır (Clayton ve diğ., 1991).

Jameson hücresini oluşturan farklı hidrodinamik bölgeler Şekil 2.8’de görülmektedir. Düşey boru içinde serbest su jetinin olduğu bölge, indüksiyon bölgesi, dalma jeti bölgesi, karıştırma bölgesi ve boru akış bölgesi bulunurken, hücre içinde pülp ve köpük bölgesi vardır (Harbort ve diğ., 2003; Şahbaz, 2010).



Şekil 2.8. Jameson hücresindeki hidrodinamik bölgeler (Evans ve diğ.,1995).

Nozul çıkışından düşey boru içinde pülp yüzeyine kadar olan akış bölgesi serbest jet olarak adlandırılır (Evans ve Atkinson, 1995). Nozul çapı, serbest su jetinin çıkış çapına yaklaşık olarak eşittir ancak jet düşey borudan ilerlerken etrafındaki havadan dolayı çapında hafif bir genişleme ve yüzeyinde dalgalanmalar meydana gelir. Bu dalgalanmalar, sisteme verilen hava miktarının artmasıyla güçlenir ve serbest jet, düşey boru içinde vakumlanacak havanın ince kabarcıklara dönüşümü için önemli bir ortam sağlamaktadır (Şahbaz, 2010).

İndüksiyon bölgesi, su jetinin pülp yüzeyine çarptığı noktada oluşan çukur alanıdır. Bu alan, düşey boruya vakumlanan havanın kabarcıklara dönüşebilmesi için gerekli boşluğu yaratır.

Su jetinin hava-pülp karışımı içine girdiği ve indüksiyon bölgesinin hemen altındaki kısım dalma jeti bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölgede, su jetinin oluşturduğu kesme kuvvetleri, havanın küçük kabarcıklara dönüşmesini desteklemektedir (Şahbaz, 2010).

Karıştırma bölgesi, ince kabarcıkların üretildiği ve tane-kabarcık etkileşimlerinin en yoğun olduğu yerdir (Harbort ve diğ., 2003; Şahbaz, 2010). Bu bölgenin altındaki alan ise kabarcıkların pülp içinde eşit şekilde dağıldığı boru akış bölgesidir. Kabarcık boyutları, hava ve besleme oranları ile köpürtücü miktarına bağlıdır (Şahbaz, 2010).

Düşey borudan çıkan pülp, ayırma tankında iki farklı hidrodinamik bölge ile karşılaşır. Bunlardan ilki, yüksek debili pülp boşalma bölgesidir. Bu bölgede büyük taneler türbülans nedeniyle kabarcıklardan ayrılırken, hidrofobik taneler köpük bölgesine taşınır.

Köpük bölgesi, hücrenin üst kısmında ve pülp bölgesinden yükselen parçacıkların biriktiği, hava oranı %60-70 olan alandır. Üstten uygulanan yıkama suyu, köpük yüksekliğini ve dolayısıyla flotasyon verimini belirlemektedir (Şahbaz, 2010).

Jameson Flotasyonu Verimine Etki Eden Parametreler:

Köpük derinliği, jameson hücresinde köpük derinliği, yapılan işleme ve istenen sonuca göre ayarlanır. Eğer amaç en yüksek verimi elde etmekse yani olabildiğince fazla mineral kazanımı isteniyorsa köpük daha sık tutulur. Ancak eğer amaç daha kaliteli ve temiz bir konsantre elde etmekse bu durumda daha derin köpük tabakaları kullanılmaktadır (Jameson, 1988). Köpük derinliğinin artırılmasının gang minerallerinin geri dönüşümünü azalttığı ve böylece metalurjik performansı iyileştirdiği belirtilmiştir. Yıkama suyu kullanılmadığında, derin köpük tabakaları aşırı drenaj nedeniyle hareketsiz hale gelebilir. Bu da köpüğün stabilitesini ve taşıma kapasitesini olumsuz etkileyebilir. Yıkama suyunun doğru uygulanması, gang minerallerinin köpükten ayrılmasını hızlandırırken, değerli minerallerin kaybını en aza indirmektedir (Melo ve diğ., 2025).

Hava hızı (Jg), jameson hücresinde hava hızı kabarcıkların yukarı yönlü yüzeysel hızını temsil eder ve genellikle santimetre/saniye (cm/s) cinsinden ifade edilir. Uygulamada Jg değerleri genellikle 0.5 ile 4 cm/s arasında değişir ve bu aralık hücrenin işletme koşullarına göre belirlenmektedir (Jameson, 2006). Jameson hücresinin boyutlandırılmasında kullanılan Jg değeri, uygulamanın gereksinimlerine ve önceki işlemlerde kalan reaktif konsantrasyonlarına bağlıdır. Düşük Jg değerleri (0.4-0.8 cm/s) temizleme uygulamalarında tercih edilir. Gang minerallerinin köpükten ayrılması için yeterli zaman tanınır. Yüksek Jg değerleri (1.0-2.0 cm/s) ise ön zenginleştirme veya temizleme devrelerinde kullanılır. Kararlı bir köpük sağlamak için daha yüksek Jg değerleri seçilir (Cowburn ve diğ., 2006). Köpürtücü konsantrasyonu, kabarcık boyutunu ve köpük stabilitesini belirleyen temel faktördür. Ancak, toplayıcı ile

köpürtücü arasındaki etkileşimler de köpük davranışını etkiler. Toplayıcı dozunun artırılmasının köpürtücü ihtiyacını azalttığı, tersine yüksek köpürtücü konsantrasyonunun ise köpük taşmasına yol açabileceği gözlemlenmiştir. Çok düşük dozlar ise köpük stabilitesini zayıflatarak verimi düşürmektedir (Farrokhpay, 2011). Parçacık boyutu da Jg'nin seçiminde önemlidir. Küçük parçacıklar (100 μm 'den küçük) kabarcık köprüleme yoluyla köpüğü stabilize eder ve düşük gaz hızlarında (Jg < 1.0 cm/s) kolayca toplanır. Daha iri parçacıklar (100 μm 'den büyük) ise kabarcıklarla temas için daha yüksek hızlar (Jg > 1.0 cm/s) gerektirmektedir (Harbort ve Schwarz, 2010).

Kabarcık boyutu, Jameson hücresinde kabarcık boyutu, flotasyon verimliliğini belirleyen kritik bir parametredir. Newcastle Üniversitesi'nde gerçekleştirilen tam ölçekli çalışmalar ve test hücreleri üzerinde yapılan ölçümler, hücrenin aritmetik ortalama kabarcık çapının yaklaşık 300-600 μm aralığında olduğunu ortaya koymuştur (Jameson, 2010). Küçük kabarcıklar, daha geniş bir yüzey alanı sağlayarak hidrofobik parçacıklarla çarpışma olasılığını artırır ve toplama etkinliğini yükseltir. Kabarcık boyutunun küçülmesinin, yüzey alanını artırarak mineral kazanımını iyileştirdiği belirtilmiştir (Yoon, 1993). Ancak, kabarcık boyutu yalnızca hava/besleme oranı ve köpürtücü konsantrasyonu ile değil, aynı zamanda sistemin hidrodinamik koşullarıyla da ilişkilidir. Yüksek hava akış hızları kabarcıkların birleşmesine yol açarak boyutlarını artırabilir. Bu da köpük stabilitesini ve seçiciliği olumsuz etkileyebilir. Jameson hücresinin tasarımı, bu tür birleşmeleri en aza indirerek tutarlı bir kabarcık boyutu dağılımı sağlamaktadır (Harbort ve Schwarz, 2010).

Hava/besleme oranı, Jameson hücreleri genellikle 0,3 ile 0,9 arasında değişen hacimsel hava/besleme oranlarıyla işletilir. Büyük ölçekli (2-3 m çapında) Jameson hücrelerinde yapılan deneyler, düşük hava/besleme oranlarında çalışmanın, belirli bir minimum seviyenin üzerinde tutulması koşuluyla, metalurjik performansı olumsuz etkilemediğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, hücrenin esnek işletim kapasitesini ve tasarımının sağladığı avantajları vurgulamaktadır (Harbort ve Schwarz, 2010).

Düşük hava/besleme oranlarında çalışmak, kabarcık boyutunun daha ince ve dağılımının daha homojen olmasını sağlayan bir dengeleyici etki yaratmaktadır. Daha küçük kabarcıklar, hidrofobik parçacıklarla çarpışma olasılığını artırarak toplama verimini destekler (Yoon, 1993). Ayrıca, bu koşullar altında köpürtücü konsantrasyonuna duyulan ihtiyaç azalır; bu da işletme maliyetlerini düşürür ve prosesin ekonomik verimliliğini artırır. Literatürde, düşük hava/besleme oranlarının köpük stabilitesini optimize ettiği ve gang minerallerinin sürüklenmesini azalttığı

belirtilir (Jameson, 2010). Düşük hava/besleme oranlarında metalurjik performansın korunması, Finch ve Dobby (1990) tarafından tanımlanan yüzeysel kabarcık yüzey hızı (S_b) kavramıyla açıklanabilir. S_b , kolon kesit alanı birimi başına arayüz alan akışını (s^{-1} cinsinden) ifade eder ve Eşitlik 2.15'te verilen denklemle hesaplanır:

$$S_b = 6 \frac{J_g}{d} \quad (2.15)$$

Burada J_g yüzeysel gaz hızını (cm/s), d ise kabarcık çapını (cm) temsil eder. Bu denklem, kabarcık boyutunun azalmasıyla J_g 'nin düşürülmesi durumunda, yüzeysel kabarcık yüzey hızının (dolayısıyla toplama kapasitesinin) sabit kalabileceğini göstermektedir (Clayton ve diğ., 1991).

Düşük hava/besleme oranlarının metalurjik performansı sürdürebilmesi, hücrenin dalan jet mekanizmasının ince kabarcıklar üretme yeteneğiyle ilişkilidir. Daha küçük kabarcıklar, yüzey alanını artırarak toplama etkinliğini korurken, düşük J_g değerleri köpük tıkanmasını (flooding) önler. Bu özellik, Jameson hücresini hem kaba flotasyon hem de temizleme uygulamalarında esnek bir seçenek haline getirir. Ayrıca, köpürtücü tüketimindeki azalma, çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir işletim sağlar (Cowburn ve diğ., 2006).

Hava tutunum oranı (Hold-Up), Jameson hücresinin düşey borusundaki boşluk oranı (gaz tutma oranı), sistemin hidrodinamik performansını anlamada kritik bir parametredir. Marchese ve diğ., (1993) ile Evans ve Atkinson (1995) tarafından yürütülen deneysel çalışmalar, bu oranın genellikle hacimsel olarak %50 ile %60 arasında değiştiğini ortaya koymuştur. Bu yüksek gaz tutunum oranı, düşey borudaki dalan jet mekanizmasının etkili hava emilimini ve kabarcık oluşumunu desteklediğini göstermektedir.

İletkenlik ölçümleri, boşluk oranını tahmin etmek için klasik potansiyel teorisine dayanır. Marchese ve diğ., (1993), çalışmalarında sıvının iletkenliği ile sıvı-gaz karışımının iletkenliği arasındaki matematiksel ilişkiyi kullanarak sıvının (k_L) ve sıvı-gaz karışımının (k_{LG}) iletkenliklerini Eşitlik 2.16'da verilen şekilde ilişkilendirmiştir:

$$\epsilon = 1 - \frac{3k_{LG}}{2k_L + k_{LG}} \quad (2.16)$$

Burada ϵ gaz tutunum oranını temsil eder. Bu yöntem, dinamik sistemlerde iletkenlik değişikliklerini hızlıca analiz etme avantajı sunar.

Hold-up, düşey borunun üst boşluğundaki basınç farklarından da hesaplanabilir. Dinamik etkiler yok sayıldığında, Eşitlik 2.17'deki basit hidrostatik basınç denklemi kullanılır:

$$P_1 - P_2 = \rho_m \times g \times h \quad (2.17)$$

Burada;

P_1 ve P_2 sırasıyla üst boşluğu ve deşarj ucundaki basınçlar, Pa (N/m²); h =yoğun köpüğün yüksekliği, m; g = yerçekimi ivmesi, m/s²; ρ_m = iki fazlı karışımın ortalama yoğunluğu, kg/m³'dir.

Gaz yoğunluğu sıvıya kıyasla ihmal edilebilir olduğunda, hold-up (ϵ) Eşitlik 2.18'deki gibi ifade edilir:

$$\epsilon = 1 - \frac{P_1 - P_2}{\rho_L \times g \times h} \quad (2.18)$$

Bu formül, statik koşullarda hold-up'ı yaklaşık olarak verir.

Yıkama suyu oranı ve bias faktör, flotasyon süreçlerinde köpük temizliğini etkin bir şekilde sağlamak için kullanılan temel bir parametredir ve yıkama suyu ekleme oranının konsantre içindeki su akış hızına oranı olarak tanımlanır. Matematiksel olarak Eşitlik 2.19'da verilen şekilde ifade edilir (Evans ve Atkinson, 1995).

$$W = \frac{Q_{ww}}{Q_{wc}} \quad (2.19)$$

Burada;

Q_{ww} , Yıkama suyu akış hızı (m³/s); Q_{wc} , Konsantredeki su akış hızı (m³/s)'dir.

Yıkama suyu oranı (W), uygulanan yıkama suyu miktarını göreceli bir şekilde ölçer ve proses koşullarının değerlendirilmesinde önemli bir gösterge olarak kullanılır. Yıkama suyunun etkisi, alternatif bir yöntemle "bias" kavramı üzerinden de tanımlanabilir.

Bias, konsantredeki suyun geri kazanılan miktarına eklenen yıkama suyunun mutlak fazla miktarıdır ve yüzeysel hız cinsinden (B_f , cm/s) Eşitlik 2.20 görüldüğü üzere ifade edilir (Evans ve Atkinson, 1995; Patwardhan ve Honaker, 2000).

$$B_f = \frac{Q_{ww} - Q_{wc}}{A_c} \quad (2.20)$$

Burada A_c kolonun kesit alanını (m²) temsil eder.

Yıkama suyu kullanılmadığında ($Q_{ww} = 0$), yıkama suyu oranı sıfır olur ve bias negatif bir değer alır ($B_f < 0$).

Bias sıfır olduğunda ($B_f = 0$), yıkama suyu oranı $W=1$ olarak hesaplanır. Pozitif bias ($B_f > 0$), yıkama suyu oranının birimden büyük olduğu durumları ifade eder, bu da köpük temizliği için ek suyun sağlandığını gösterir.

Bias, yıkama suyunun mutlak eklenen miktarını ifade etse de yıkama suyu oranı yerine kullanılmasının bazı yanıltıcı sonuçlara yol açabileceği belirtilmiştir. Jameson hücreleri gibi modern flotasyon sistemlerinde yıkama suyu oranı ve bias arasındaki ilişki, proses performansını değerlendirmede kritik bir rol oynar (Finch ve Dobby, 1990).

Taşıma kapasitesi (C_a), flotasyon hücrelerinin kesit alanı başına maksimum konsantre üretim oranını ifade eden önemli bir parametredir ve genellikle konsantredeki katıların kütleli akış hızı (g/dk) olarak hücre kesit alanı birimine (cm^2) göre tanımlanır. Bu kapasite, flotasyon prosesinin verimliliğini ve tasarımını doğrudan etkileyen çeşitli faktörlere bağlıdır. Özellikle, hava akış hızı (J_g) ve köpükteki kabarcık boyutu, taşıma kapasitesini güçlü bir şekilde etkiler. Köpük tarafından taşınabilen hidrofobik tanelerin kütlesi kabarcıkların yüzey alanı ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla, daha küçük kabarcıklar daha fazla yüzey alanı sağlayarak taşıma kapasitesini artırabilir. Bir diğer kritik faktör ise tane boyutudur. Hidrofobik taneler, gaz-sıvı arayüzüne tutunduğunda, her birim arayüz yüzeyi başına taşınan tane kütlesi, ortalama tane boyutu ile doğru orantılıdır. Daha büyük taneler, aynı yüzey alanına daha fazla kütle ekleyerek taşıma kapasitesini artırabilir, ancak aşırı büyük tanelerin tutunma verimliliği azalabilir (Kohmuench ve diğ., 2018).

Jameson flotasyon hücrelerinde taşıma kapasitesi üzerine yapılan çalışmalar, yıkama suyu oranının bu parametre üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Yıkama suyu oranı, maksimum konsantre sınıfı ve verimi optimize etmek için genellikle 1.0 veya biraz daha düşük bir değerde tutulmalıdır. Bu nedenle, taşıma kapasitesinin standart bir yıkama suyu oranı olan 1.0'da tanımlanması önerilmektedir (Atkinson ve Conway, 1993).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) Kozlu işletmesi lavvarından alınan ve 0,5-18 mm tane boyutu aralığındaki 100 kg numune laboratuvara getirilmiştir. Daha sonra laboratuvarında homojen olarak karıştırılmış ve hava almayacak şekilde depolanmıştır. Kömür numunesinden temsili olarak alınan numune ile yapılan nem, kül ve ısı değer analizleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

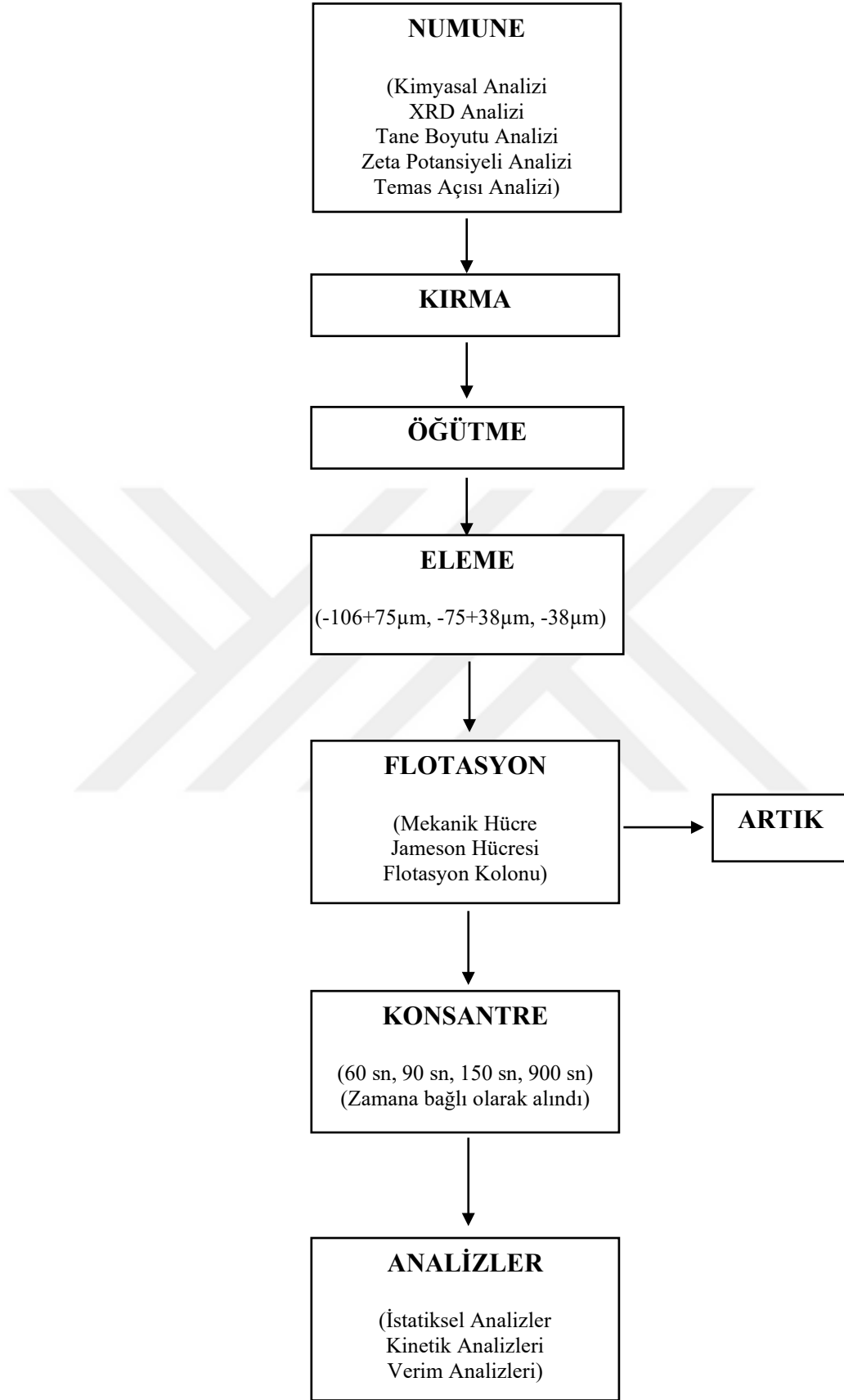
Çizelge 3.1. Konsantre kömür numunesinin analizi

Analiz	Değerler (Havada Kuru)
Nem, %	1,61
Kül, %	4,75
Isıl Değer, kcal/kg	7996,1

Köpürtücü olarak Cytec firmasının poliglikol eter ailesinin polipropilen glikol eter alt grubunda yer alan Aerofroth 65 (AF-65) tercih edilmiştir. Bu köpürtücü özellikle ince taneli kömür parçacıklarının yüzeyde stabilize edilmesini ve köpük fazına taşınmasını kolaylaştırarak flotasyon verimliliğini artırmaktadır. Tüm deneyler, flotasyon işlemi koşullarını standartlaştırmak ve deneylerin tekrarlanabilirliğini sağlamak için çeşme suyu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.2. Yöntem

Flotasyon deneysel çalışmalarında Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği Laboratuvarında bulunan flotasyon kolonu ve Jameson hücresi Konya Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Denver hücresi kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların akış şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Tez çalışmasına ait akım şeması

3.2.1. Numune hazırlama

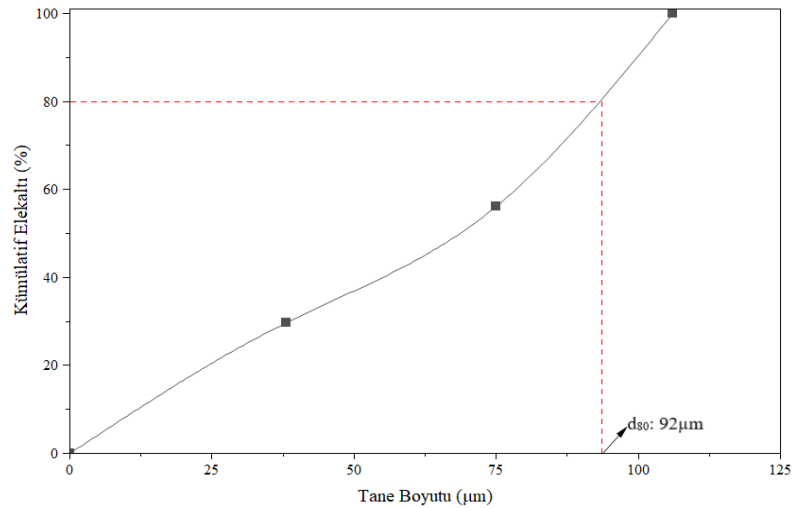
Çalışmada her üç flotasyon aletinde ince tane boyutlarında flotasyon performanslarını belirlemek için laboratuvara getirilen numune kırma işlemlerinden geçirilerek 1mm tane boyutuna indirilmiştir. Daha sonra bu numune değirmende, belirlenen koşullarda kuru olarak öğütülmüş ve 106 μm 'lik eleklerde kapalı devre halinde elenerek hepsi 106 μm 'nin altına indirilmiştir. En sonunda bu numune 75 ve 38 μm 'lik eleklerde elenerek -106+75, -75+38, -38 μm tane boyutlarında numuneler elde edilmiş ve her tane boyutu grubu flotasyon çalışmalarında kullanılmak üzere 250 gr olarak hava almayacak şekilde depolanmıştır.

3.2.2. Elek analizi

Numune -106+75, -75+38, -38 μm açıklıklı 3 elek açıklığına sahip bir dizi elek kullanılarak, kuru eleme ile üç farklı fraksiyonda sınıflandırılmıştır. Numunelerin kümülatif elek altı miktarları Çizelge 3.2'de, tane boyut dağılımı grafiği ise Şekil 3.2'de verilmiş olup tanelerin %80'inin geçtiği elek açıklığını ifade eden d_{80} değeri 92 μm olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.2. Kömür Numunesinin Elek Analizi

Tane Boyutu, μm	Miktar, %	Σ Elek Altı Miktarı, %
-106+75	43,9	100
-75+38	26,3	56,1
-38	29,8	29,8
Toplam	100	0



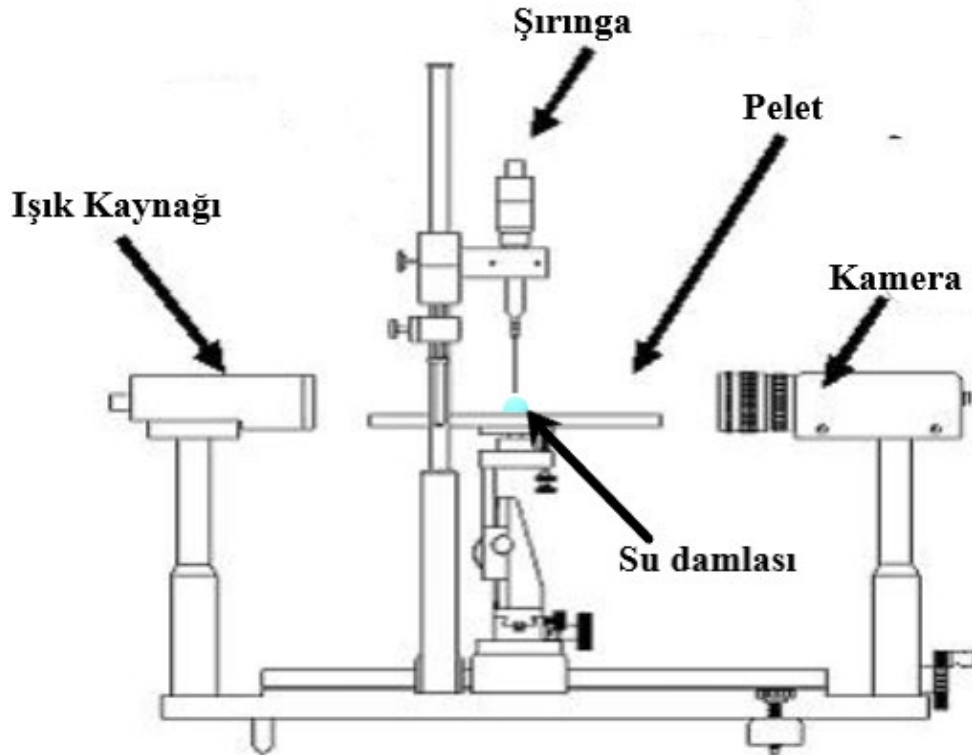
Şekil 3.2. Numuneye ait boyut dağılım grafiği

3.2.3. Kalori tayini

Kalori tayini, ASTM D 5865–13 ‘Kömür ve Kok Analiz Numunesinin Brüt ve Net Kalorifik Değeri Tayini için Standart Test Metoduna göre yapılmıştır (ASTM D 5865-13, 2015). Leco AC-350 marka kalorimetre cihazıyla, $-106+75\ \mu\text{m}$, $-75+38\ \mu\text{m}$, $-38\ \mu\text{m}$ tane boyutlarına göre kuru numuneler yüksek basınçlı saf oksijen ortamında yakılmıştır ve numunenin kalorifik değerleri sırası ile 7289,25-7652,70-7996,10 kcal/kg olarak tespit edilmiştir.

3.2.4. Temas açısı ölçümü

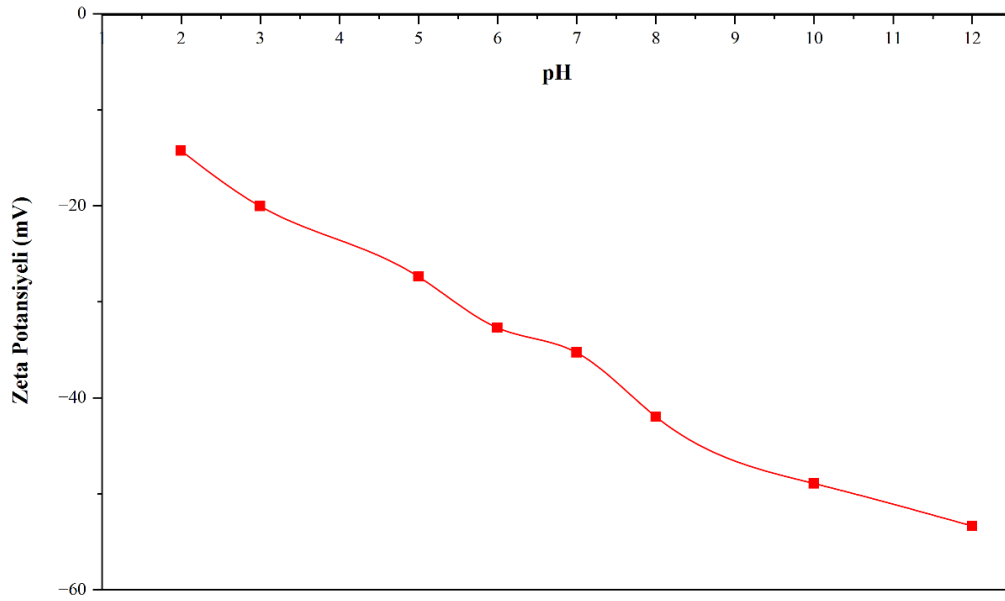
Temas açısı ölçümlerinde KSV CAM 200 model temas açısı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kömür numunesi preslenerek pelet haline getirilmiş ve elde edilen düzgün yüzey üzerine cihaza ait şırınga kullanarak damlatılan distile suyun oluşturduğu sıvı damlasının görüntü cihazın hassas kamerası ile kaydedilmiştir. 3 farklı yüzeyden 3'er adet görüntü alınmış ve bu görüntülerin ortalaması alınmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda temas açısı 109° olarak bulunmuştur. Temas açısı cihazının şematik görünümü Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Temas açısı ölçüm yöntemi şematik görünümü (Subedi ve diğ., 2008).

3.2.5. Zeta potansiyeli ölçümü

Zeta potansiyeli ölçümlerinde, Brookhaven Zeta Plus cihazı kullanılmış ve birbirinden bağımsız 5 adet ölçümün ortalaması alınmıştır. Zeta potansiyeli değerleri süspansiyonun pH'a bağlı olarak ayrı ayrı belirlenmiştir. Zeta potansiyeli değerlerinin grafiği Şekil 3.4'de verilmiştir.

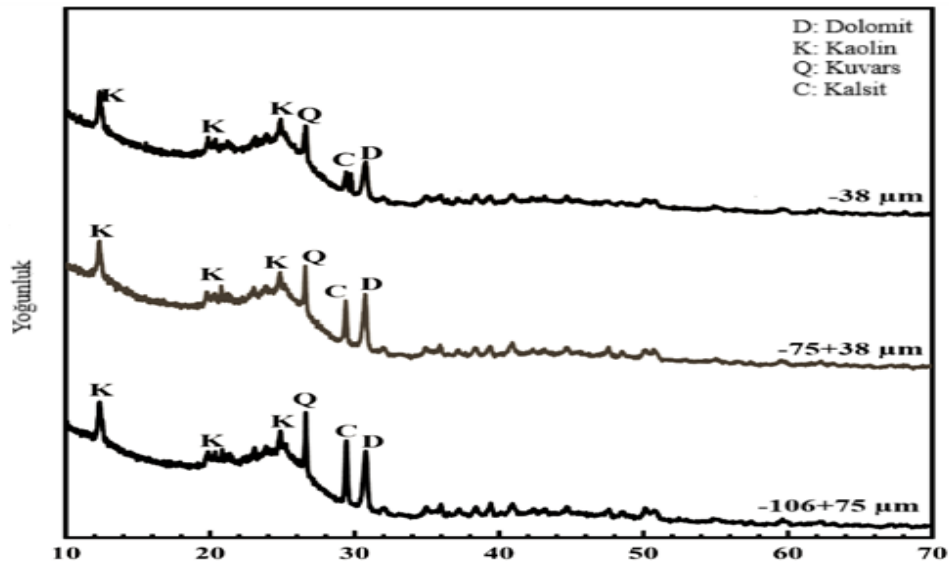


Şekil 3.4. Numunenin zeta potansiyelinin pH'a bağlı değişimi

Tüm pH değerlerinde zeta potansiyeli değerleri negatif olup alkali ortama geçildikçe bu negatiflik değeri artmaktadır. Süspansiyonun doğal pH değerinde (6.4) ölçülen zeta potansiyeli -39,05 mV'tur.

3.2.6. XRD ve XRF analizleri

XRD analiz sonuçları, aynı numunenin farklı tane boyutu fraksiyonlarında mineral dağılımının değiştiğini göstermektedir. Düşük sertliği ve yapısal özellikleri nedeniyle kaolinit, öğütme sırasında daha kolay parçalanır ve bu nedenle -38 µm fraksiyonunda yoğunlaşır. Buna karşılık, kuvars sert ve dayanıklı yapısı nedeniyle öğütmeye daha dirençlidir ve özellikle -106+75 µm aralığındaki daha iri fraksiyonlarda baskındır. Kalsit ve dolomit genellikle orta ve iri fraksiyonlarda daha belirgindir, ancak daha ince fraksiyonda daha az miktarda bulunur. Bu dağılım, öğütme davranışının minerallerin fiziksel özelliklerine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. -106+75, -75+38, -38 µm tane boyutlarından temsili olarak alınan numunenin XRD analizleri Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Taşkömürü XRD Grafiği

Numuneye ait kimyasal analizler Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü'nde yapılmış olup sonuçlar Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kömür numunesi kimyasal analiz sonuçları

Bileşik	İçerik (%)
Al ₂ O ₃	2,27
SiO ₂	4,55
Fe ₂ O ₃	1,04
CaO	0,54
MgO	0,25
Na ₂ O	0,07
K ₂ O	0,14
SO ₃	0,49

3.2.7. Flotasyon deneyleri

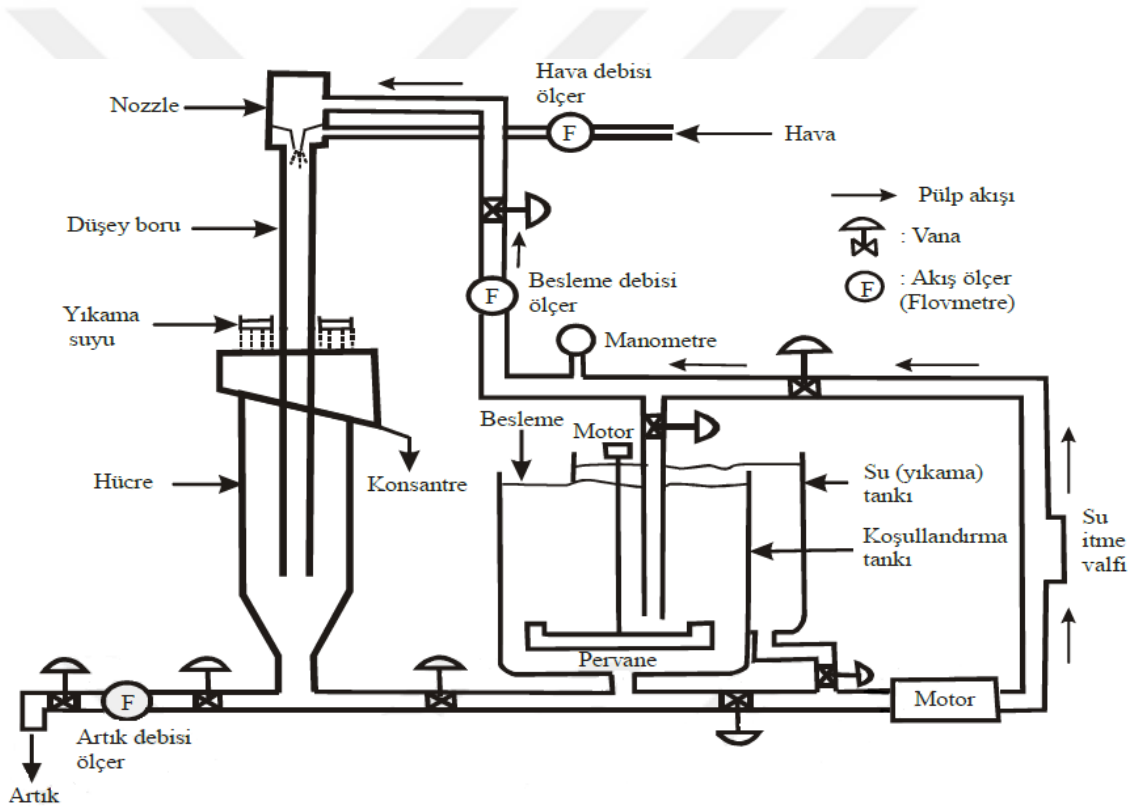
Flotasyon deneylerinde, farklı tasarım ve çalışma prensiplerine sahip üç ayrı flotasyon aleti; Kolon, Jameson ve Denver flotasyon hücresi kullanılmıştır. Flotasyon deneylerine ait parametreler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Flotasyon deneylerinde kullanılan parametreler

Bağımsız Parametreler	Değer Aralığı
Tane Boyutu, µm	-106+75, -75+38, -38
Bias Oranı, cm/s	0,3, 0,575, 0,75
Hava Hızı, cm/s	3, 3,5, 4
Köpürtücü Miktarı, ppm	5, 10, 15
Katı Oranı, %	5

3.2.7.1. Jameson flotasyonu deneyleri

Jameson hücresi deneylerinde, Prof. Dr. Graeme Jameson'ın tasarım ilkeleri temel alınarak Prof. Dr. Bahri Öteyaka tarafından geliştirilen ve pleksiglastan üretilmiş özel bir cihaz kullanılmıştır. Şeffaf pleksiglas malzeme sistemin hidrodinamik davranışını gözlemlemeyi kolaylaştırırken cihazın kompakt yapısı hızlı ve etkili bir toplama süreci sağlamıştır. Düşey boru ve ayırma tankının ölçüleriyle ince kabarcık üretimi ve köpük oluşumunu bir tasarıma sahip olan cihaz, yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sunarak deney sonuçlarının güvenilirliğini artırmıştır. Şekil 3.6'da Jameson flotasyon hücresi gösterilmiş, Çizelge 3.5'te ise deneylerde kullanılan Jameson flotasyon hücresinin ölçümleri verilmiştir.



Şekil 3.6. Jameson flotasyon hücresi deney düzeneği (Şahbaz,2005)

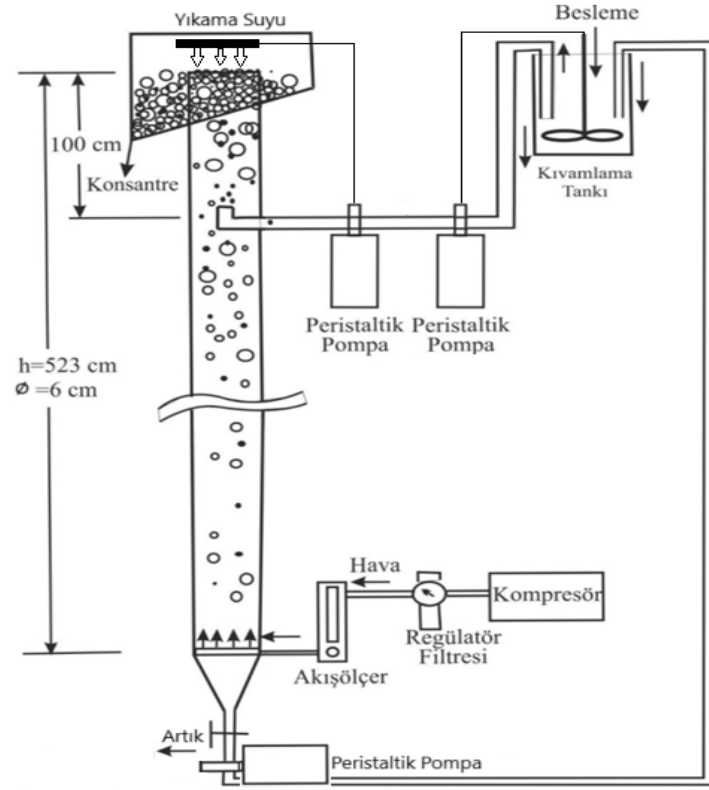
Çizelge 3.5. Jameson hücresine ait parametreler

Parametre	Değerler
Düşey boru çapı	15 cm
Düşey boru uzunluğu	180 cm
Ayırma tankı çapı	20 cm
Ayırma tankı yüksekliği	90 cm
Nozul çapı	4 mm
Düşey boru dalma derinliği	40 cm

Jameson hücresi deneylerinde öncelikle su tankına 80 litre çeşme suyu doldurulmuş ve deney tasarımında belirlenen miktarda köpürtücü eklenerek karışım hazırlanmıştır. Sistem denge durumuna ulaşana kadar köpürtücülü su ayırma hücresine beslenmiş ve aynı tanka geri döndürülerek sirkülasyon sağlanmıştır. Böylece köpük oluşumunun ve hidrodinamik koşulların stabilitesi garanti altına alınmıştır. Deneylerde, artık debisi ve yıkama suyu debisi sabit tutulurken besleme debisi kontrollü bir şekilde değiştirilerek bias oranı ve buna bağlı olarak hava hızı ayarlanmıştır. Bu yöntem farklı bias hızlarının flotasyon performansına etkisini sistematik olarak değerlendirme imkânı sunmuştur. Numune kıvamlama tankına alınarak %5 katı oranında ayarlanmış ve homojen bir pülp haline getirmek için 5 dakika boyunca 900 dev/dk hızda karıştırılmış ve bu pülp Jameson hücresinin düşey borusuna iletilmiştir. Böylece, düşey boruda dalan jet mekanizmasıyla ince kabarcıkların üretimi ve kömür parçacıklarının toplanması sağlanmıştır. Flotasyon işlemi boyunca, artık akışı kıvamlama tankına geri döndürülerek sistemin sürekliliği korunmuştur. Belirlenen zaman aralıklarında konsantre toplanmıştır. Kıvamlama tankındaki numune tamamen sisteme verildikten sonra hücre içinde kalan malzeme artık olarak ayrılmıştır. Tüm ürünler (konsantre ve artık) filtre edilip kurutulduktan sonra hassas bir şekilde tartılmıştır.

3.2.7.2. Kolon flotasyonu deneyleri

Flotasyon kolonu deneylerinde, Pierre Boutin ve Donald Wheeler tarafından geliştirilen ve 1967 yılında mineral zenginleştirme süreçlerine yeniden tanıtılan bir cihaz kullanılmıştır. Şeffaf pleksiglas malzemeden üretilen ve 523 cm yüksekliğinde ve 6 cm çapındaki kolon içindeki hidrodinamik süreçlerin gözlemlenmesini kolaylaştırırken, sparger sistemiyle üretilen ince kabarcıklar kömür parçacıklarının verimli bir şekilde toplanmasına olanak tanımaktadır. Deneylerin gerçekleştirilmiş olduğu kolon flotasyonu hücresine ait şematik gösterim Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Flotasyon kolonu deney düzeneği (Karaca, 2019)

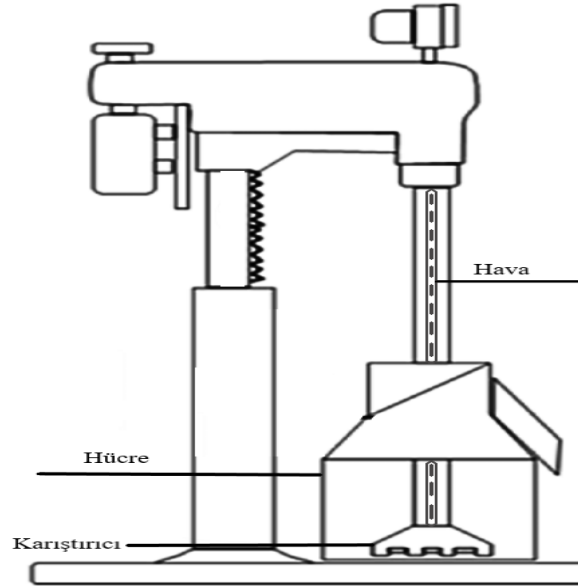
Deneylere başlamadan önce sistemin stabilitesini sağlamak amacıyla artık çıkış debisi ve yıkama suyu debisi sabit tutulmuş ve üç farklı bias hızına karşılık gelecek şekilde besleme debisi ayarlanmıştır. Bu işlem, kolonun hidrodinamik koşullarını optimize ederek tutarlı sonuçlar elde etmeyi amaçlamıştır. 20 litrelik bir kova çeşme suyuyla doldurulmuş ve uygun miktarda köpürtücü eklenerek homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Kolon bu köpürtücü ilaveli suyla doldurulduktan sonra hava hızı, belirlenen bias hızına uygun olarak ayarlanmış ve bir sparger aracılığıyla kolona enjekte edilerek ince hava kabarcıkları üretilmiştir. Sistemin dengeye ulaşması beklendikten sonra hava tutunum oranı (hold-up) hassas bir şekilde ayarlanarak flotasyon koşullarının standart hale getirilmesi sağlanmıştır. Aynı süreçte, %5 katı oranına sahip taşkömürü numunesi homojen bir pülp oluşturmak amacıyla 900 dev/dk hızda 5 dakika boyunca kıvamlanmıştır. Hazırlanan bu karışım 10 litrelik bir kovaya aktarılmış ve deney süresince çökelmeyi önlemek için düşük devirli bir karıştırıcıyla sürekli karıştırılmıştır. Numune peristaltik bir pompa aracılığıyla kolona kontrollü bir şekilde besleme kovasındaki tüm malzeme bitene kadar beslenmiştir. Flotasyon hız sabitini ve proses verimini değerlendirmek için farklı zaman aralıklarında konsantre örnekleri toplanmış ve kolonda kalan malzeme ise artık olarak ayrılmıştır. Flotasyon işlemi sona erdikten

sonra sistem içerisinde yapılan deneye ait numune artıkları kalmayacak şekilde temizlenmiş ve bir sonraki deneye gerekli hazırlıklar yapılmıştır. Bu yaklaşım deneylerin doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini güçlendirmiş, kolon flotasyonunun kömür zenginleştirme performansını ayrıntılı bir şekilde analiz etme fırsatı sunmuştur.

3.2.7.3.Mekanik flotasyon hücresi deneyleri

Denver tipi flotasyon hücresi, 1920’li yıllarda Amerika Birleşik Devletleri’nde geliştirilen mekanik flotasyon prensiplerine dayalı olarak tasarlanmıştır. Mekanik karıştırma sistemine sahip olan Denver hücresinde, pervane ve difüzör yapısı aracılığıyla hem hava hem de pülp fazı etkin bir şekilde karıştırılır. Bu karıştırma, hava kabarcıklarının süspansiyon ortamında homojen olarak dağılmasını sağlayarak, hidrofobik özellik gösteren kömür parçacıklarının hava kabarcıklarıyla temas olasılığını ve dolayısıyla yüzeye taşınma verimliliğini artırmaktadır.

Denver hücresinin sahip olduğu sağlam gövde yapısı ve dayanıklı malzeme bileşenleri, uzun süreli ve tekrarlanabilir deneylerin güvenilir bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca hücre tasarımı; pülp akışkanlığının düzenlenmesi, köpük fazının stabilitesinin korunması ve işlemsel parametrelerin kontrollü bir şekilde ayarlanabilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Deneylerde kullanılan denver flotasyon hücresi deney düzeneği Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Denver flotasyon hücresi deney düzeneği (Negeri, 2021)

Flotasyon deneylerinde kullanılan 1 litrelik denver tipi flotasyon hücresi kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda taşkömürü numunesi suya eklendikten sonra 5 dakika

boyunca karıştırma işlemi uygulanmıştır. 900 dev/dk hızda karıştırmanın ardından, köpürtücü ilave edilmiş ve 1 dakika bekleme süresinden sonra hava vanası açılarak flotasyon işlemi başlatılmıştır. Her bir deneyde Jameson ve kolon flotasyon hücrelerinde kullanılan zaman aralıklarına uygun olarak yüzen ürünler ayrı kaplarda toplanmıştır. Numuneler süzülerek kurutulup tartılmış ve hesaplamalar yapılmıştır.

3.2.7.4. Yanabilir verim hesabı

Flotasyon deneylerinden elde edilen konsantreler filtrelemeden sonra kurutularak hassas bir şekilde tartılmıştır. Her bir fraksiyonun kül analizi gerçekleştirilmiştir. Yanabilir Verimi (YKV) değerlerini hesaplamak için Eşitlik 3.1 kullanılmıştır:

$$\%YKV = \frac{K - (100 - k_{kül})}{B - (100 - b_{kül})} \times 100 \quad (3.1)$$

K: Konsantre Miktarı, g

k: Konsantre Külü (Ultra saf taşkömürü olduğu için sıfır alınmıştır.)

B: Besleme Miktarı, g

b: Besleme Külü (Ultra saf taşkömürü olduğu için sıfır alınmıştır.)

Bu formül, konsantrenin toplam beslemeye oranını yüzde olarak ifade ederek her bir deney koşulunda flotasyon verimliliğini nicel bir şekilde ortaya koymuştur.

3.2.7.4. İstatiksel yöntemler

Flotasyon gibi minerallerin zenginleştirilmesine yönelik deneysel çalışmalarda, elde edilen verilerin güvenilir bir şekilde analiz edilmesi ve süreç parametrelerinin etkilerinin ortaya konulması için istatistiksel yöntemlere sıkça başvurulmaktadır. Bu yöntemlerden biri regresyon analizidir. Özellikle doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modelleri, deneysel verilerdeki bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi sayısal olarak ifade etmede oldukça etkilidir. Bir başka önemli istatistiksel teknik ise Yanıt Yüzey Yöntemi (Response Surface Methodology - RSM)'dir. RSM, birden fazla değişkenin etkisini değerlendirirken, bu değişkenler arasındaki olası etkileşimleri de dikkate alarak optimum işlem koşullarını belirlemeyi amaçlar. RSM, deney sayısını azaltarak maliyetleri düşürürken, aynı zamanda sistemin davranışını üç boyutlu yanıt yüzey grafikleri ile görselleştirme imkânı da sunar. Deneysel planlamada genellikle Taguchi yöntemi ve Box-Behnken tasarımı gibi tasarım optimizasyon teknikleri de tercih edilmektedir. Bu yöntemler, deney sayısını minimize ederken

sistematiik ve tekrarlanabilir sonuçlara ulaşmayı sağlar. Bu yönüyle hem maliyet etkinliği sağlar hem de endüstriyel süreçlerde uygulama kolaylığı sunar. IBM SPSS 22 (Statistical Package for the Social Sciences), sosyal bilimlerde sıklıkla başvurulan, kapsamlı bir istatistiksel analiz yazılımıdır. IBM tarafından geliştirilen bu program, araştırmacıların veri girişi, düzenlemesi ve analizini sistematiik biçimde gerçekleştirmelerine olanak sağlar. SPSS, tanımlayıcı istatistiklerden (ortalama, medyan, standart sapma vb.) ileri düzey analizlere (t-testi, ANOVA, regresyon, faktör analizi vb.) kadar geniş bir yelpazede istatistiksel yöntem sunmaktadır. Kullanıcı dostu arayüzü, özellikle istatistiksel bilgi düzeyi sınırlı araştırmacılar için büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca elde edilen çıktılar, tablo ve grafiklerle görsel olarak da desteklenmektedir (Field, 2024). Bu yönüyle SPSS, sosyal bilimler başta olmak üzere sağlık, eğitim, pazarlama ve mühendislik gibi birçok alanda güvenilir veri analizi araçlarından biri olarak kabul edilmektedir. Son olarak varyans analizi (ANOVA) en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. ANOVA, birden fazla faktörün bağımlı değişken üzerindeki etkilerini hem ayrı ayrı hem de etkileşimli olarak incelemeye imkn tanıdığı için 2³ gibi tam faktöriyel deney tasarımlarında oldukça etkilidir. Bu doğrultuda, taşkömürü flotasyonunda kritik öneme sahip tane boyutu, bias hızı ve köpürtücü miktarı parametrelerinin süreç üzerindeki etkilerini ve aralarındaki etkileşimleri sistematiik olarak incelemek hedeflenmiştir. Her bir parametrenin düşük ve yüksek seviyelerinde 8'er adet, orta seviyesinde ise 4 adet deney gerçekleştirilecek şekilde bir düzenleme yapılmıştır. Böylece, Denver flotasyon hücreyi, flotasyon kolonu ve Jameson flotasyon hücreyi için her biri toplamda 12'şer adet deney tamamlanmıştır. Tam faktöriyel tasarım, tüm faktör kombinasyonlarını değerlendirerek flotasyon sürecinin dinamiklerini anlamaya yardımcı olmasının yanı sıra parametreler arasındaki karmaşık ilişkilerin istatistiksel olarak modellenmesine olanak tanır. Deneylerde kullanılan bağımsız parametreler ve deney tasarımı sırasıyla izelge 3.6 ve izelge 3.7' de verilmiştir.

Çizelge 3.6. Deneylerde kullanılan bağımsız parametreler ve değerleri

Parametre	Birimi	Düşük (-)	Orta (0)	Yüksek (+)
Tane Boyutu	μm	-38	-75+38	-106+75
Bias Hızı	cm/s	0,3	0,575	0,75
Hava Hızı (Denver)	cm/s	3,5	3,75	4
Köpürtücü Miktarı	ppm	5	10	15

Çizelge 3.7. 2^3 tam faktöriyel deney tasarımı

Parametre	Parametre- X_1	Parametre- X_2	Parametre- X_3
1	-38	0,3	5
2	-38	0,3	15
3	-106+75	0,3	5
4	-106+75	0,3	15
5	-38	0,75	50
6	-38	0,75	15
7	-106+75	0,75	5
8	-106+75	0,75	15
9	-75+38	0,525	10
10	-75+38	0,525	10
11	-75+38	0,525	10
12	-75+38	0,525	10

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Malzemenin Karakterizasyonu

Numunenin mineralojik analizlerine göre -106+75 μm fraksiyonunda kuvars, -75+38 μm fraksiyonunda kalsit ve dolomit, -38 μm fraksiyonunda ise kaolin mineralinin baskın olduğu belirlenmiştir. -106+75, -75+38, -38 μm tane boyut fraksiyonlardaki kalorifik değerleri ise sırası ile 7289,25; 7652,70 ve 7996,10 kcal/kg olarak tespit edilmiştir. Numunedeki tanelerin %80'i 92 μm 'den daha küçüktür. Numunenin doğal pH değerinde (6.4) zeta potansiyeli değeri -39,05 mV olarak bulunmuştur. Yapılan ölçümler sonucunda temas açısı 109° olarak ölçülmüştür.

4.2. Flotasyon Analizleri

4.2.1. Jameson flotasyon hücresi analizleri

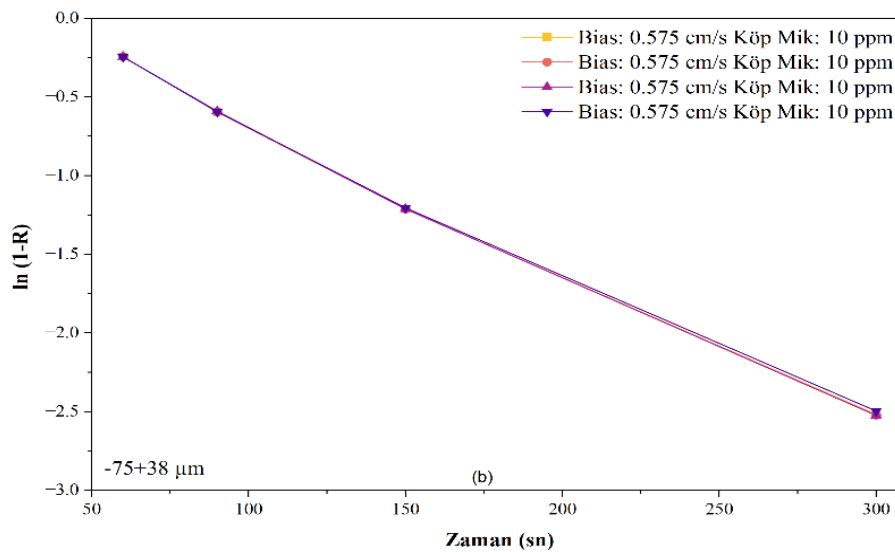
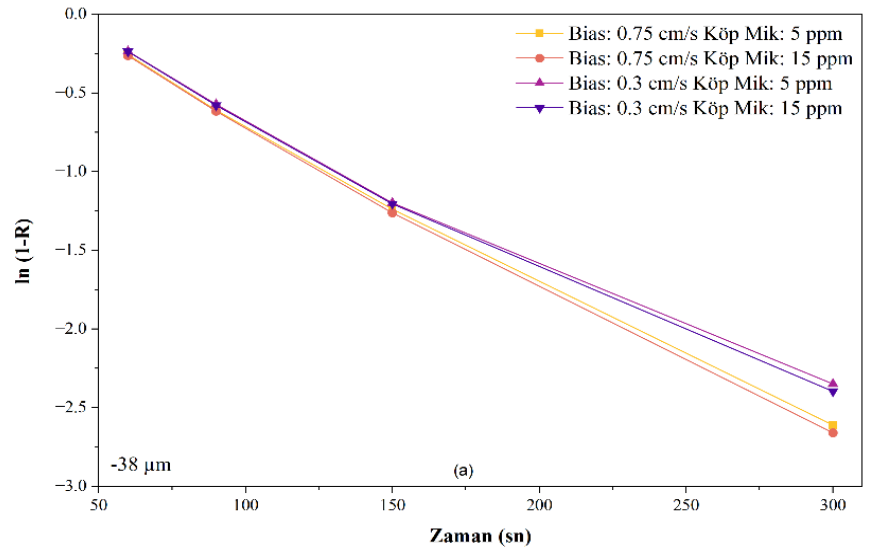
Çizelge 4.1.'de Jameson flotasyon hücresinde yapılan deneylerden elde edilen flotasyon hız sabiti (k), R^2 ve yanabilir kısım verimi (YKV) değerleri sunulmuştur.

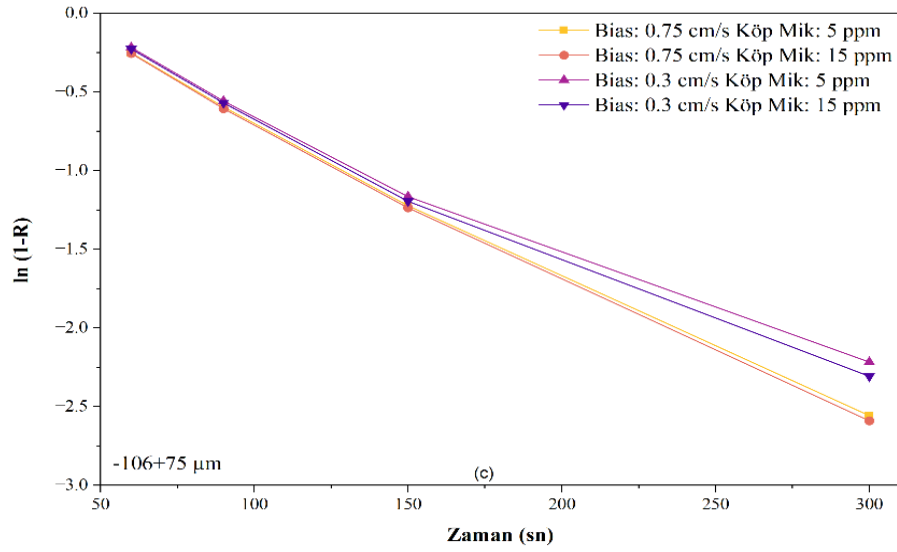
Çizelge 4.1. Jameson flotasyon hücresinden elde edilen kinetik deneylere ait flotasyon hız sabiti, R^2 ve YKV değerleri

Tane Boyutu (μm)	Köpürtücü Miktarı (ppm)	Bias Hızı (cm/s)	Flotasyon Hız Sabit (k)(dk ⁻¹)	R^2	YKV (%)
38	5	0,75	0,0097	0,9979	92,65
38	15	0,75	0,0099	0,9980	93,00
106	5	0,75	0,0095	0,9976	92,24
106	15	0,75	0,0096	0,9976	92,49
75	10	0,525	0,0094	0,9972	91,98
75	10	0,525	0,0093	0,9969	91,96
75	10	0,525	0,0094	0,9970	91,97
75	10	0,525	0,0094	0,9970	91,96
38	5	0,3	0,0087	0,9926	90,45
38	15	0,3	0,0089	0,9939	90,89
106	5	0,3	0,0082	0,9889	89,10
106	15	0,3	0,0085	0,9908	90,04

Elde edilen bulgulara göre R^2 değerleri 0,9926 ile 0,9889 arasında değişim göstermiştir. Bu durum deneysel veriler ile modelin uyumlu olduğunu ve flotasyon hız sabiti (k) hesaplamalarının istatistiksel açıdan güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca YKV değerlerinin %90'ın üzerinde seyretmesi, kömür kazanım veriminin yüksek düzeyde olduğunu işaret etmektedir. Çizelge 4.1'den en yüksek k ($0,0099 \text{ dk}^{-1}$) ve YKV değerinin (%93) $38 \mu\text{m}$ tane boyutunda 15 ppm köprücü miktarında ve 0,75 bias hızında elde edildiği görülmektedir.

-106+75, -75+38, -38 μm tane boyutlarında $\ln(1-R)$ değerlerine karşılık (t) grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.1'de bu boyutlarında yapılan flotasyonun birinci dereceden kinetik analizleri verilmiştir.





Şekil 4.1. Farklı tane boyutlarında Jameson flotasyon hücresinde elde edilen birinci dereceden kinetik analizleri

Elde edilen grafiklerde bias değerinin ve köpürtücü miktarının artışıyla birlikte grafiklerdeki eğim değerlerinde belirgin artış gözlenmiştir. Karaca ve diğ., (2022) çalışmalarında tane boyutunun flotasyon kinetiği üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir. Benzer şekilde, Zhang (2016) tarafından yapılan kapsamlı incelemede ise köpürtücü miktarı ve bias oranının flotasyon performansını etkilediği vurgulanmıştır. Bias değeri ve köpürtücü miktarının artışıyla gözlenen eğim değişikliklerinin flotasyon kinetiği üzerindeki kritik etkisi olan flotasyonun hızını doğrudan ve güçlü biçimde belirlemektedir.

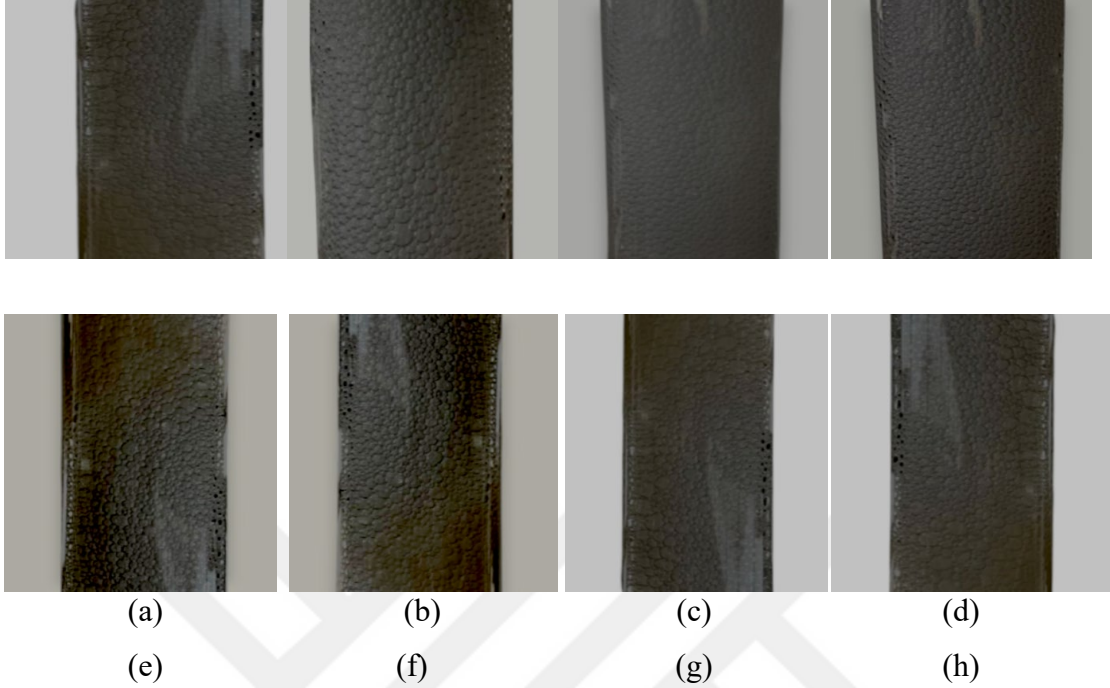
Jameson flotasyon hücresine ait kabarcık boyutu ölçümü

Köpük stabilitesinin flotasyon performansı üzerindeki belirli etkisini ortaya çıkarabilmek için Jameson flotasyon hücresine ait düşey boruda oluşturulan köpüklerin görüntüleri alınmış ve boyutları ölçülerek analiz edilmiştir. Köpük haznesinin altındaki düşey borunun 6 cm'lik kısmı üç eşit parçaya bölünerek ortadaki 2 cm'lik kısımdan alınan görüntüler Şekil 4.2'de verilmiştir. Burada;

- 38 μm tane boyutu, 3,5 cm/s hava hızı, 5 ppm köpürtücü miktarı
- 38 μm tane boyutu, 3,5 cm/s hava hızı, 15 ppm köpürtücü miktarı
- 106 μm tane boyutu, 3,5 cm/s hava hızı, 5 ppm köpürtücü miktarı
- 106 μm tane boyutu, 3,5 cm/s hava hızı, 15 ppm köpürtücü miktarı
- 38 μm tane boyutu, 4 cm/s hava hızı, 5 ppm köpürtücü miktarı
- 38 μm tane boyutu, 4 cm/s hava hızı, 15 ppm köpürtücü miktarı

g) 106 μm tane boyutu, 4 cm/s hava hızı, 5 ppm köpürtücü miktarı

h) 106 μm tane boyutu, 4 cm/s hava hızı, 15 ppm köpürtücü miktarı



Şekil 4.2. Jameson flotasyon hücresinde oluşturulan kabarcıklar

Kabarcık çaplarına ilişkin yapılan değerlendirmelerde görünür kabarcık boyutlarının yaklaşık 1 mm ile 2 mm aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Düşük tane boyutu ($-38 \mu\text{m}$) yüksek hava hızı (4 cm/s) ve yüksek köpürtücü miktarında (15 ppm) kabarcık çapları ortalama 0,75 mm iken yüksek tane boyutu ($-106+75 \mu\text{m}$) düşük hava hızı (3,5cm/s) ve düşük köpürtücü miktarında (5 ppm) kabarcık çapları ortalama 0,25 mm olarak tespit edilmiştir.

Köpürtücü miktarının artması ile daha büyük boyutta hava kabarcıkları elde edilmiştir. Benzer şekilde hava hızının artması ile artan bias hızı kabarcık sayısını ve boyutunu büyötmektedir. Yüksek hava akış hızının kabarcık oluşum hızını artırarak kabarcıkların birleşme olasılığını yükselttiği ve bunun sonucunda ortalama kabarcık boyutlarının büyüdüğü belirtilmiştir (Moolman ve diğ.,1995; Bournival ve diğ., 2017).

Ancak köpürtücü miktarının 5 ppm'den 15 ppm'e çıkarıldığı zaman köpüklerin büyümesiyle birlikte yapısının incelendiği gözlemlenmiştir. Köpürtücü miktarının 3 katına çıkarıldığı durumda belirgin olumlu etki gözlemlenmemiştir. Bu durumda kritik koalesans konsantrasyonunun (CCC) değerinin 15 ppm civarında olduğu düşünülebilir. Kim ve Park, (2024) çalışmalarında köpürtücü miktarının kritik koalesans

konsantrasyonunun (CCC) üzerine çıkması durumunda köpük stabilitesinin azalması ve kabarcıkların birleşerek daha büyük yapılar oluşturduğunu bildirmişlerdir. İncelmiş bu köpük yapısı 106 μm 'lik en büyük tane boyutunda daha çabuk patlamıştır ve dolayısıyla verimde de düşüş gözlenmiştir. Özellikle 106 μm tane boyutunda, biasın 0,3 cm/sn köpürtücü miktarının 5 ppm olduğu deneylerde en düşük verim (%89,10) değeri elde edilmiştir.

4.2.2. Flotasyon kolonu analizleri

Çizelge 4.2.'de flotasyon kolonunda yapılan deneylerden elde edilen flotasyon hız sabiti (k), R^2 ve yanabilir kısım verimi (YKV) değerleri sunulmuştur.

Elde edilen bulgulara göre R^2 değerleri 0,9676 ile 0,9857 arasında değişim göstermiştir. Bu durum, deneysel veriler ile model arasındaki uyumun ve flotasyon hız sabiti (k) hesaplamalarının istatistiksel açıdan güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, YKV değerlerinin %80'in üzerinde seyretmesi, kömür kazanım veriminin yüksek düzeyde olduğunu işaret etmektedir. Bias hızının 0,75 cm/s olarak seçildiği koşullarda ise hem flotasyon hız sabiti (k) hem de R^2 ve YKV açısından en yüksek performans değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Flotasyon kolonundan elde edilen kinetik deneylere ait flotasyon hız sabiti, R^2 ve YKV değerleri

Tane Boyutu (μm)	Köpürtücü Miktarı (ppm)	Bias Hızı (cm/s)	Flotasyon Hız Sabit (k)(dk ⁻¹)	R^2	YKV (%)
38	5	0,75	0,0074	0,9831	86,42
38	15	0,75	0,0077	0,9857	87,29
106	5	0,75	0,0064	0,9676	82,30
106	15	0,75	0,0066	0,9773	83,35
75	10	0,525	0,0069	0,9781	84,82
75	10	0,525	0,0069	0,9756	84,80
75	10	0,525	0,0070	0,9778	85,10
75	10	0,525	0,0071	0,9782	85,50
38	5	0,3	0,0073	0,9745	86,13
38	15	0,3	0,0074	0,9773	86,78
106	5	0,3	0,0060	0,9754	80,67

106

15

0,3

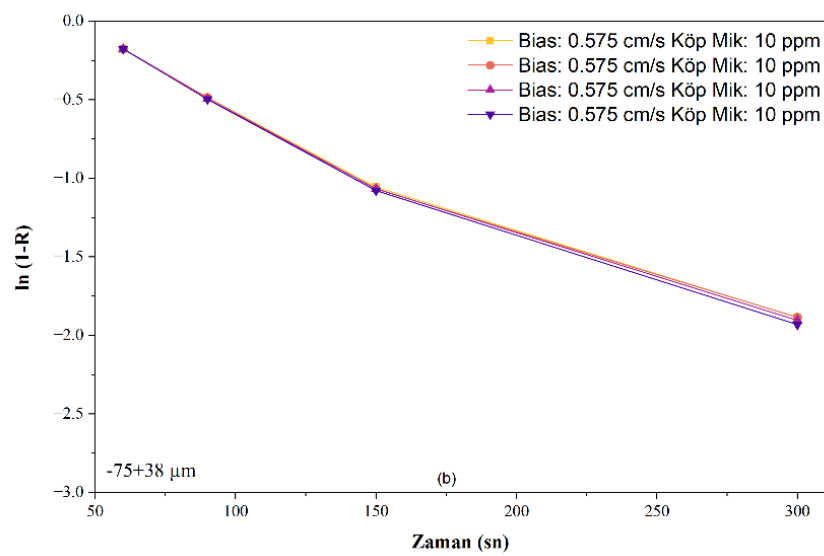
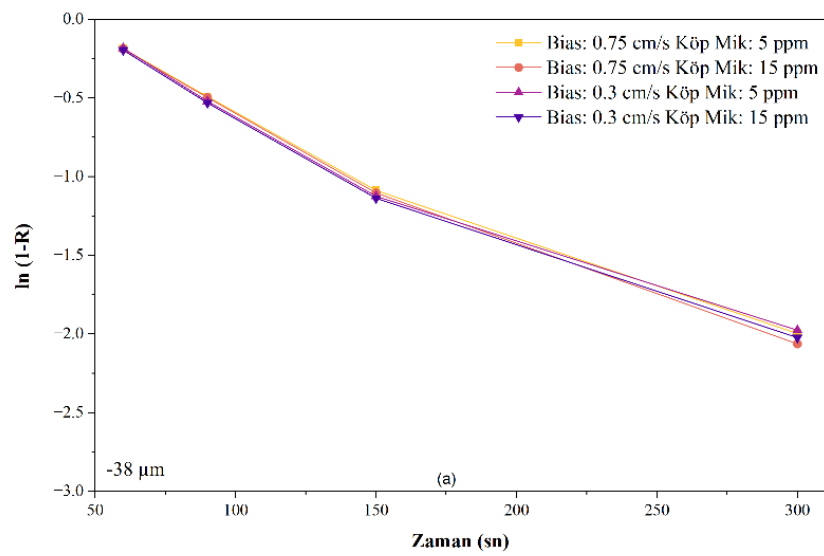
0,0063

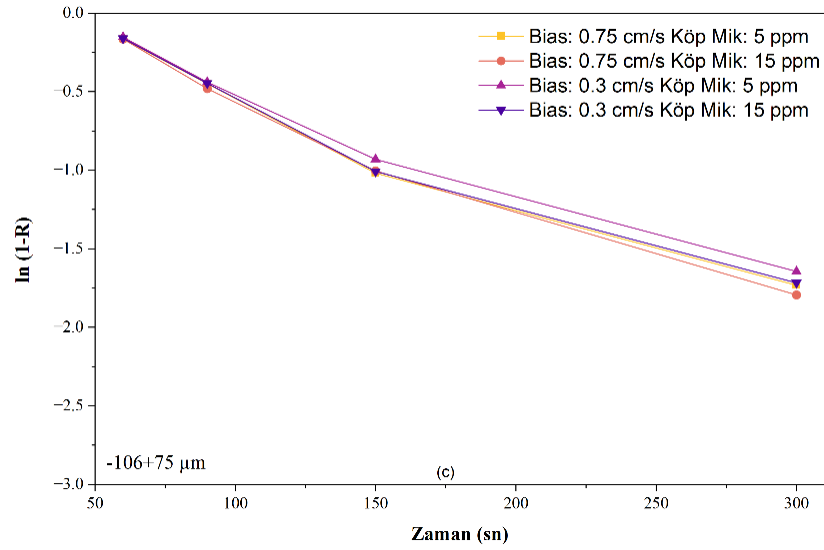
0,9679

82,02

Çizelge 4.2'den en yüksek k ($0,0077 \text{ dk}^{-1}$) ve YKV değerinin (%87.29) $38 \mu\text{m}$ tane boyutunda 15 ppm köprücü miktarında ve 0,75 bias hızında elde edildiği görülmektedir.

-38, -75+38, -106+75 μm tane boyutlarında $\ln(1-R)$ değerlerine karşılık (t) grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.3'de bu boyutlarında yapılan flotasyonun birinci dereceden kinetik analizleri verilmiştir.



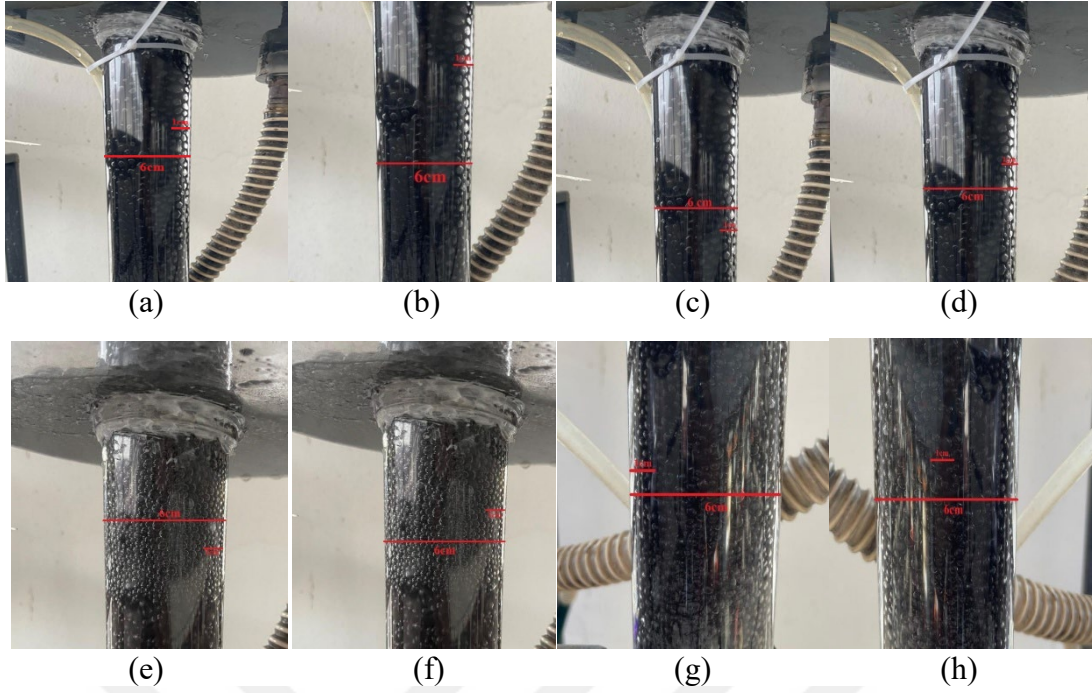


Şekil 4.3. Farklı tane boyutlarında flotasyon kolonundan elde edilen birinci dereceden kinetik analizleri

Elde edilen grafiklerde bias değerinin ve köpürtücü miktarının artışıyla birlikte grafiklerdeki eğim değerlerinde belirgin değişiklikler gözlenmiştir. Grafik analizleri sonucunda bias değerindeki ve köpürtücü miktarındaki artışların flotasyon kinetiği üzerindeki etkileri açıkça görülmektedir. Murhula ve diğ., (2022) yaptıkları çalışmada tane boyutunun flotasyon kinetiği üzerinde önemli bir etken olduğunu vurgulamışlardır. Flotasyon kolonuna ait kabarcık boyutu ölçümü

Köpük stabilitesinin flotasyon performansı üzerindeki belirli etkisini ortaya çıkarabilmek için flotasyon kolonuna ait düşey boruda oluşturulan köpüklerin görüntüleri alınmış ve boyutları ölçülerek analiz edilmiştir. Elde edilen fotoğraflar Şekil 4.4’de verilmiştir. Burada;

- 38 μm tane boyutu, 3,5cm/s hava hızı, 5 ppm köpürtücü miktarı
- 38 μm tane boyutu, 3,5cm/s hava hızı, 15 ppm köpürtücü miktarı
- 38 μm tane boyutu, 4 cm/s hava hızı, 5 ppm köpürtücü miktarı
- 38 μm tane boyutu, 4 cm/s hava hızı, 15 ppm köpürtücü miktarı
- 106 μm tane boyutu, 3,5cm/s hava hızı, 5 ppm köpürtücü miktarı
- 106 μm tane boyutu, 3,5cm/s hava hızı, 15 ppm köpürtücü miktarı
- 106 μm tane boyutu, 4 cm/s hava hızı, 5 ppm köpürtücü miktarı
- 106 μm tane boyutu, 4 cm/s hava hızı, 15 ppm köpürtücü miktarı



Şekil 4.4. Flotasyon kolonunda oluşturulan kabarcıklar

Şekil 4.4’de verilen resimler, köpük haznesinin altındaki düşey borunun 15 cm’lik kısmı üç eşit parçaya bölünerek ortadaki 5 cm’lik kısımdan alınan görüntülerdir. Burada; Kabarcık çaplarına ilişkin yapılan değerlendirmelerde, görünür kabarcık boyutlarının yaklaşık 1 mm ile 3 mm aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Düşük tane boyutu ($-38 \mu\text{m}$) yüksek hava hızı (4 cm/s) ve yüksek köpürtücü miktarında (15 ppm) kabarcık çapları ortalama 1,75 mm iken yüksek tane boyutu ($-106+75 \mu\text{m}$) düşük hava hızı (3,5cm/s) ve düşük köpürtücü miktarında (5 ppm) kabarcık çapları ortalama 1,25 mm olarak tespit edilmiştir. Özellikle hava hızı ve köpürtücü miktarındaki artış köpük yapısını doğrudan etkileyerek kabarcık boyutlarının büyümesine neden olmaktadır. Yüksek hava akış hızının kabarcık oluşum hızını artırdığı ve bunun kabarcıklar arasındaki çarpışma ile birleşme (koalesans) olasılığını yükselttiği gözlemlenmiştir. Kabarcıkların birleşmesi, sistemde daha büyük ortalama kabarcık boyutlarının oluşmasına yol açmaktadır (Clift ve diğ., 1978).

4.2.3. Denver flotasyon hücresi analizleri

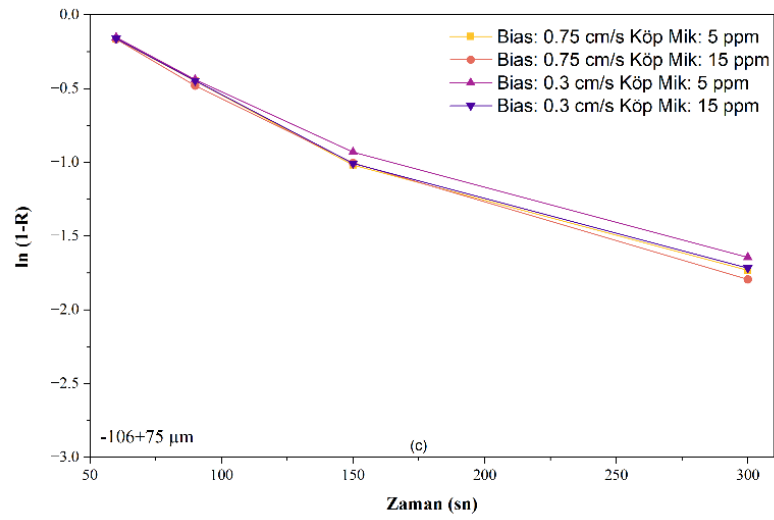
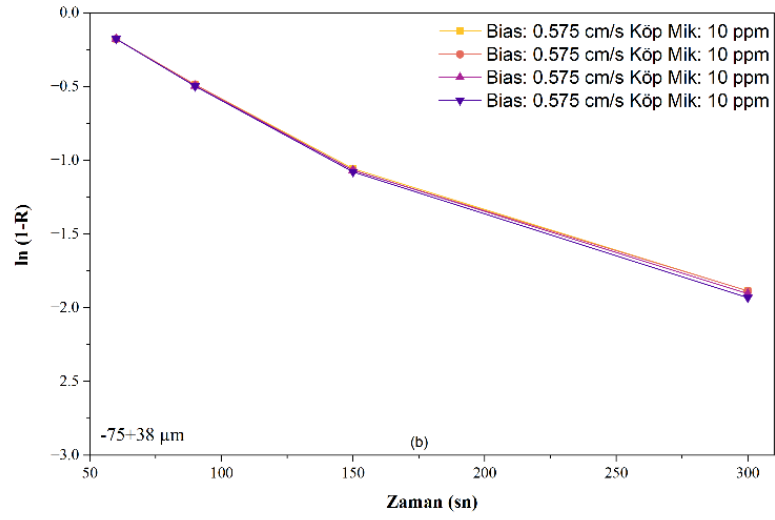
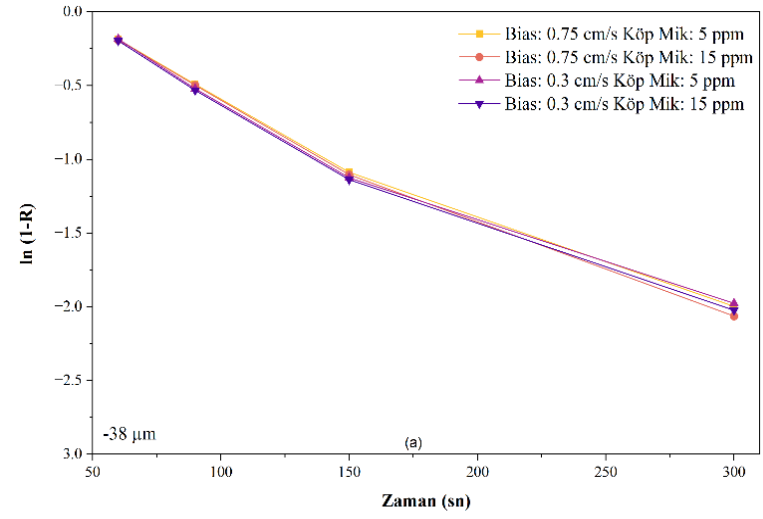
Çizelge 4.3.’de, Denver flotasyon hücresinde yapılan deneylerden elde edilen flotasyon hız sabiti (k), R^2 ve Yanabilir kısım verimi (YKV) değerleri sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Denver flotasyon hücrelerinden elde edilen kinetik deneylere ait flotasyon hız sabiti, R^2 ve YKV değerleri

Tane Boyutu (μm)	Köpürtücü Miktarı (ppm)	Hava Hızı (cm/s)	Flotasyon Hız Sabit (k)(dk-1)	R^2	YKV (%)
106	5	3.5	0,0065	0,9840	82,92
106	5	4	0,0068	0,9841	84,24
106	15	4	0,0070	0,9843	84,90
106	15	3.5	0,0069	0,9841	84,54
38	5	3.5	0,0076	0,9832	86,96
38	5	4	0,0078	0,9843	87,54
38	15	4	0,0085	0,9894	89,84
38	15	3.5	0,0082	0,9870	88,92
75	10	3,75	0,0075	0,9804	87,08
75	10	3,75	0,0074	0,9785	87,02
75	10	3,75	0,0073	0,9782	86,50
75	10	3,75	0,0074	0,9788	87,00

Araştırma sonuçları model ile deneysel veriler arasında uyum olduğunu göstermektedir. R^2 değerleri 0,9782 ile 0,9894 arasında değişmiş ve bu durum flotasyon hız sabiti (k) hesaplamalarının güvenilirliğini ortaya koymuştur. Ayrıca YKV değerinin %82'nin üzerinde değerler elde edilmesi yüksek verimlilikle çalıştığını göstermektedir. Özellikle hava hızının 4 cm/s olarak seçildiği koşullarda hem flotasyon hız sabiti hem de R^2 ve YKV değerlerinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

-38, -75+38, -106+75 μm tane boyutlarında $\ln(1-R)$ değerlerine karşılık (t) grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.5'te bu boyutlarında yapılan flotasyonun birinci dereceden kinetik analizleri verilmiştir.



Şekil 4.5. Farklı tane boyutlarında denver flotasyon h ccresinden elde edilen birinci dereceden kinetik analizleri

Elde edilen grafiklerde. bias değeri ve köpürtücü miktarındaki artışa paralel olarak eğim değerlerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Ostadrahimi ve diğ., (2021), köpürtücü miktarının köpük stabilitesini artırdığını ve hava hızı artışının kabarcık birleşme dinamiklerini etkileyerek flotasyon kinetiğini değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle grafik analizleri, hava hızı ve köpürtücü dozajındaki yükselişlerin flotasyon kinetiği üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır.

4.3. İstatiksel Analizler

4.3.1. Flotasyon hız sabiti analizleri

Regresyon denklemi. flotasyon hız sabiti (k) üzerindeki tane boyutu (X_1), bias (X_2) ve köpürtücü miktarı (X_3) gibi bağımsız değişkenlerin etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

4.3.1.1. Jameson flotasyon hücresi flotasyon hız sabiti analizleri

Jameson flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle SPSS’de oluşturulan istatistiksel modelin ANOVA (Varyans Analizi) sonuçları Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Jameson flotasyon deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (SPSS)

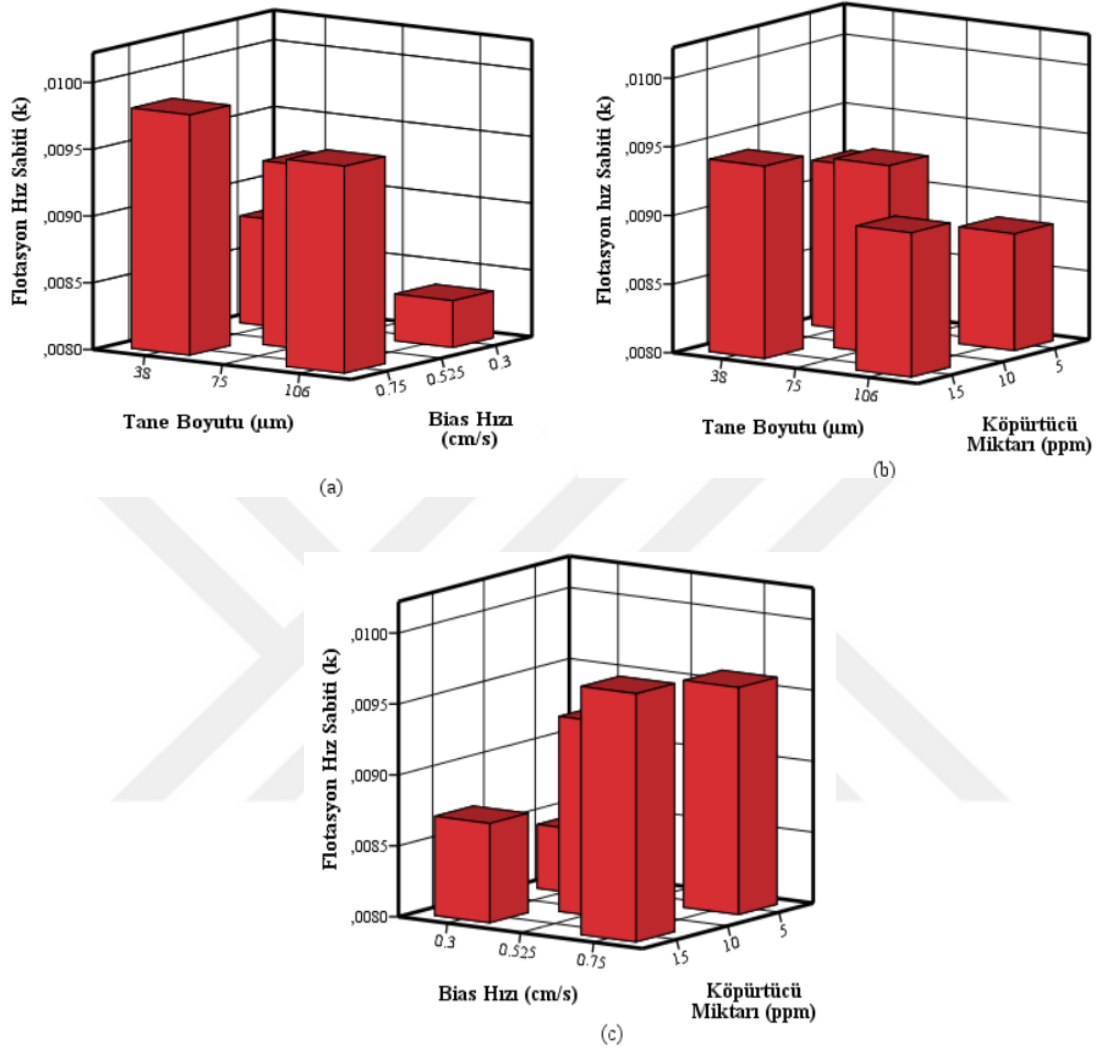
Faktör	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F	p
Model	$2,942 \cdot 10^{-6}$	8	$3,677 \cdot 10^{-7}$	147.083	0,001
X_1 -Tane Boyutu	$2,450 \cdot 10^{-7}$	1	$2,450 \cdot 10^{-7}$	98.000	0,002
X_2 -Bias Hızı	$2,420 \cdot 10^{-6}$	1	$2,420 \cdot 10^{-6}$	968.000	0,000
X_3 -Köpürtücü Miktarı	$8,000 \cdot 10^{-8}$	1	$8,000 \cdot 10^{-8}$	32.000	0,011
$X_1 \cdot X_3$	0,000	1	0,000	0.000	1,000
$X_1 \cdot X_2$	$2,000 \cdot 10^{-8}$	1	$2,000 \cdot 10^{-8}$	8.000	0,066
$X_2 \cdot X_3$	$5,000 \cdot 10^{-9}$	1	$5,000 \cdot 10^{-9}$	2.000	0,252
$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$	$5,000 \cdot 10^{-9}$	1	$5,000 \cdot 10^{-9}$	2.000	0,252
Hata	$7,500 \cdot 10^{-9}$	3	$2,500 \cdot 10^{-9}$		
Toplam	$2,949 \cdot 10^{-6}$	11			

$$R^2 = 0,9970$$

$$\text{Adj. } R^2 = 0,9910$$

ANOVA sonuçları. modelin toplam varyansın %99,7’sini açıkladığını ($R^2 = 0,9970$) ve düzeltilmiş R^2 değerinin 0,9910 olduğunu göstermektedir. Bağımsız değişkenler arasında tane boyutu (X_1), bias hızı (X_2) ve köpürtücü miktarının (X_3) model üzerindeki etkileri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$).

Gerçekleştirilen çalışmalar tane boyutu, bias hızı ve köpürtücü miktarının oluşturduğu etkileşimlerin flotasyon hız sabiti (k) üzerinde meydana getirdiği etkileri Şekil 4.6’da detaylı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 4.6. Jameson flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon hız sabitine etkisi (SPSS)

Tane boyutu-bias hızı etkileşiminde; en yüksek k değeri 38 μm tane boyutu ve 0,75 cm/s bias hızı kombinasyonunda yaklaşık olarak 0,0098 olarak bulunurken en düşük k değeri ise 106 μm tane boyutunda ve 0,3 cm/s bias hızında 0,0083 seviyelerine gerilemektedir.

Tane boyutu-köpürtücü miktarı etkileşiminde; en yüksek k değeri 38 μm tane boyutu için 15 ppm köpürtücü miktarında elde edilmiş olup yaklaşık 0,0094’tür. En düşük k değeri ise 106 μm tane boyutu ve 5 ppm köpürtücü miktarında ise yaklaşık 0,0089 olarak bulunmuştur.

Köpürtücü miktarı-bias hızı etkileşiminde; en yüksek k değeri 0,75 bias hızı ve 15 ppm köpürtücü miktarı kombinasyonunda yaklaşık olarak 0,0098 iken en düşük k değeri ise 0,3 bias hızı ve 5 ppm köpürtücü miktarı kombinasyonunda yaklaşık olarak 0,0086'dır.

Tane boyutunun artması flotasyon veriminde belirgin bir düşüşe yol açarken, bias hızının artırılması bu düşüşü kısmen telafi edebilecek pozitif bir etki sağlamaktadır. Benzer şekilde tane boyutunun büyümesi flotasyon verimini olumsuz etkilerken köpürtücü miktarındaki artış yalnızca belirli bir seviyeye kadar olumlu katkı sunmakta, bu seviyenin aşılmasının ardından ise verimde azalma meydana gelmektedir. Bu bulgular, ince tanelerle çalışmanın ve optimum köpürtücü miktarının belirlenmesinin flotasyon performansının maksimize edilmesi açısından kritik önem taşıdığını göstermektedir. Ayrıca, bias hızındaki artış flotasyon hız sabitini yükseltirken köpürtücü miktarının artırılmasının bu parametre üzerinde yalnızca sınırlı bir etkisinin bulunduğu ortaya konmaktadır.

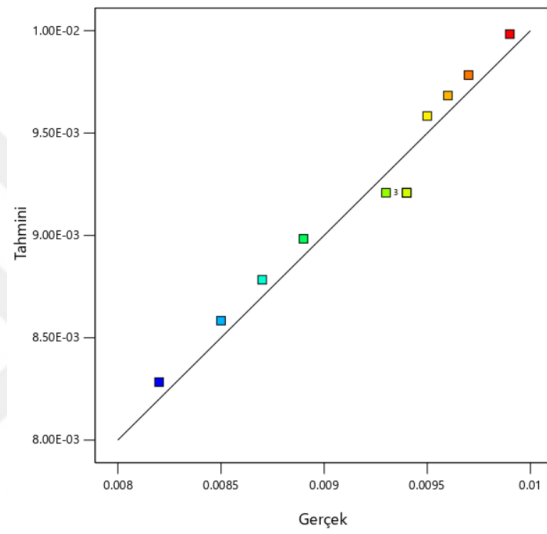
Jameson flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle Design Expert-13'de oluşturulan istatistiksel modelin ANOVA sonuçları Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Jameson flotasyon deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (DE-13)

Faktör	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F	p	
Model	2,775*10 ⁻⁶	6	4,609*10 ⁻⁷	9,100	0,0249	significant
X ₁ -Tane Boyutu	2,450*10 ⁻⁷	1	2,403*10 ⁻⁷	5,630	0,0766	
X ₂ -Bias Hızı	2,420*10 ⁻⁶	1	2,420*10 ⁻⁶	5055,580	0,0017	
X ₃ -Köpürtücü Miktarı	8,000*10 ⁻⁸	1	8,000*10 ⁻⁸	1,840	0,2467	
X ₁ *X ₂	2,000*10 ⁻⁸	1	2,000*10 ⁻⁸	4,459	0,5351	
X ₁ *X ₃	0,0000	1	0,0000	0,000	1,0000	
X ₂ *X ₃	5,000*10 ⁻⁹	1	5,000*10 ⁻⁹	1,115	0,7518	
X ₁ *X ₂ *X ₃	5,000*10 ⁻⁹	1	5,000*10 ⁻⁹	1,115	0,7518	
Hata	1,742*10 ⁻⁷	4	4,354*10 ⁻⁸			
Toplam	2,7949*10 ⁻⁶	11				
R²	: 0,9409					
Adj. R²	: 0,8376					

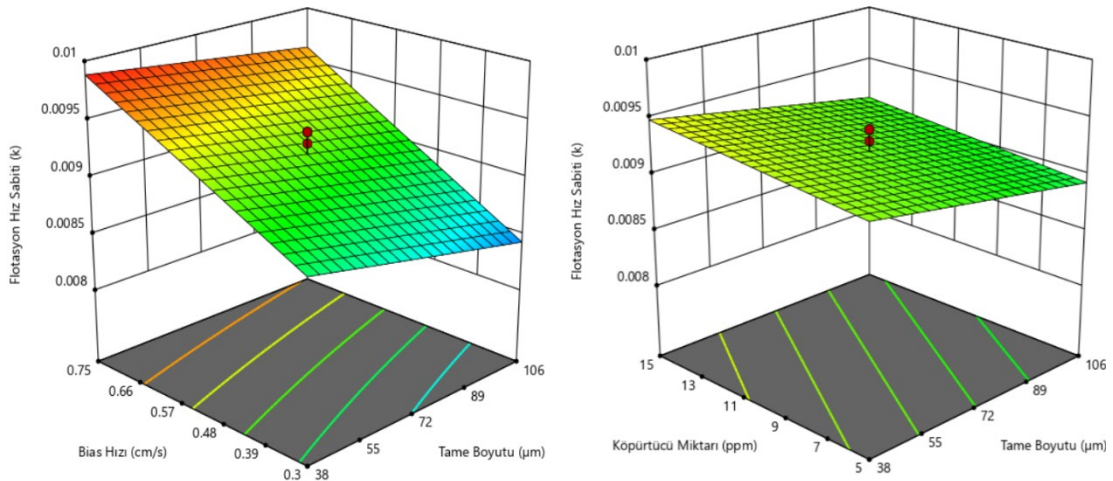
ANOVA sonuçları, modelin toplam varyansın % 94,09'unu açıkladığını ($R^2=0,9409$) göstermektedir. Ana parametreler arasında bias hızının (X_2) model üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuş ($p=0,0017$), tane boyutunun (X_1) etkisi ise anlamlılık sınırının üzerinde olduğu görülmüştür ($p=0,0766$), köpürtücü miktarının (X_3) model üzerindeki etkisi ise anlamlı bulunmamıştır ($p=0,2467$).

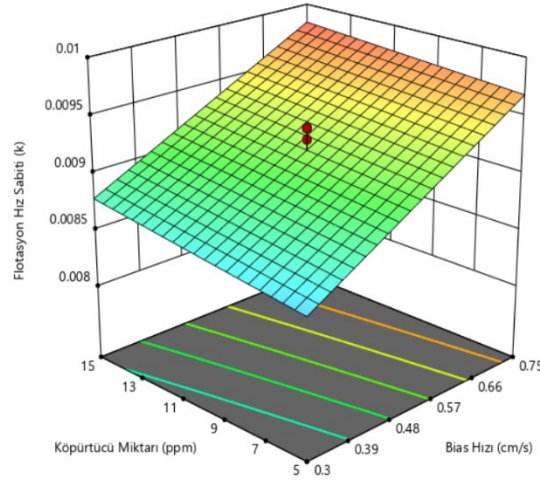
Şekil 4.7'de Jameson flotasyon hücresi deneylerinden elde edilen gerçek değerler ve tahmini değerlerin karşılaştırılması verilmiştir. Noktaların 45 derecelik çizgiye yakın dağılımı modelin verilere iyi bir uyum sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.7. Gerçek değerler ile tahmini değerlerin karşılaştırılması (Jameson hücresi)

Jameson flotasyon hücresinde gerçekleştirilen flotasyon deney sonuçlarının Design Expert-13 ile modellenmesinden elde edilen yanıt yüzey grafikleri aşağıda Şekil 4.8'de sunulmuştur.





Şekil 4.8. Jameson flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon hız sabitine etkisi (DE-13)

Tane boyutu-bias hızı etkileşiminde; en yüksek flotasyon hız sabiti değeri $\sim 0,0100$ iken küçük tane boyutlarında ($\sim 38 \mu\text{m}$) ve yüksek bias hızlarında ($\sim 0,75 \text{ cm/s}$) elde edilmiştir. En düşük k değeri $\sim 0,0080$ iken büyük tane boyutlarında ($\sim 106 \mu\text{m}$) ve düşük bias hızlarında ($\sim 0,30 \text{ cm/s}$) gözlenmektedir.

Tane boyutu-köpürtücü miktarı etkileşiminde; köpürtücü miktarı arttıkça (5 ppm'den 15 ppm'e) k değeri çok hafif artış göstermekte yaklaşık 0,0090'dan 0,0095'e çıkmaktadır. Tane boyutu arttıkça ($38 \mu\text{m}$ 'den $106 \mu\text{m}$ 'e) k değeri azalmakta yaklaşık 0,0095'ten 0,0090'a düşmektedir.

Köpürtücü miktarı-bias hızı etkileşiminde; bias hızı $0,3 \text{ cm/s}$ seviyesindeyken flotasyon hız sabiti $k \sim 0,0080$ civarındadır. Bias hızı $0,75 \text{ cm/s}$ 'ye çıkarıldığında k değeri yaklaşık $0,0100$ seviyesine yükselmektedir. Köpürtücü miktarının etkisi ise daha sınırlıdır. 5 ppm köpürtücüde k değeri yaklaşık 0,0090, 15 ppm'de ise 0,0095 civarındadır.

Üç boyutlu yüzey grafikleri incelendiğinde, flotasyon hız sabiti üzerinde en belirgin etkinin bias hızı değişiminden kaynaklandığı görülmektedir. Bias hızındaki artış, tüm deney koşullarında k değerini anlamlı ölçüde yükseltirken tane boyutundaki artış k üzerinde ters yönlü bir etki oluşturmakta ve daha düşük değerler elde edilmesine neden olmaktadır. Köpürtücü miktarının etkisi ise diğer parametrelere kıyasla sınırlı kalmakta ve yalnızca düşük seviyelerde küçük artışlar sağlamaktadır.

Jameson flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle SPSS'de oluşturulan flotasyon hız sabitinin regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Flotasyon Hız Sabiti (k)} = 0,008 - 0,000004918 * X_1 + 0,002 * X_2 + 0,00002 * X_3$$

Jameson flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle DE-13'te oluşturulan flotasyon hız sabitinin regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Flotasyon Hız Sabiti (k)} = 0,00847304 - 1,20098 \times 10^{-5} * X_1 + 0,00172549 * X_2 + 6,9607 \times 10^{-6} * X_3 + 1,30719 \times 10^{-5} * X_1 X_2 + 3,43137 \times 10^{-7} * X_1 X_3 + 2,48366 \times 10^{-5} * X_2 X_3 - 6,53595 \times 10^{-7} * X_1 X_2 X_3$$

X₁ (Tane Boyutu): Tane boyutu değişkeni SPSS' te oluşturulan modelde negatif (-0,000004918) yönde katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla, tane boyutundaki artış flotasyon hız sabitini düşürmektedir. Daha ince taneler yüzey alanı/hacim oranını artırarak flotasyon kinetiğini iyileştirebilir ancak aşırı ince tanelerin de köpük yapısını bozabileceği unutulmamalıdır (Fuerstenau ve diğ., 1983). Sokoloviç ve Miskoviç (2018) ile Polat ve diğ., (1993) çalışmalarında, 25-150 µm arası kömür tanelerinde yüzey alanının artışı nedeniyle kabarcıklara tutunmanın kolaylaştığını ve flotasyon hız sabitinin arttığını belirtmiştir.

Benzer şekilde DE-13'te oluşturulan modele göre de tane boyutu arttıkça hız sabiti azalmaktadır. Bu iri tanelerin flotasyonda daha yavaş hızla toparlandığını gösterirken küçük taneler daha kolay taşınabilmekte ve yüzeye çıkmaktadır. Dolayısıyla iri tane boyutlarının flotasyon verimliliğini azalttığını göstermektedir. Feng ve Aldrich. (1999), ultra ince taneler ve çok iri taneler için flotasyon hız sabiti ideal olmamakla birlikte orta boyutlu (38-75 µm) tanelerde yapılan flotasyonda en yüksek flotasyon hız sabitine ulaştığını bildirmiştir.

X₂ (Bias): Bias hızı değişkeni SPSS'de oluşturulan modelde en güçlü ve anlamlı etkiye sahip değişkendir. Bu, bias hızı her bir birim arttığında flotasyon hız sabitinde 0,002 birimlik artış olacağını ve bu ilişkinin istatistiksel olarak son derece anlamlı olduğunu gösterir. Bias'ın artırılması, köpük bölgesinde hidrolik koşulları iyileştirerek gang minerallerinin köpük fazından uzaklaştırılmasını sağlar ve değerli minerallerin köpükle taşınma verimini artırır (Finch ve Dobby. 1990). Bu mekanizma, köpük bölgesindeki mineral konsantrasyonunu optimize ederek flotasyon hız sabitini yükseltir. Özellikle yüksek bias oranları köpük stabilitesini destekler ve kabarcık-partikül agregatlarının verimini kolaylaştırır (Yianatos ve diğ., 2005).

DE-13'te de oluşturulan modele göre bias pozitif bir katsayıya (0,00172549) sahiptir. Bu durumda bias arttıkça k artar yani daha yüksek bias değerleri flotasyon hızını artırır. Katsayı, biasın k üzerinde tane boyutuna göre daha güçlü bir pozitif etkiye

sahip olduğunu göstermektedir. Artan bias kabarcık-partikül etkileşimlerini güçlendirerek flotasyon hız sabitini olumlu yönde etkileyen kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

X₃ (Köpürtücü Miktarı): Köpürtücü miktarı SPSS’de oluşturulan denklemde katsayısı 0,00002 bulunmuştur. Yani, köpürtücü miktarının artması ile flotasyon hız sabitini de bu oranda artırmaktadır. Köpürtücü miktarının artırılması, köpük yapısının dayanıklılığını güçlendirir ve mineral partiküllerinin kabarcıklarla bağlanarak köpük fazına taşınmasını kolaylaştırır (Wills ve Finch, 2016). Kolon flotasyon hücrelerinde köpürtücü, köpük bölgesinde uygun bir kabarcık boyutu ve köpük yüksekliği sağlayarak mineral verimini optimize eder. Bununla birlikte köpürtücü miktarının etkisi diğer proses parametreleri (örneğin, bias ve tane boyutu) ile etkileşim içinde olduğundan optimum miktarın belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir.

DE-13’te ise köpürtücü miktarı arttıkça hız sabiti çok az da ($6,9607 \cdot 10^{-6}$) olsa artmakta olup köpük stabilitesine olumlu ve sınırlı bir katkı sağlamaktadır. Köpürtücü miktarındaki artış, köpük stabilitesini ve partikül-kabarcık tutunma etkinliğini güçlendirerek flotasyon kinetiğini iyileştirmektedir. Klimpel ve diğ., (1986) köpürtücü konsantrasyonunun artırılmasının özellikle ince tanelerin flotasyonunda, hız sabitini iyileştirdiğini belirtmiştir. Benzer şekilde Rao ve Leja (2004) köpürtücülerin köpük yapısını düzenleyerek mineral-kabarcık etkileşimini kolaylaştırdığını rapor etmiştir.

4.3.1.2. Flotasyon kolonu flotasyon hız sabiti analizleri

Flotasyon kolonunda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle SPSS’de oluşturulan istatistiksel modelin ANOVA sonuçları Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Kolon flotasyonu deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (SPSS)

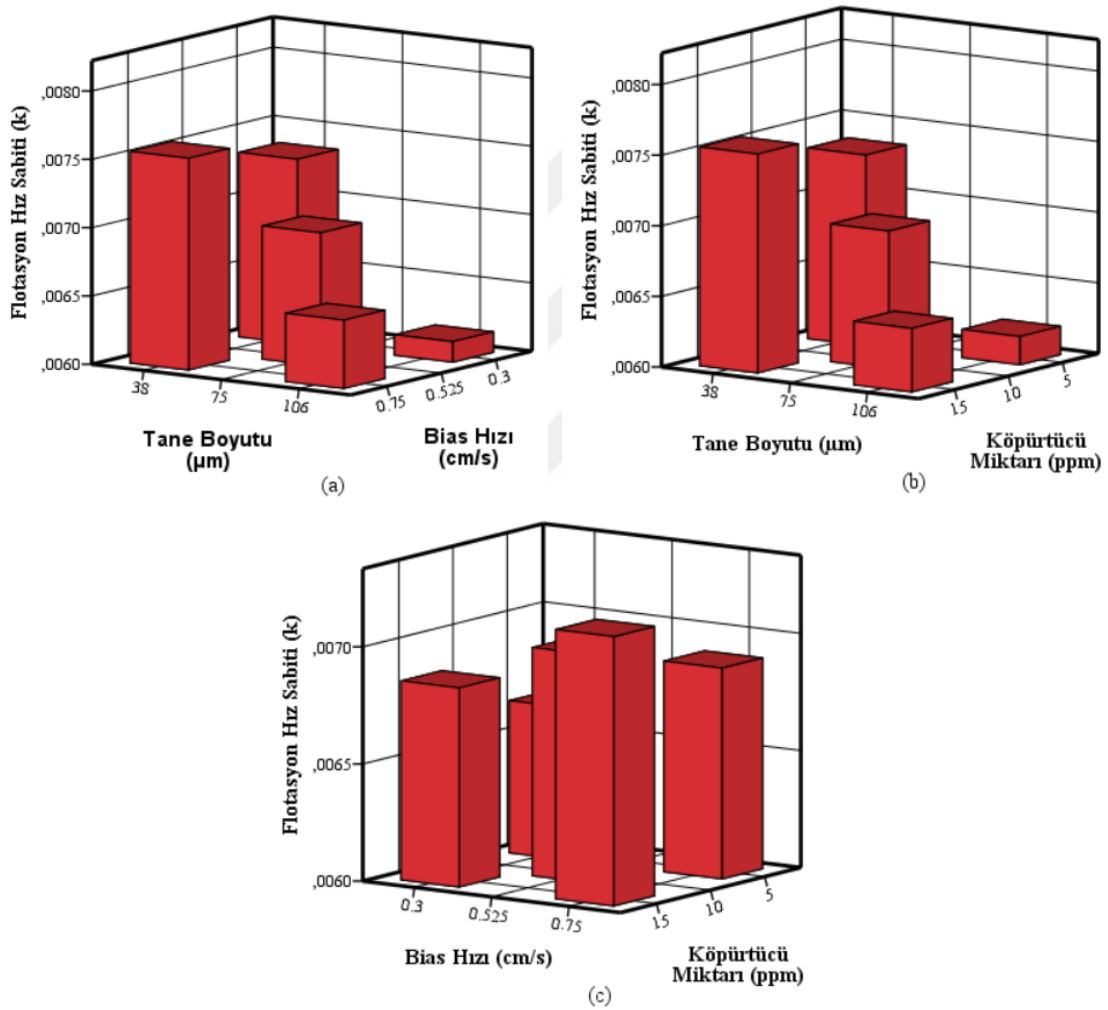
Faktör	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F	p
Model	$2,829 \cdot 10^{-6}$	8	$3,536 \cdot 10^{-7}$	38,580	0,006
X ₁ -Tane Boyutu	$2,531 \cdot 10^{-6}$	1	$1,513 \cdot 10^{-7}$	276,136	0,000
X ₂ -Bias Hızı	$1,513 \cdot 10^{-7}$	1	$1,013 \cdot 10^{-7}$	16,500	0,027
X ₃ -Köpürtücü Miktarı	$1,013 \cdot 10^{-7}$	1	$1,250 \cdot 10^{-9}$	11,045	0,045
X ₁ *X ₂	$1,125 \cdot 10^{-8}$	1	$1,250 \cdot 10^{-9}$	1,227	0,349
X ₁ *X ₃	$1,250 \cdot 10^{-9}$	1	$1,125 \cdot 10^{-8}$	0,136	0,736
X ₂ *X ₃	$1,250 \cdot 10^{-9}$	1	$1,125 \cdot 10^{-8}$	0,136	0,736
X ₁ *X ₂ *X ₃	$1,125 \cdot 10^{-8}$	1	$2,750 \cdot 10^{-8}$	1,227	0,349
Hata	$2,750 \cdot 10^{-8}$	3	$9,167 \cdot 10^{-9}$		
Toplam	$2,857 \cdot 10^{-6}$	11			

R² :0,9900

Adj. R² :0,9650

ANOVA sonuçları. modelin toplam varyansın %99'unu açıkladığını ($R^2 = 0,9900$) ve düzeltilmiş R^2 değerinin 0,9650 olduğunu göstermektedir. Bağımsız değişkenler arasında tane boyutu (X_1), bias hızı (X_2) ve köpürtücü miktarının (X_3) model üzerindeki etkileri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$).

Gerçekleştirilen çalışmalar tane boyutu, bias hızı ve köpürtücü miktarının oluşturduğu etkileşimlerin flotasyon hız sabiti (k) üzerinde meydana getirdiği etkileri Şekil 4.9'da detaylı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 4.9. Kolon flotasyonu deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon hız sabitine etkisi (SPSS)

Tane boyutu-bias hızı etkileşiminde; en yüksek k değeri 38 μm tane boyutu ve 0,75 cm/s bias hızı kombinasyonunda yaklaşık olarak 0,0076 iken, en düşük k değeri ise 106 μm tane boyutunda ve 0,3 cm/s bias hızında 0,0062 seviyelerine gerilemektedir.

Tane boyutu-köpürtücü miktarı etkileşiminde; en yüksek k değeri 38 µm tane boyutu için 15 ppm köpürtücü miktarında elde edilmiş olup yaklaşık 0,0076, en düşük k değeri ise 106 µm tane boyutu ve 5 ppm köpürtücü miktarında yaklaşık 0,0062 olarak bulunmuştur

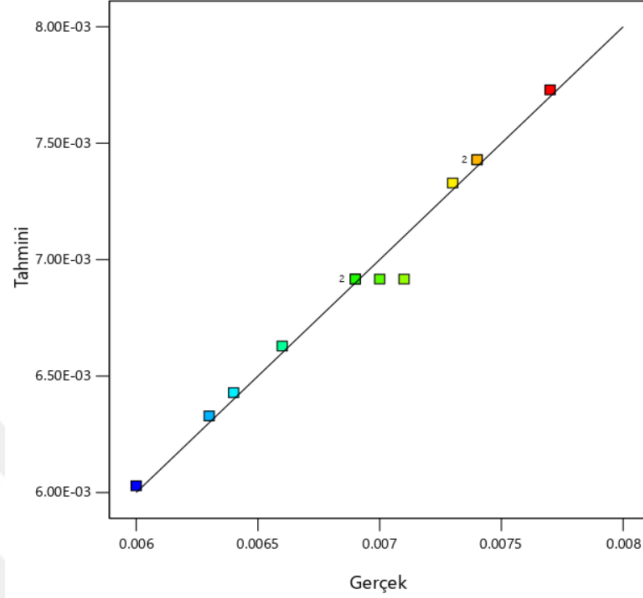
Köpürtücü miktarı-bias hızı etkileşiminde; en yüksek k değeri 0,75 bias hızı ve 15 ppm köpürtücü miktarı kombinasyonunda yaklaşık olarak 0,0072 iken en düşük k değeri ise 0,3 bias hızı ve 5 ppm köpürtücü miktarı kombinasyonunda yaklaşık olarak 0,0066'dır.

Tane boyutunun artması sistemde bias hızında bir artışa yol açmaktadır. Buna karşılık bias hızındaki artış flotasyon hız sabitini yükseltici yönde etki göstermektedir. Köpürtücü miktarındaki artış ise, belirli bir düzeye kadar flotasyon performansına pozitif katkı sağlamaktadır. Bu durum, tane boyutu, bias hızı, flotasyon kinetiği ve köpürtücü miktarı arasındaki etkileşimin doğrusal olmayan ve çok değişkenli bir ilişki sergilediğini ortaya koymaktadır. Flotasyon kolonunda yapılan deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Kolon flotasyonu deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (DE-13)

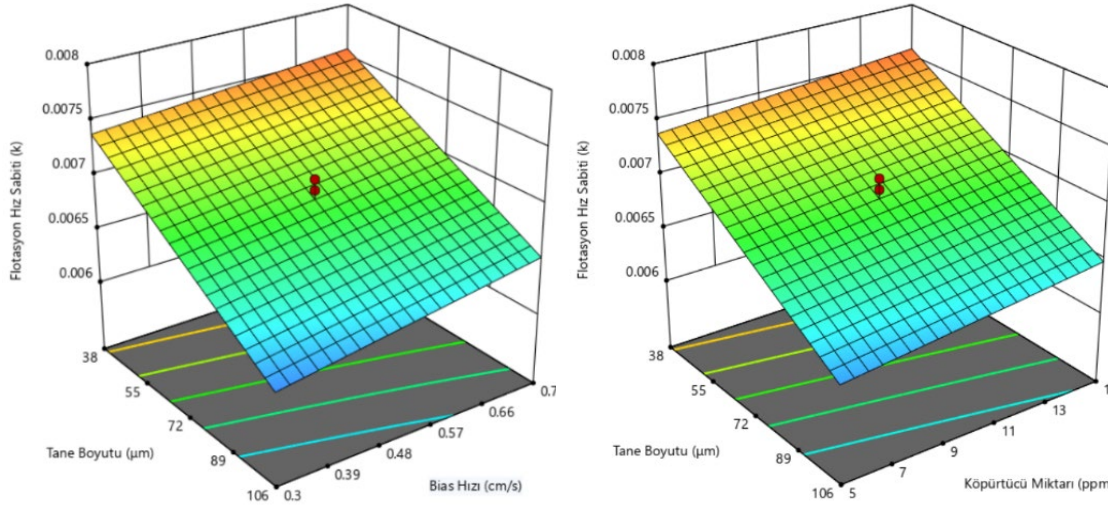
Faktör	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F	p	
Model	2,809*10 ⁻⁶	7	4,013*10 ⁻⁷	33.500	0,0022	significant
X ₁ -Tane Boyutu	2,531*10 ⁻⁶	1	2,531*10 ⁻⁶	211.300	0,0001	
X ₂ -Bias Hızı	1,012*10 ⁻⁷	1	1,012*10 ⁻⁷	8.450	0,0438	
X ₃ -Köpürtücü Miktarı	1,512*10 ⁻⁷	1	1,512*10 ⁻⁷	12.630	0,0237	
X ₁ *X ₃	1,250*10 ⁻⁹	1	1,250*10 ⁻⁹	0.104	0,7629	
X ₁ *X ₂	1,125*10 ⁻⁸	1	1,125*10 ⁻⁸	0.939	0,3874	
X ₂ *X ₃	1,250*10 ⁻⁹	1	1,250*10 ⁻⁹	0.104	0,7629	
X ₁ *X ₂ *X ₃	1,125*10 ⁻⁸	1	1,125*10 ⁻⁸	0.939	0,3874	
Hata	4,792*10 ⁻⁸	4	1,198*10 ⁻⁸			
Toplam	2,857*10 ⁻⁶	11				
R²	:0,9832					
Adj. R²	:0,9539					

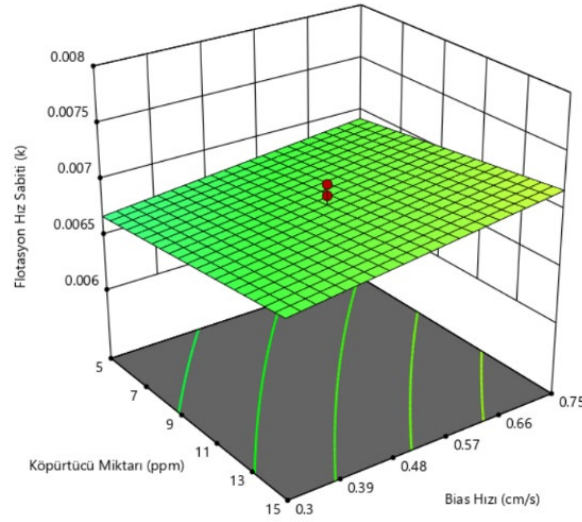
Şekil 4.10'da kolon flotasyonu deneylerinden elde edilen gerçek değerler ve tahmini değerler karşılaştırılması verilmiştir. Noktaların 45 derecelik çizgiye yakın dağılımı modelin veriler ile uyum sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.10. Gerçek değerler ile tahmini değerlerin karşılaştırılması (flotasyon kolonu)

Kolon flotasyonunda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen yanıt yüzey grafikleri aşağıda Şekil 4.11'de sunulmuştur.





Şekil 4.11. Flotasyon kolunu deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon hız sabitine etkisi (DE-13)

Tane boyutu-bias hızı etkileşiminde; tane boyutu arttıkça ($38\ \mu\text{m}$ 'den $106\ \mu\text{m}$ 'ye), k değeri azalmakta yaklaşık $0,0075$ 'ten $0,0060$ 'a düşmektedir. Benzer şekilde bias hızı arttıkça flotasyon hız sabiti çok az azalış göstermektedir.

Tane boyutu-köpürtücü miktarı etkileşiminde; tane boyutu arttıkça ($38\ \mu\text{m}$ 'den $106\ \mu\text{m}$ 'ye) k değeri belirgin şekilde azalmakta yaklaşık $0,0075$ 'ten $0,0060$ 'a düşmektedir. Bu düşüş, tüm köpürtücü miktarlarında da gözlemlenmektedir. Köpürtücü miktarı arttıkça ($5\ \text{ppm}$ 'den $15\ \text{ppm}$ 'e), k değerinde hafif bir azalma görülmekte yaklaşık $0,0070$ 'ten $0,006$ 'e düşmektedir.

Köpürtücü miktarı-bias hızı etkileşiminde; eğilim oldukça zayıf olsa da bias hızı arttıkça ($0,30\ \text{cm/s}$ 'den $0,75\ \text{cm/s}$ 'e) k değerinde çok hafif bir azalma gözlemlenmekte ve yaklaşık $0,0069$ 'dan $0,0066$ 'ya kadar düşmektedir. Köpürtücü miktarı arttıkça ($5\ \text{ppm}$ 'den $15\ \text{ppm}$ 'e) k değeri azalmakta; yaklaşık $0,0068$ 'den $0,0066$ 'ya düşmektedir.

Grafiklerde incelenen değişkenlerin flotasyon hız sabiti üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, tüm durumlarda değişkenlerin artması genel olarak k değerinde azalmaya yol açmaktadır. Tane boyutu arttıkça iri taneler hem daha zor askıda kalmakta hem de yüzeye taşınmaları daha fazla enerji gerektirdiğinden sistemde daha düşük bir flotasyon kinetiği sergilemektedir. Benzer şekilde, bias hızının artması da partiküllerin hücre içindeki kalış süresini azaltmakta ve kabarcıklarla yeterli teması gerçekleştirilmeden hücreden uzaklaşmalarına yol açmaktadır.

Flotasyon kolonunda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle SPSS’de oluşturulan flotasyon hız sabitinin regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Flotasyon Hız Sabiti} = 0,008 - 1,643 \times 10^{-5} * X_1 + 0,001 * X_2 + 2,250 \times 10^{-5} * X_3$$

Flotasyon kolonunda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle DE-13’te oluşturulan flotasyon hız sabitinin regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Flotasyon Hız Sabiti (k)} = 0,00822917 - 2,5 \times 10^{-5} * X_1 - 0,000558824 * X_2 - 2,56863 \times 10^{-5} * X_3 + 1,47059 \times 10^{-5} * X_1 X_2 + 5,88235 \times 10^{-7} * X_1 X_3 + 8,16993 \times 10^{-5} * X_2 X_3 - 9,80392 \times 10^{-7} * X_1 X_2 X_3$$

X₁ (Tane Boyutu): Bu negatif değer, tane boyutu arttıkça SPSS ($-1.643.10^{-5}$) ve DE (-2.5×10^{-5}) katsayılarına bakılında flotasyon hız sabitinin azaldığını göstermektedir. Yani, partiküller daha iri hale geldikçe flotasyon hızı yavaşlamaktadır. Yang ve diğ., (2018) yaptıkları çalışmada ince tane boyutlarında flotasyon hızının iri tane boyutlarına göre daha iyi olduğunu vurgulamışlardır. Lu ve diğ., (2023) çalışmalarında 0,25–0,074 mm arası tanelerin en hızlı ve verimli flotasyonu sağladığını, daha ince tanelerde ise sistemden uzaklaştırmanın zorlaştığını göstermiştir. Genel olarak, uygun aralıkta küçülen tane boyutu flotasyon kinetiğini artırsa da çok ince tanelerde köpük taşınımı ve köpük stabilitesi gibi faktörler hız üzerinde olumsuz etki yapabilmektedir.

X₂ (Bias): SPSS’de oluşturulan modele göre bias değişkeninin katsayısı +0,001’dir. Bu pozitif ilişki, bias değerinin artmasının flotasyon hızını artırdığını göstermektedir. Wills ve Finch (2015), bias hücre içerisindeki hava-su oranı veya yoğunluk farkı gibi sistem dengesini etkileyen bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Bias’ın artışı mineral-parçacıklarının yüzeye taşınmasını kolaylaştırarak reaksiyon hızını pozitif yönde etkilemektedir. Anzoom ve diğ., (2020) biasın artırılmasıyla flotasyon hücresindeki kabarcık sayısı ve minerallerin kabarcıklara tutunma hızını artırarak flotasyon hızını yükseltmektedir.

Tam tersine DE’de yapılan modele göre bias değerinin ($-0,000558824$) artırılmasının flotasyon hızını olumsuz etkilediği görülmektedir.

X₃ (Köpürtücü Miktarı): Köpürtücü değişkeni için SPSS’de oluşturulan modele göre katsayısı $+2,250 \times 10^{-5}$ ’tir ve köpürtücü miktarındaki artışın flotasyon hızını pozitif yönde etkilemektedir. Köpürtücüler, köpük fazının stabilitesini artırarak mineral taneciklerinin yüzeye taşınmasını sağlar. Ancak bu etkinin katsayısı daha düşük olduğu için diğer değişkenler kadar kuvvetli olmadığı gözlemlenmektedir. Bu da belirli bir

eşiğin üzerindeki köpürtücü artışlarının etkisinin sınırlı olabileceğine işaret etmektedir. Dey ve diğ., (2014), ince taneleri üzerinde yapılan flotasyon çalışmalarında hava-su arayüzeyinde yüzey gerilimini azaltarak daha stabil köpük oluşumunu kolaylaştıran köpürtücülerin miktarı arttıkça flotasyon hızı artmakta olup belirli bir dozu aşmak köpük yapısını bozmaktadır. Aksine DE’de yapılan model sonucunda köpürtücü miktarı arttıkça (-2.56863×10^{-5}) flotasyon hız sabitini azaltan bir etki göstermektedir.

4.3.1.3. Denver flotasyon hücresi flotasyon hız sabiti analizleri

Denver flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle SPSS’de oluşturulan istatistiksel modelin ANOVA sonuçları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

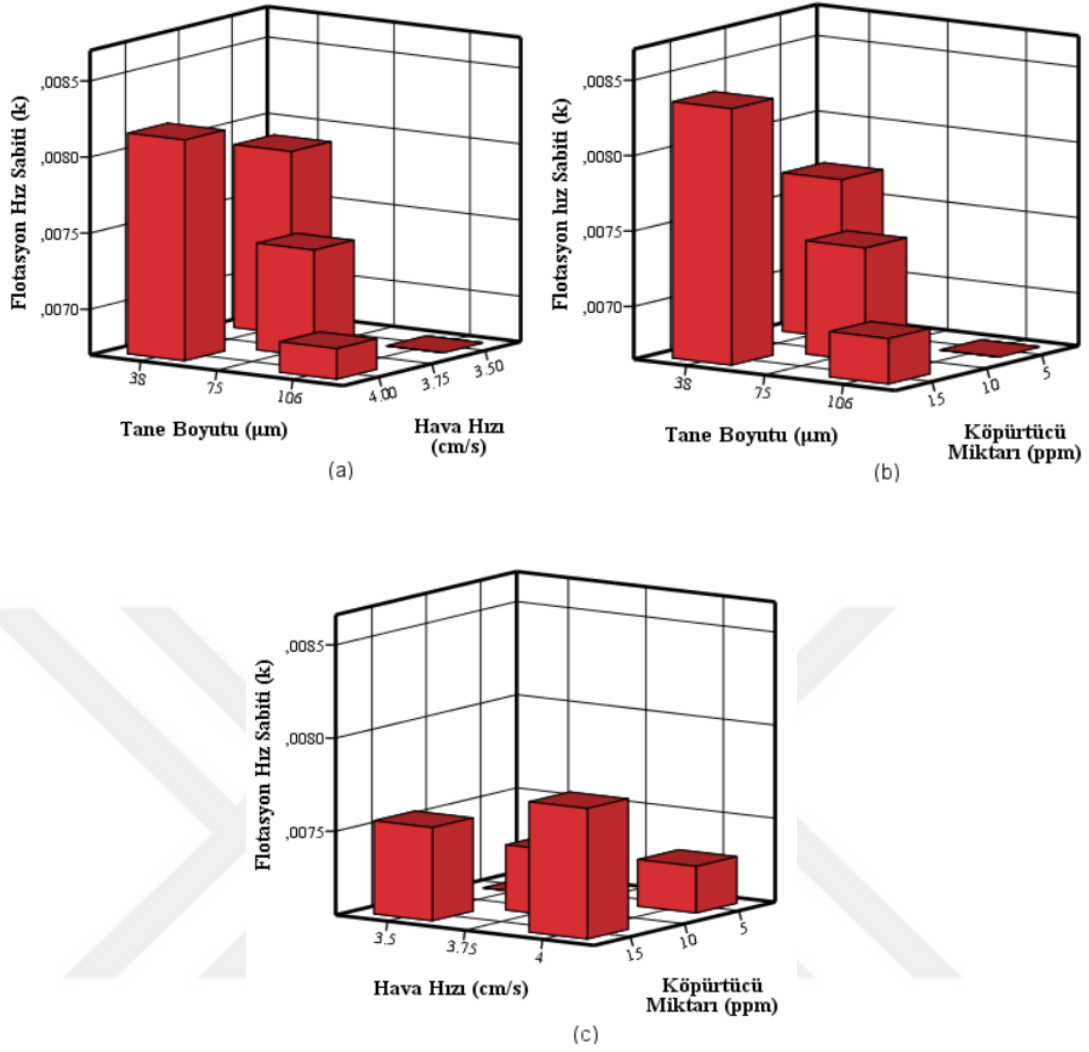
Çizelge 4.8. Denver flotasyon deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (SPSS)

Faktör	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F	p
Model	$3,629 \times 10^{-6}$	8	$4,536 \times 10^{-7}$	68,047	0,003
X ₁ -Tane Boyutu	$3,001 \times 10^{-6}$	1	$3,001 \times 10^{-6}$	450,188	0,000
X ₂ -Hava Hızı	$1,013 \times 10^{-7}$	1	$1,013 \times 10^{-7}$	15,188	0,030
X ₃ -Kopurtücü Miktarı	$4,513 \times 10^{-7}$	1	$4,513 \times 10^{-7}$	67,688	0,004
X ₁ *X ₂	$1,250 \times 10^{-9}$	1	$1,250 \times 10^{-9}$	0,187	0,694
X ₁ *X ₃	$6,125 \times 10^{-8}$	1	$6,125 \times 10^{-8}$	9,187	0,056
X ₂ *X ₃	$1,250 \times 10^{-9}$	1	$1,250 \times 10^{-9}$	0,187	0,694
X ₁ *X ₂ *X ₃	$1,125 \times 10^{-8}$	1	$1,125 \times 10^{-8}$	1,687	0,285
Hata	$2,000 \times 10^{-8}$	3	$6,667 \times 10^{-9}$		
Toplam	$3,649 \times 10^{-6}$	11			

R² :0,9950

Adj. R² :0,9800

ANOVA sonuçları, modelin toplam varyansın %99,7’sini açıkladığını ($R^2=0,9950$) ve düzeltilmiş R^2 değerinin 0,9800 olduğunu göstermektedir. Bağımsız değişkenler arasında tane boyutu (X_1), bias hızı (X_2) ve köpürtücü miktarının (X_3) model üzerindeki etkileri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Denver flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen yanıt yüzey grafikleri aşağıda Şekil 4.12’de sunulmuştur.



Şekil 4.12. Denver flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon hız sabitine etkisi (SPSS)

Tane boyutu-hava hızı etkileşiminde; 38 μm tane boyutu ve 4 cm/s hava hızında k değeri en yüksek seviyede ($k \sim 0,0082$) olmaktadır. En düşük değeri ise 3,5 cm/s hava hızında olup bu değer 0,0067 civarındadır.

Tane boyutu-köpürtücü miktarı etkileşiminde; 38 μm tane boyutu için köpürtücü miktarının artışı flotasyon hız sabitini pozitif yönde etkilemekte olup en yüksek 15 ppm'de 0,00784 civarındadır. 106 μm tane boyutunda flotasyon hız sabiti köpürtücü miktarına karşı daha düzensiz bir yanıt vermektedir ve en düşük değer 5 ppm'de yaklaşık 0,0066'dır.

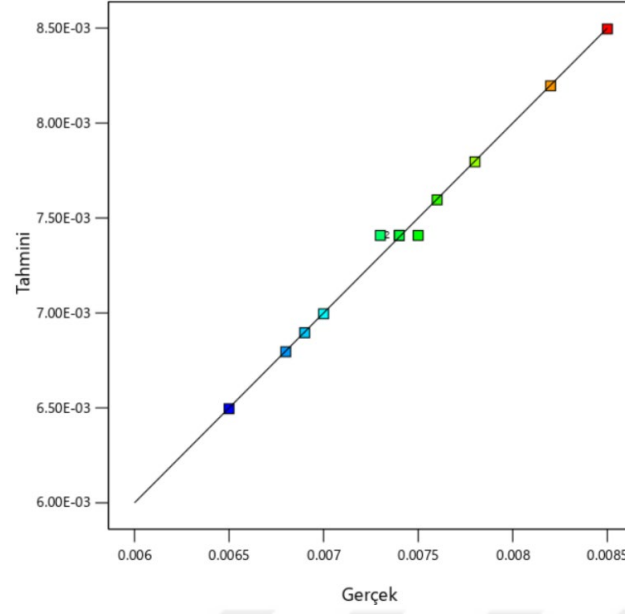
Köpürtücü miktarı-hava hızı etkileşiminde; 3,5cm/s hava hızı ve 15 ppm köpürtücü miktarı kombinasyonunda flotasyon hız sabiti değeri yaklaşık olarak 0,0075 iken 4 cm/s hava hızı 5 ppm köpürtücü miktarında ise yaklaşık 0,0073'tür

Küçük tanelerin daha yüksek yüzey alanına sahip olması flotasyon sürecinin etkinliğini artırarak daha yüksek verim elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak hava hızındaki artış belirli bir eşik değere kadar flotasyon verimini yükseltirken bu sınırın aşılması verimliliği sınırlamaktadır. Benzer şekilde, tane boyutunun artması flotasyon veriminde düşüşe neden olurken köpürtücü miktarındaki artış da yalnızca belirli bir seviyeye kadar pozitif katkı sağlamakta, bu noktadan sonra ise verim üzerinde olumsuz etki göstermektedir. Genel olarak, hava hızının artışı flotasyon hız sabitini yükseltirken köpürtücü miktarındaki artış ise sınırlı da olsa ek bir olumlu etki yaratmaktadır. Denver flotasyon hücresinde yapılan deneylerden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Denver flotasyon deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (DE-13)

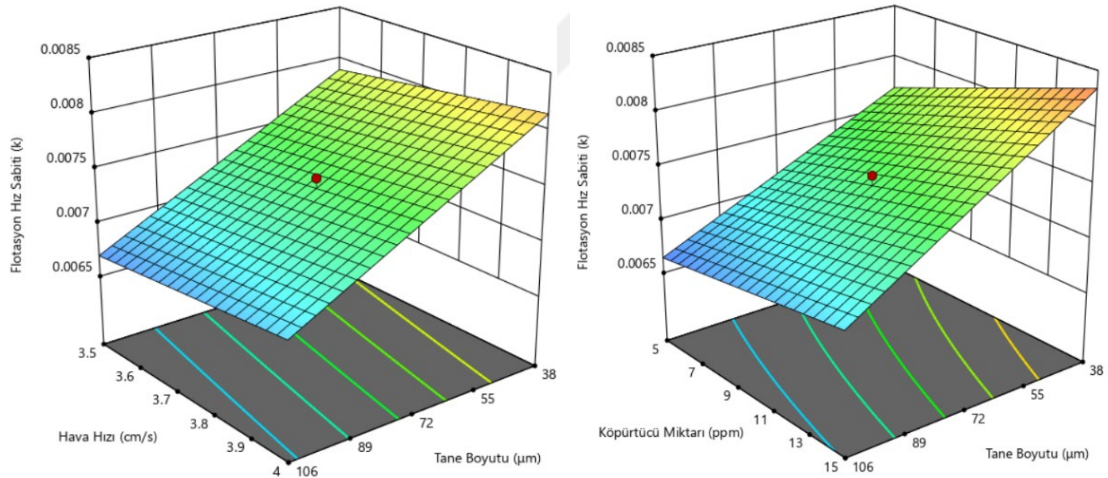
FAKTÖR	KARELER TOPLAMI	SERBESTLİK DERECE	ORTALAMA KARE	F	p	
Model	3,629*10 ⁻⁶	7	5,184*10 ⁻⁷	101,560	0,0002	significant
X ₁ -TaneBoyutu	3,001 *10 ⁻⁷	1	3,001*10 ⁻⁶	588,000	< 0,0001	
X ₂ -Hava Hızı	1,013 *10 ⁻⁷	1	1,013*10 ⁻⁷	19,840	0,0112	
X ₃ -Köpürtücü Miktarı	4,513 *10 ⁻⁷	1	4,513*10 ⁻⁷	88,410	0,0007	
X ₁ X ₂	1,250*10 ⁻⁹	1	1,250*10 ⁻⁹	0,245	0,6466	
X ₁ X ₃	6,125*10 ⁻⁸	1	6,125*10 ⁻⁸	12,000	0,0257	
X ₂ X ₃	1,250*10 ⁻⁹	1	1,250*10 ⁻⁹	0,2450	0,6466	
X ₁ X ₂ X ₃	1,125*10 ⁻⁸	1	1,125*10 ⁻⁸	2,200	0,2118	
Hata	2,042*10 ⁻⁸	4	5,104*10 ⁻⁹			
Toplam	3,649*10 ⁻⁶	11				
R²	:0,9944					
Adj. R²	:0,9846					

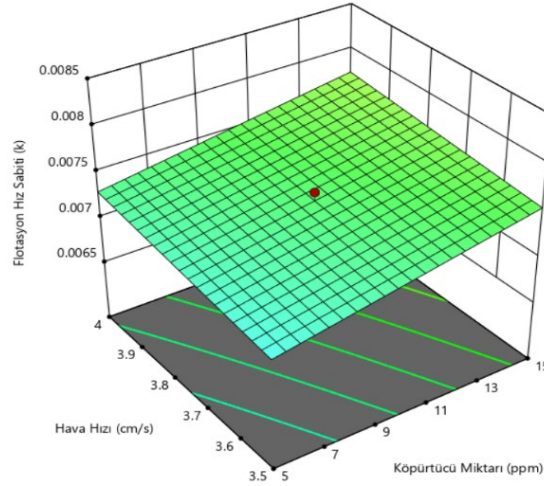
Denver flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deney sonuçlarından elde edilen gerçek ve tahmini flotasyon hız sabiti grafiği modelin doğruluğunu ve tahmin gücünü görsel olarak ortaya koymaktadır. Noktaların 45 derecelik çizgiye yakın dağılımı modelin verilere uyum sağladığını ($R^2 = 0,9944$) ve denver flotasyon hücresi dinamiklerini doğru bir şekilde yakaladığını gösterir. Gerçek değerler ile tahmini deneylerin karşılaştırılmasına ait sonuçlar Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.13. Gerçek değerler ile tahmini değerlerin karşılaştırılması (Denver hücresi)

Denver flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen yanıt yüzey grafikleri aşağıda Şekil 4.14’de sunulmuştur.





Şekil 4.14. Denver flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon hız sabitine etkisi (DE-13)

Tane boyutu-hava hızı etkileşiminde; tane boyutu arttıkça flotasyon hız sabiti (k) belirgin şekilde azalmakta yaklaşık 0,0080'den 0,0065'e kadar düşmektedir. Hava hızı arttıkça ise k değerinde çok hafif bir artış olmakta yaklaşık 0,0068'den 0,0074'e kadar yükselmektedir.

Tane boyutu-köpürtücü miktarı etkileşiminde; tane boyutu arttıkça flotasyon hız sabiti belirgin şekilde azalmakta ve yaklaşık 0,0080'den 0,0065'e kadar düşüş gözlenmektedir. Benzer şekilde köpürtücü miktarı arttıkça da k değerinde azalma meydana gelmekte ve yaklaşık 0,0080'den 0,0065'e kadar düşmektedir.

Köpürtücü miktarı-hava hızı etkileşiminde; köpürtücü miktarı arttıkça flotasyon hız sabiti azalma eğilimi göstermekte olup yaklaşık 0,0066'dan 0,0063'e kadar düşmektedir. Öte yandan, hava hızı arttıkça k değerinde hafif bir artış gözlenmekte ve yaklaşık 0,0065'ten 0,0069'a kadar yükselmektedir.

Flotasyon hız sabiti üzerinde yapılan incelemeler, küçük boyutlu parçacıkların yüzeye daha kolay ulaşabilmesi ve kabarcıklarla etkin birleşme olasılığının artmasından dolayı tane boyutunun küçülmesinin k değerini artırdığını göstermektedir. Ayrıca hava hızı ve köpürtücü miktarındaki artışların k üzerinde pozitif etkisi bulunmakla birlikte, bu etkiler tane boyutuna kıyasla daha sınırlıdır.

Denver flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle SPSS'de oluşturulan flotasyon hız sabitinin regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Flotasyon Hız Sabiti} = 0,007 - 1,798 \times 10^{-5} * X_1 + 0,000 * X_2 + 4,750 \times 10^{-5} * X_3$$

Flotasyon kolonunda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle DE’de oluşturulan flotasyon hız sabitinin regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Flotasyon Hız Sabiti (k)} = 0,0077826 - 4,04412 \times 10^{-5} * X_1 + 2,05882 \times 10^{-5} * X_2 - 0,000116176 * X_3 + 7,35294 \times 10^{-6} * X_1 X_2 + 2,79412 \times 10^{-6} * X_1 X_3 + 5,35294 \times 10^{-5} * X_2 X_3 - 8,82353 \times 10^{-7} * X_1 X_2 X_3$$

X₁ (Tane Boyutu): Tane boyutu arttıkça flotasyon hız sabiti azalmaktadır. SPSS’teki modelde katsayının negatif olması, büyük tanelerin yüzeyde kabarcıklara tutunmasının daha zor olduğunu ve bu nedenle ayırışma hızının düştüğünü göstermektedir. Finch ve Dobby (1990), tane boyutunun flotasyon kinetiğini doğrudan etkilediğini ve genellikle daha küçük tane boyutlarının partikül-kabarcık çarpışma ve tutunma olasılıklarını artırarak daha yüksek flotasyon hız sabitleri sağladığını vurgulamıştır. Bu bulgu, tane boyutunun flotasyon kinetiği üzerindeki kritik rolünü teyit etmekte ve proses optimizasyonunda daha küçük tane boyutlarının tercih edilebilirliğini desteklemektedir. Benzer şekilde DE-13’te oluşturulan regresyon denklemi de incelendiğinde tane boyutunun artışı flotasyon hız sabitini artırmaktadır. Jameson (2012) yaptığı çalışmada boyutu arttıkça hız sabiti azalan klasik bir eğri izlemektedir. İri tanelerdeki düşük flotasyon hızı değeri hücredeki hidrodinamik koşullardan kaynaklandığını bildirmiştir.

X₂ (Hava Hızı): Hava hızının katsayısı sayısal olarak sıfıra çok yakın görünmekte ancak t-istatistiği ve p-değeri bu değişkenin flotasyon hızını anlamlı bir şekilde etkilediğini göstermektedir. Hava hızı her ne kadar çok küçük bir katsayıya sahip olsa da sistemin kinetiğini etkileyen önemli bir değişkendir. Nguyen ve Schulze (2004), hava hızının kabarcık oluşumunu ve partikül-kabarcık çarpışma sıklığını artırarak flotasyon kinetiğini iyileştirdiğini belirtmiştir. Artan hava hızı, kabarcık-partikül etkileşimlerini güçlendirerek flotasyon hız sabitini olumlu yönde etkileyen kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Fakat DE-13’te oluşturulan analiz katsayısına bakarak da görüleceği üzere hava hızının artışı flotasyon hız sabitini azaltmaktadır.

X₃ (Köpürtücü Miktarı): Köpürtücü miktarının katsayısı pozitifdir yani köpürtücü miktarı arttıkça flotasyon hız sabiti de artar. Köpürtücü, köpüklerin stabil kalmasını ve minerallerin kabarcıklara tutunmasını kolaylaştırır. Köpürtücü miktarı, bu modele göre sistem verimini artıran en etkili değişkenlerden biridir. Wills ve Finch (2016), köpürtücülerin flotasyon proseslerinde köpük yapısını optimize ederek kinetik

performansı artırdığını vurgulamıştır. Bu bulgu, flotasyon hücresinde köpürtücü miktarının hızlı ve etkin bir ayırma kinetiği için kritik bir parametre olduğunu teyit etmektedir. DE-13'te oluşturulan regresyon denklemine göre tane boyutu ve hava hızı gibi köpürtücü miktarı da arttıkça flotasyon hız sabiti düşmektedir.

4.3.2. Yanabilir kısım verimi analizleri

Regresyon denklemi. flotasyon hız sabiti (k) üzerindeki tane boyutu (X_1), bias (X_2) ve köpürtücü miktarı (X_3) gibi bağımsız değişkenlerin etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

4.3.2.1. Jameson flotasyon hücresi flotasyon verimi analizleri

Jameson flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle SPSS'de oluşturulan istatistiksel modelin ANOVA (Varyans Analizi) sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Jameson flotasyon deneylerinden elde edilen flotasyon verimine ait varyans analizi sonuçları (SPSS)

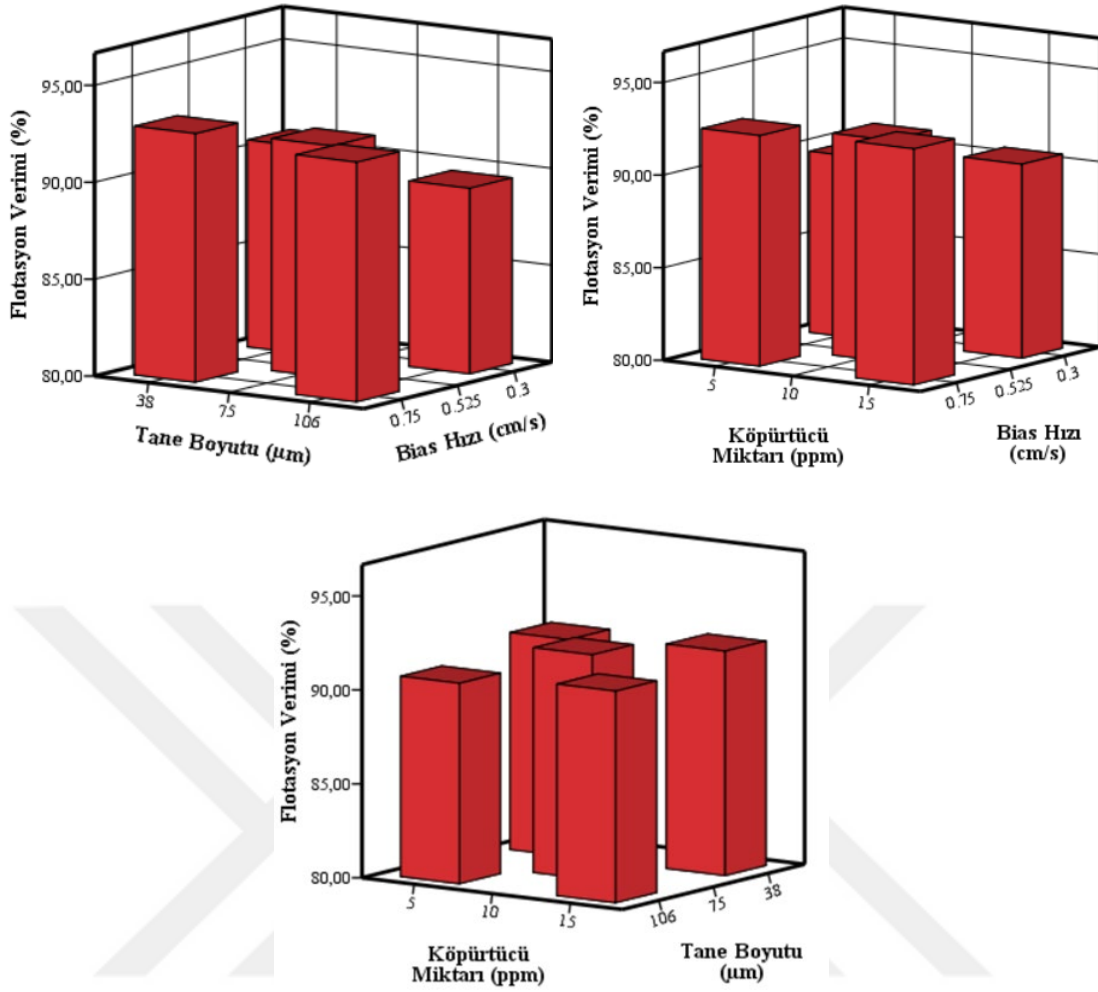
Faktör	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F	p
Model	15,396	8	1,912	20858,477	0,000
X_1 -Tane Boyutu	1,217	1	1,217	13274,182	0,000
X_2 -Bias Hızı	12,251	1	12,251	133650,000	0,000
X_3 -Köpürtücü Miktarı	0,490	1	0,490	5346,000	0,000
$X_1 * X_2$	0,205	1	0,205	2234,182	0,000
$X_1 * X_3$	0,020	1	0,020	218,182	0,001
$X_2 * X_3$	0,076	1	0,076	829,636	0,000
$X_1 * X_2 * X_3$	0,045	1	0,045	490,909	0,000
Hata	0,000	3	$9,167 * 10^{-5}$		
Toplam	15,296	11			

R^2 :0,9999

Adj. R^2 :0,9939

Yapılan varyans analizi sonuçları, modelin toplam varyansın %99,99'unu açıkladığını ($R^2 = 0,9999$) ve düzeltilmiş R^2 değerinin 0,9939 olduğunu göstermektedir. Bağımsız değişkenler arasında tane boyutu (X_1), bias hızı (X_2) ve köpürtücü miktarının (X_3) model üzerindeki etkileri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$).

Gerçekleştirilen çalışmalar tane boyutu, bias hızı ve köpürtücü miktarının oluşturduğu etkileşimlerin flotasyon verimi üzerinde meydana getirdiği etkileri Şekil 4.15'de detaylı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 4.15.Jameson flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon verimine etkisi (SPSS)

Tane boyutu- bias hızı etkileşiminde; tane boyutu arttıkça flotasyon verimi azalma eğilimi göstermektedir. En düşük tane boyutu olan 38 μm flotasyon verimi yaklaşık %93,5 seviyesinde iken en iri tane boyutu 106 μm’de ise verim yaklaşık %90,0 düzeyine düşmektedir. Bias hızı açısından bakıldığında, 0,75 cm/s değerinde en yüksek verim elde edilirken 0,30 cm/s civarındaki düşük bias hızlarında verim belirgin şekilde azalmaktadır.

Köpürtücü miktarı-bias hızı etkileşiminde; bias hızı açısından bakıldığında, 0,75 cm/s bias hızında verim en yüksek iken, 0,3 cm/s bias hızında verim %90’ın altına gerilemektedir. Köpürtücü miktarı 10 ppm’e çıkarıldığında verim az da olsa düşmekte, 15 ppm’de ise bu düşüş belirginleşmektedir.

Tane boyutu- köpürtücü miktarı etkileşiminde; en yüksek verim, 38 μm tane boyutunda yaklaşık %93,5 olarak elde edilmişken 106 μm tane boyutunda ise yaklaşık

%90'a düşmektedir. Köpürtücü miktarında ise 5 ppm'den 15 ppm'e çıkarıldığında verimde artış görülmektedir.

Üç etkileşim bir arada değerlendirildiğinde, flotasyon veriminin hem tane boyutu hem bias hızı hem de köpürtücü miktarından önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir. Tane boyutunun artışı genel olarak verimde azalmaya neden olurken, bias hızının artışı verimi artırıcı yönde etkide bulunmaktadır. Aynı şekilde köpürtücü miktarındaki artış da flotasyon verimi üzerinde artan bir etki göstermektedir.

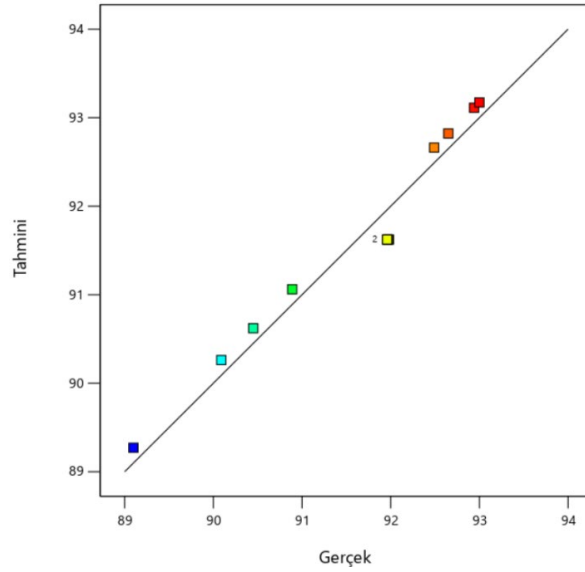
Jameson flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle Design Expert-13'de oluşturulan istatistiksel modelin ANOVA sonuçları Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Jameson flotasyon deneylerinden elde edilen flotasyon verimine ait varyans analizi sonuçları (DE-13)

FAKTÖR	KARELER TOPLAMI	SERBESTLİK DERECESESİ	ORTALAMA KARE	F	p	
Model	15,83	7	2,26	12,720	0,0135	significant
X ₁ -Tane Boyutu	0,7021	1	0,7021	3,950	0,1178	
X ₂ -Bias	13,91	1	13,91	78,270	0,0009	
X ₃ -Köpürtücü Miktarı	0,2211	1	0,2211	1,240	0,3272	
X ₁ X ₂	0,4656	1	0,4656	2,620	0,1809	
X ₁ X ₃	0,0078	1	0,0078	0,044	0,8442	
X ₂ X ₃	0,2926	1	0,2926	1,650	0,2688	
X ₁ X ₂ X ₃	0,2278	1	0,2278	1,280	0,3209	
Hata	0,7110	4	0,1777			
Toplam	16,54	11				
R²	:0,9570					
Adj. R²	:0,8818					

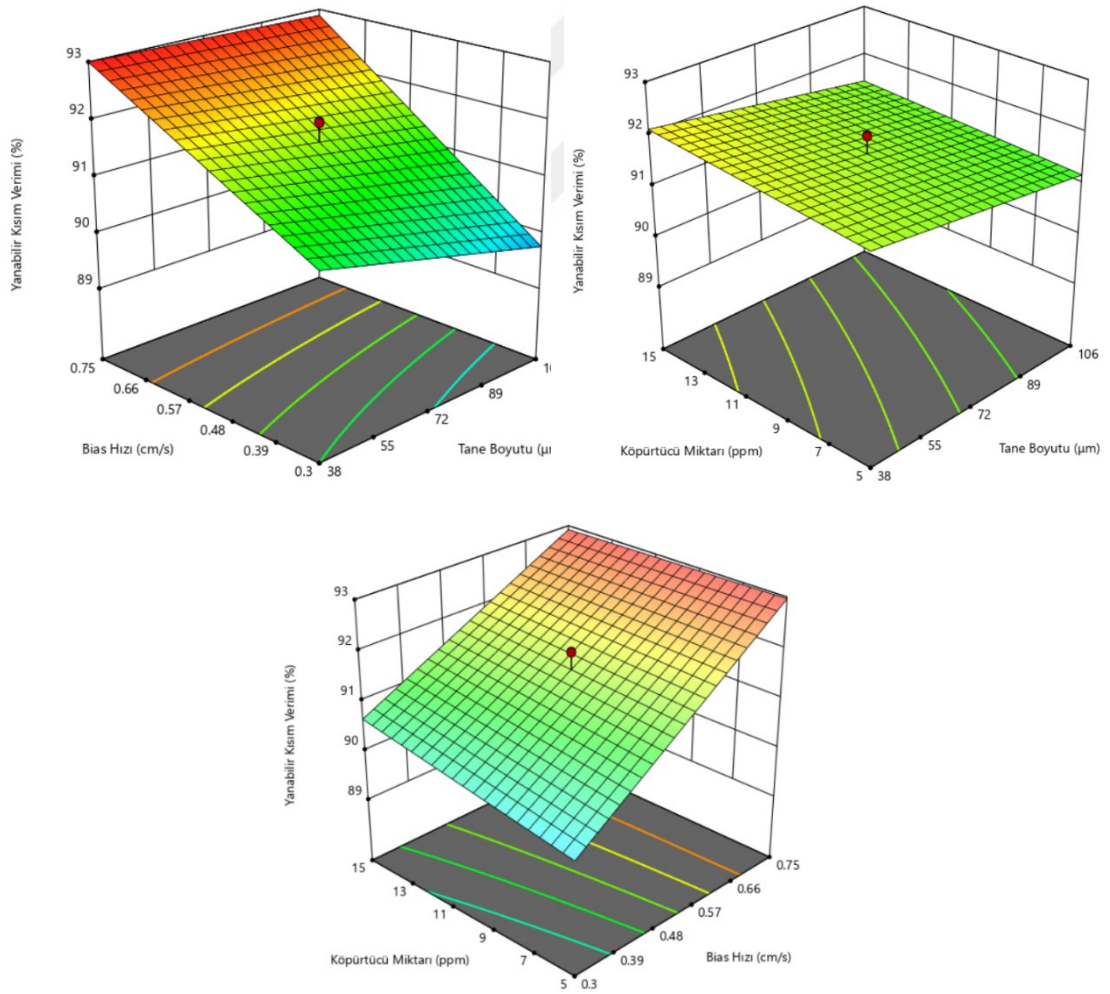
Yapılan ANOVA sonuçları. modelin toplam varyansın %95,7'ini açıkladığını ($R^2 = 0,9570$) göstermektedir. Ana parametreler arasında bias hızının (X_2) model üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p=0,0009$). Tane boyutunun (X_1) ve köpürtücü miktarının (X_3) etkisi model üzerindeki etkisi ise anlamlı bulunmamıştır.

Şekil 4.16'da Jameson flotasyon hücresi deneylerinden elde edilen gerçek değerler ve tahmini değerlerin karşılaştırılması verilmiştir. Noktaların 45 derecelik çizgiye yakın dağılımı modelin verilere uyum sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.16. Gerçek değerler ile tahmini değerlerin karşılaştırılması (Jameson hücresi)

Jameson flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen yanıt yüzey grafikleri aşağıda Şekil 4.17’de sunulmuştur.



Şekil 4.17. Jameson flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon verimine etkisi (DE-13)

Tane boyutu-bias hızı etkileşiminde; bias hızı arttıkça verimin yükseldiği açıkça görülmektedir. Bias hızı 0,30 cm/s seviyesinde verim yaklaşık %89–90 civarındayken, 0,75 cm/s seviyesinde verim %92,8–93 seviyesine çıkmaktadır. Tane boyutu arttığında ise verimin düştüğü yani 38 µm boyutunda verim değerinin %92,5–93 seviyesindeyken, 106 µm boyutunda verimin %89–90 seviyelerine gerilediği görülmektedir.

Tane boyutu-köpürtücü miktarı etkileşiminde; köpürtücü miktarı arttıkça verimde hafif bir azalma eğilimi gözlenmektedir. 5 ppm’de verim yaklaşık 92,2 % iken, 15 ppm seviyesinde verim 91,5 % civarına düşmektedir. Bu azalış sınırlı olmakla birlikte, eğilim tüm tane boyutu aralıklarında tutarlıdır. Tane boyutu da arttıkça verimin azaldığı net bir şekilde görülmektedir. Yaklaşık 38 µm’de verim 92–92,2% seviyesindeyken, 106 µm’de verim 89–89,5% seviyelerine gerilemektedir.

Köpürtücü miktarı-bias hızı etkileşiminde; köpürtücü miktarı arttıkça verimde hafif bir azalma gözlenmektedir. Örneğin, bias hızı sabitken köpürtücü miktarı 5 ppm civarında verim değeri 92,3% iken, 15 ppm seviyesinde bu değer 90,8–91 %’a düşmektedir. Bias hızı arttığında ise verimde belirgin bir artış eğilimi vardır. Köpürtücü miktarı sabitken bias hızı 0,30 cm/s seviyesinde verim yaklaşık 90–90,5% iken, biasın 0,75 cm/s seviyesinde verim yaklaşık 92,8–93 %’e yükselmektedir.

Üç boyutlu etkileşim analizleri flotasyon veriminin tane boyutu, bias hızı ve köpürtücü miktarından belirgin şekilde etkilendiğini göstermektedir. Bias hızı, verimi artırma yönünde en baskın pozitif etkiye sahiptir; hız arttıkça verim yükselmektedir. Tane boyutunun etkisi ise olumsuz olup, tane boyutu büyüdükçe verim düşmektedir. Köpürtücü miktarı ise verim üzerinde sınırlı fakat tutarlı bir negatif etki oluşturmakta, miktar arttıkça verim azalmaktadır.

Jameson flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle SPSS’de oluşturulan flotasyon verimi regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Verim (\%)} = 88,975 - 0,011 \cdot X_1 + 5,500 \cdot X_2 + 0,050 \cdot X_3$$

Jameson flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle DE-13’te oluşturulan flotasyon verimi regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Verim (\%)} = 90,676 - 0,0465931 \cdot X_1 + 2,11405 \cdot X_2 - 0,0310294 \cdot X_3 + 0,0756536 \cdot X_1 X_2 + 0,00213235 \cdot X_1 X_3 + 0,147647 \cdot X_2 X_3 - 0,00441176 \cdot X_1 X_2 X_3$$

X₁ (Tane Boyutu): Her iki modelde de tane boyutunun katsayısı negatiftir. SPSS modelinde $-0,011$, DE-13 modelinde ise $-0,0465931$ olarak hesaplanmıştır. Bu durum, tane boyutu arttıkça verimin azaldığını ifade etmektedir. Literatürde, flotasyon veriminin küçük tanelerde daha yüksek olduğu, bunun da küçük tanelerin daha geniş toplam yüzey alanına sahip olması ve kollektör ile daha etkin kaplanmasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Yoon ve Luttrell, 1989; Fuerstenau ve diğ., 2007). Ancak aşırı ince tanelerde ($<10 \mu m$) yüzey yükü ve hidrodinamik etkiler nedeniyle kabarcıklarla etkileşim zorlaşabilmektedir. Buradaki negatif katsayı, çalışma aralığında tane boyutunun büyümesiyle yüzey alanının azalması ve kabarcık yakalama olasılığının düşmesine bağlanabilir.

X₂ (Bias): Her iki modelde de bias hızı pozitif katsayıya sahiptir. SPSS modelinde bu değer $+5,500$ ile oldukça yüksek, DOE modelinde ise $+2,11405$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, bias hızı arttıkça verimin belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Literatürde, bias hızının köpük fazındaki mineral taşıma kapasitesini ve taze yüzey alanını artırarak flotasyon performansını iyileştirdiği vurgulanmaktadır (Gürsoy ve Öteyaka, 2015). Ayrıca, uygun seviyede bias hızı, mineral kabarcık bağlarının korunmasına ve daha verimli bir ayırım sürecine olanak tanır. Ancak çok yüksek bias hızlarının köpük stabilitesini bozabileceği de belirtilmektedir (Farrokhpay ve Bradshaw, 2012).

X₃ (Köpürtücü Miktarı): SPSS modelinde köpürtücü miktarı pozitif katsayıya ($+0,050$) sahipken, DE-13 modelinde negatif katsayı ($-0,0310294$) ile ifade edilmiştir. Bu farklılık, modelleme yöntemlerinden ve etkileşim terimlerinden kaynaklanabilir. Köpürtücü miktarı, kabarcık boyutunu küçülterek kabarcık–mineral çarpışma yüzey alanını artırabilir ve özellikle düşük seviyelerde flotasyon verimini iyileştirebilir. Ancak literatürde, köpürtücü miktarının aşırı artırılmasının köpük fazında aşırı stabiliteye, mineral boşaltımında zorluklara ve verim kaybına neden olabileceği belirtilmektedir (Drzymala, 2007; Finch ve Dobby, 1990). DE-13 modelindeki negatif katsayı, çalışma aralığında köpürtücü miktarındaki artışın bu olumsuz etkilerin baskın hale gelmesine bağlanabilir.

4.3.2.2. Flotasyon kolonu flotasyon verimi analizleri

Flotasyon kolonunda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle SPSS’de oluşturulan istatistiksel modelin ANOVA sonuçları Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Kolon flotasyonu deneylerinden elde edilen flotasyon verimine ait varyans analizi sonuçları (SPSS)

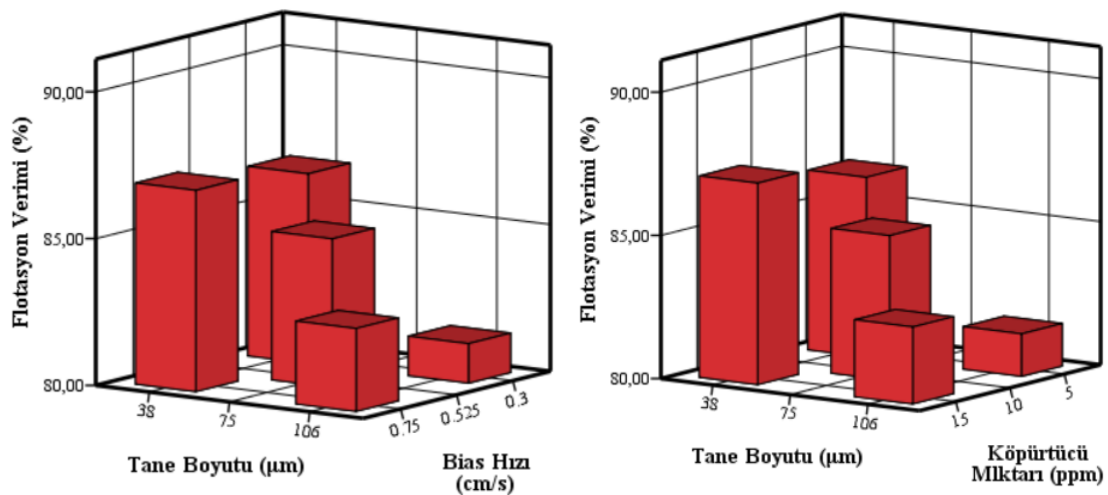
Faktör	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F	p
Model	47,424	8	47,424	55,523	0,004
X ₁ -Tane Boyutu	41,770	1	41,770	391,225	0,000
X ₂ -Bias Hızı	1,767	1	1,767	16,552	0,027
X ₃ -Köpürtücü Miktarı	1,921	1	1,921	17,991	0,024
X ₁ *X ₂	0,583	1	0,583	5,462	0,101
X ₁ *X ₃	0,097	1	0,097	0,907	0,411
X ₂ *X ₃	0,001	1	0,001	0,007	0,936
X ₁ *X ₂ *X ₃	0,0034	1	0,0034	0,317	0,613
Hata	0,320	3	0,107		
Toplam	47,744	11			

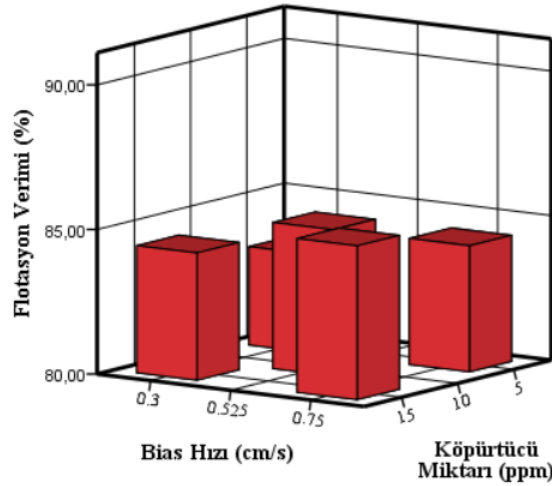
R² :0,9930

Adj. R² :0,9750

ANOVA sonuçları. modelin toplam varyansın %99,30'unu açıkladığını (R²=0.9930) ve düzeltilmiş R² değerinin 0,9750 olduğunu göstermektedir. Bağımsız değişkenler arasında tane boyutu (X₁), bias hızı (X₂) ve köpürtücü miktarının (X₃) model üzerindeki etkileri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (p < 0,05).

Gerçekleştirilen çalışmalar tane boyutu, bias hızı ve köpürtücü miktarının oluşturduğu etkileşimlerin flotasyon verimi üzerinde meydana getirdiği etkileri Şekil 4.18'da detaylı bir şekilde incelenmiştir.





Şekil 4.18. Kolon flotasyonu deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon verimine etkisi (SPSS)

Tane boyutu-bias hızı etkileşiminde; tane boyutu arttıkça flotasyon veriminde belirgin bir azalma eğilimi gözlemlenmektedir. En düşük tane boyutu olan 38 μm 'de flotasyon verimi yaklaşık %88 seviyesindeyken, en iri tane boyutu olan 106 μm 'de bu değer yaklaşık %65'e kadar düşmektedir. Bias hızı açısından değerlendirildiğinde ise, en yüksek verim yaklaşık %88 ile 0,75 cm/s hızında elde edilmiştir. Bias hızının değerinin 0,3 cm/s olduğunda ise en düşük verim olan yaklaşık %65 değerine ulaşılmaktadır. Bias hızı azaldıkça flotasyon verimi de düşüş göstermektedir.

Tane boyutu-köpürtücü miktarı etkileşiminde; artan tane boyutuyla birlikte flotasyon verimi azalma eğilimi göstermektedir. En düşük tane boyutu olan 38 μm 'de flotasyon verimi yaklaşık %88 düzeyindeyken, en iri tane boyutu olan 106 μm 'de bu değer yaklaşık %65'e kadar düşmektedir. En yüksek flotasyon verimi yaklaşık %88 ile 15 ppm köpürtücü miktarında elde edilmiştir. 5 ppm'de ise flotasyon verimi %65 düzeyine kadar gerilemektedir. Köpürtücü miktarı azaldıkça verimde düşüş gözlenmektedir.

Bias hızı-köpürtücü miktarı etkileşiminde; flotasyon verimi genel olarak sınırlı bir değişim göstermekte ancak bazı eğilimler gözlemlenebilmektedir. En yüksek flotasyon verimi yaklaşık %86 ile 0,75 cm/s bias hızı ve 15 ppm köpürtücü miktarında elde edilmiştir. Bias hızı 0,3 cm/s'ye düştüğünde ise flotasyon verimi yaklaşık %83 seviyesine gerilemektedir. Köpürtücü miktarı 15 ppm seviyesinde nispeten yüksek verim elde edilirken, 5 ppm seviyesinde verim biraz daha düşerek yaklaşık %83 civarına inmektedir.

Tane boyutu, bias hızı ve köpürtücü miktarı parametrelerinin etkileşimi genel olarak flotasyon verimi üzerinde belirgin etki etmektedir. Tane boyutu arttıkça flotasyon verimi genel olarak azalma eğilimi göstermekte; daha ince taneler iri tanelere kıyasla daha yüksek verim sağlamaktadır. Bias hızı da flotasyon verimini doğrudan etkilemekte olup, yüksek bias hızlarında daha yüksek verim elde edildiği görülmektedir. Benzer şekilde yüksek seviyelerde köpürtücü kullanımı verimi artırırken, düşük miktarlarda belirgin bir azalma yaşanmaktadır.

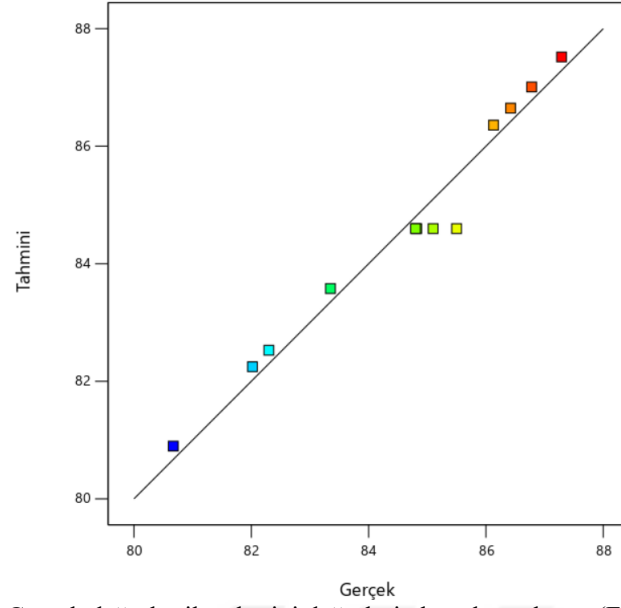
Flotasyon kolonunda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle DE-13'te oluşturulan istatistiksel modelin ANOVA sonuçları Çizelge 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.13. Kolon flotasyonu deneylerinden elde edilen flotasyon verimine ait varyans analizi sonuçları (DE-13)

FAKTÖR	KARELER TOPLAMI	SERBESTLİK DERECEŚİ	ORTALAMA KARE	F	p	
Model	46,17	7	6,60	16,790	0,0081	significant
X ₁ -Tane Boyutu	41,77	1	41,77	106,310	0,0005	
X ₂ -Bias Hızı	1,77	1	1,77	4,500	0,1012	
X ₃ -Köpürtücü Miktarı	1,92	1	1,92	4,890	0,0915	
X ₁ *X ₂	0,5832	1	0,5832	1,480	0,2900	
X ₁ *X ₃	0,0968	1	0,0968	0,246	0,6457	
X ₂ *X ₃	0,0008	1	0,0008	0,002	0,9662	
X ₁ *X ₂ *X ₃	0,0338	1	0,0338	0,086	0,7839	
Hata	1,57	4	0,3929			
Toplam	47,74	11				
R²	:0,9671					
Adj. R²	:0,9095					

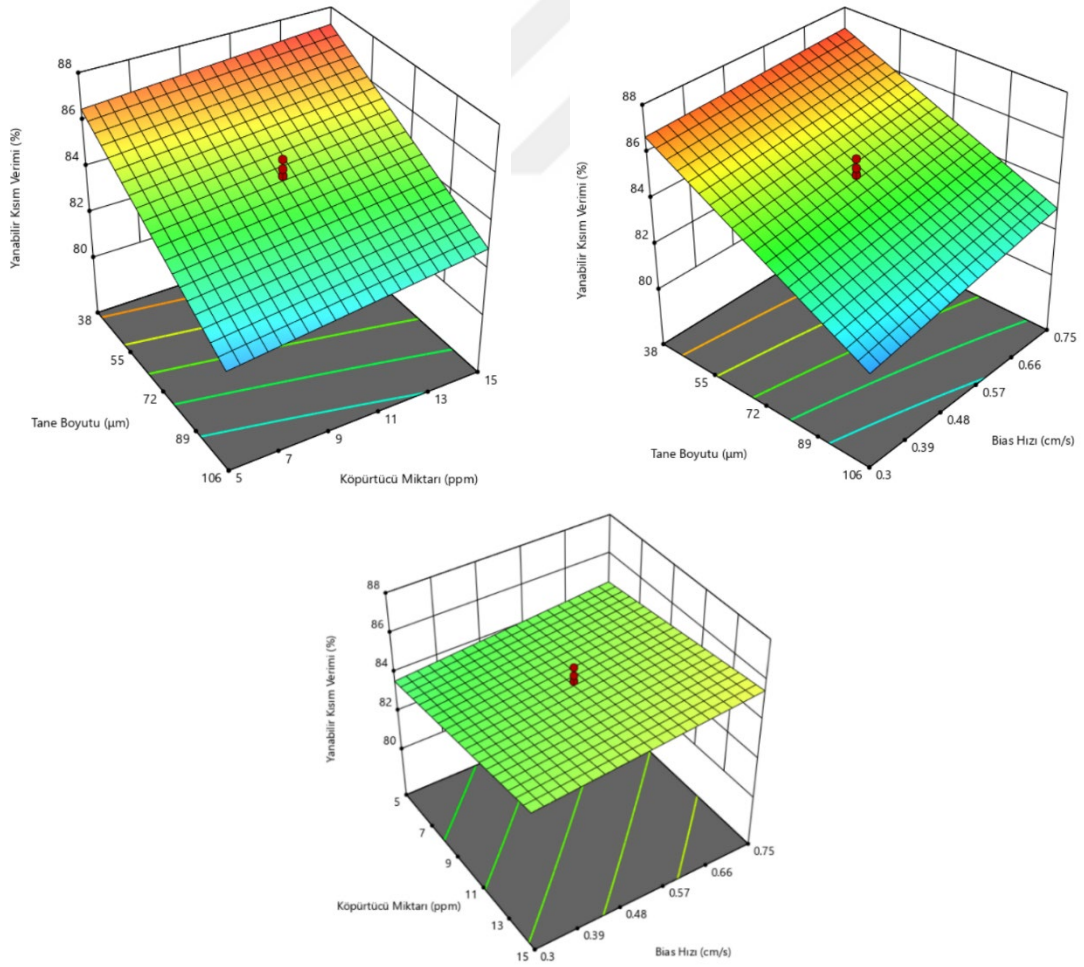
ANOVA sonuçları, modelin toplam varyansın %96,71'ini açıkladığını ($R^2=0,9671$) göstermektedir. Ana parametreler arasında tane boyutunun (X_1) model üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p=0,0005$). Bias hızı (X_2) ve köpürtücü miktarının (X_3) etkisi model üzerindeki etkisi ise anlamlı bulunmamıştır.

Şekil 4.19'da flotasyon kolonu deneylerinden elde edilen gerçek değerler ve tahmini değerlerin karşılaştırılması verilmiştir. Noktaların 45 derecelik çizgiye yakın dağılımı modelin verilere uyum sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.19. Gerçek değerler ile tahmini değerlerin karşılaştırılması (Flotasyon kolonu)

Kolon flotasyonunda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen yanıt yüzey grafikleri aşağıda Şekil 4.20’de sunulmuştur.



Şekil 4.20. Flotasyon kolunu deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon verimine etkisi (DE-13)

Tane boyutu-köpürtücü miktarı etkileşiminde; ana parametrelerin her ikisi de arttıkça flotasyon veriminde belirgin bir düşüş görülmektedir. En yüksek verim küçük taneler (38 µm) ve düşük köpürtücü miktarı (5 ppm) ile elde edilirken, en düşük verim büyük taneler (106 µm) ve yüksek köpürtücü miktarı (15 ppm) ile gözlemlenmektedir.

Tane boyutu-bias hızı etkileşiminde; parametrelerin her ikisi de arttıkça flotasyon veriminde belirgin bir azalma eğilimi gözlemlenmektedir. Küçük tane boyutlarında verim daha yüksek seviyelerdeyken, tane boyutu büyüdükçe verimde kademeli bir düşüş meydana gelmektedir. Benzer şekilde, bias hızı düşük seviyelerdeyken daha yüksek verim elde edilirken, bias hızı arttıkça verim azalmaktadır. Özellikle 38 mikron civarındaki ince taneler ile 0,3 cm/s gibi düşük bias hızlarında verim yaklaşık %86 seviyelerine ulaşırken, 106 mikron gibi iri taneler ve 0,75 cm/s'ye yakın bias hızlarında bu değer %80'in altına inmektedir.

Bias hızı-köpürtücü miktarı etkileşiminde; her iki parametrenin de flotasyon verimi üzerindeki etkisi oldukça sınırlı ve sabit bir görünüm sergilemektedir. Bias hızı 0,3 cm/s'den 0,75 cm/s'ye çıkarken ve köpürtücü miktarı 5 ppm'den 15 ppm'ye arttığında flotasyon verimi çok az düşüş göstererek yaklaşık %83 civarında seyretmektedir. Bu durum bu iki parametrenin bu aralıkta verim üzerinde çok güçlü bir etkisi olmadığını göstermektedir.

Tane boyutunun artması flotasyon verimini olumsuz etkileyerek verimde belirgin bir azalma yaratmaktadır. İnce taneler yüksek verim sağlarken, iri tanelerde verim düşmektedir. Benzer şekilde, bias hızının artışı da flotasyon verimini azaltan önemli bir faktördür. Düşük bias hızları daha yüksek verim elde edilmesini sağlar. Öte yandan, köpürtücü miktarının değişimi flotasyon verimi üzerinde nispeten daha sınırlı bir etkiye sahiptir ve bu parametredeki artış ya da azalış verimde kayda değer farklılıklar yaratmamaktadır. Bu durum, verim üzerinde en belirleyici etkilerin tane boyutu ve bias hızı kaynaklı olduğunu, köpürtücü miktarının ise verim üzerindeki etkisinin nispeten daha az olduğunu göstermektedir.

Flotasyon kolonunda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle SPSS'de oluşturulan flotasyon verimi regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Verim (\%)} = 87,372 - 0,066 * X_1 + 2,089 * X_2 + 0,098 * X_3$$

Flotasyon kolonunda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle DE-13'te oluşturulan flotasyon verimi regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Verim (\%)} = 89,7562 - 0,101127 * X_1 - 1,58693 * X_2 - 0,00815686 * X_3 + 0,0522876 * X_1 X_2 + 0,00153922 * X_1 X_3 + 0,113464 * X_2 X_3 - 0,00169935 * X_1 X_2 X_3$$

X₁ (Tane Boyutu): Tane boyutunun katsayısı her iki modelde de negatiftir, yani tane boyutu arttıkça flotasyon verimi düşmektedir. Bu durum, literatürde de sıkça desteklenmektedir. İnce taneler, yüzey alanı bakımından daha avantajlıdır ve kabarcıklarla birleşme olasılıkları daha yüksektir, bu da yüksek flotasyon verimi sağlar (Wills & Finch, 2015). Büyük tanelerde ise yüzey alanı azalır ve kabarcık ile etkileşim zorlaşır, dolayısıyla verim düşer (Norori-McCormac ve diğ., 2017). Bu nedenle, tane boyutunun kontrolü flotasyon verimini artırmak için kritik bir parametredir.

X₂ (Bias): Bias hızının etkisi regresyon denklemlerinde farklı sonuçlar göstermektedir; SPSS modelinde pozitif bir katsayı ile bias hızının verimi artırdığı görülürken DE-13 modelinde negatif bir etki yaptığı görülmektedir. Genel literatür incelemesinde bias hızının optimal bir aralıkta olması gerektiği vurgulanır (Shi ve diğ., 2024). Bu nedenle bias hızının deney koşullarına göre dikkatle ayarlanması önem taşımaktadır.

X₃ (Köpürtücü Miktarı): Köpürtücü miktarının regresyon denklemlerinde katsayıları küçük olmakla birlikte SPSS’de pozitif etki gösterirken DE13’te negatif etki göstermektedir. Literatürde köpürtücünün flotasyon verimini artırmada önemli rol oynadığı ancak aşırı kullanımının yüzey gerilimini olumsuz etkileyerek verimi düşürebileceği belirtilmiştir (Li ve diğ., 2013) ancak Fuerstenau ve diğ., (2007) yaptıkları çalışmada köpürtücü miktarının uygun seviyelerde artırılmasının flotasyon verimini olumlu etkilediği, köpürtücü moleküllerinin mineral yüzeylerini kaplayarak hidrofobik hale getirdiği ve böylece kabarcıklarla birleşme verimini artırdığını söylemişlerdir.

4.3.2.3. Denver flotasyon hücresi flotasyon verimi analizleri

Denver flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle SPSS’de oluşturulan istatistiksel modelin ANOVA sonuçları Çizelge 4.14’de verilmiştir.

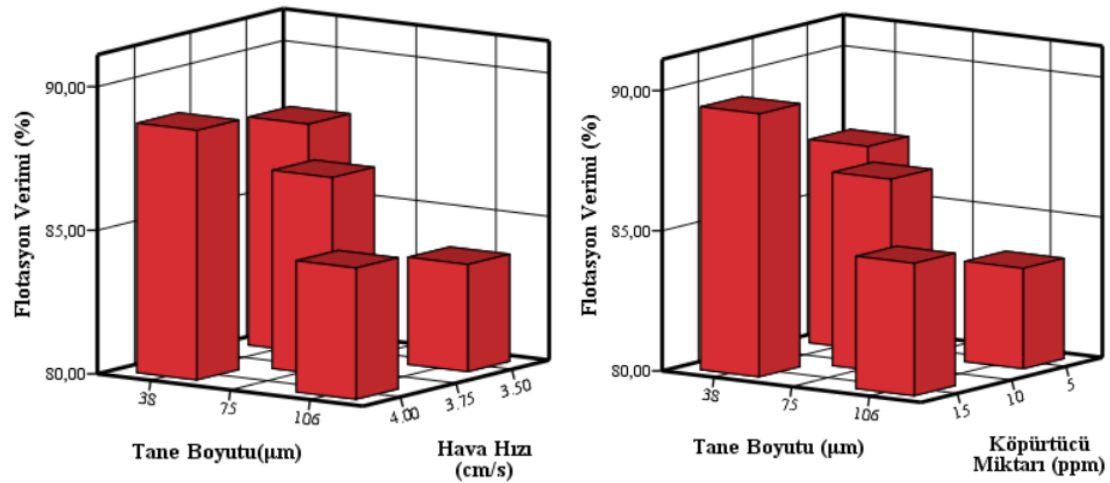
Çizelge 4.14. Denver flotasyon deneylerinden elde edilen flotasyon verimine ait varyans analizi sonuçları (SPSS)

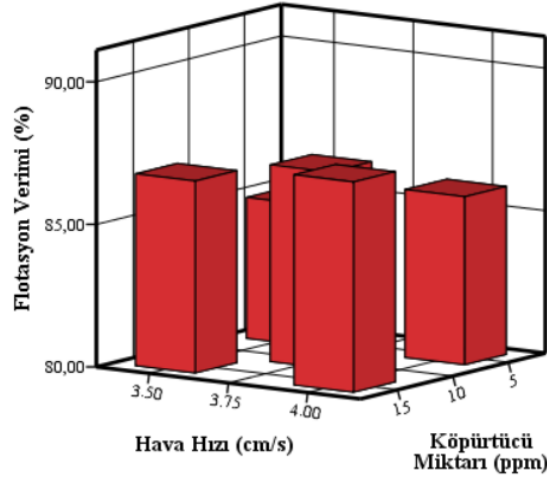
Faktör	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F	p	
Model	43,246	8	5,406	74,804	0,002	significant
X ₁ -Tane Boyutu	34,694	1	34,694	480,089	0,000	
X ₂ -Hava Hızı	1,264	1	1,264	17,491	0,025	
X ₃ -Köpürtücü Miktarı	5,346	1	5,346	73,982	0,003	
X ₁ *X ₂	0,004	1	0,004	0,056	0,828	
X ₁ *X ₃	0,490	1	0,490	6,781	0,080	
X ₂ *X ₃	0,048	1	0,048	0,665	0,475	
X ₁ *X ₂ *X ₃	0,211	1	0,211	2,923	0,186	
Hata	0,217	3	0,072			
Toplam	43,463	11				

$$R^2 = 0,9950$$

$$\text{Adj. } R^2 = 0,9820$$

ANOVA sonuçları, modelin toplam varyansın %99,5'sini açıkladığını ($R^2=0,9950$) ve düzeltilmiş R^2 değerinin 0,9820 olduğunu göstermektedir. Bağımsız değişkenler arasında tane boyutu (X_1), bias hızı (X_2) ve köpürtücü miktarının (X_3) model üzerindeki etkileri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Denver flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen ana parametrelerin ikili etkileşimlerinin grafikleri aşağıda Şekil 4.21'de sunulmuştur.





Şekil 4.21. Denver flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon verimine etkisi (SPSS)

Tane boyutu-bias hızı etkileşiminde; tane boyutu arttıkça flotasyon veriminde belirgin bir azalma eğilimi gözlemlenmektedir. En düşük tane boyutu olan 38 μm 'de flotasyon verimi yaklaşık %88 seviyesindeyken, en iri tane boyutu olan 106 μm 'de bu değer yaklaşık %80 düzeyine düşmektedir. Hava hızı açısından değerlendirildiğinde ise, en yüksek verim yaklaşık %88 ile 4 cm/s hava hızında elde edilmiştir. Hava hızı 3,5 cm/s seviyesine düştüğünde ise flotasyon verimi yaklaşık %82 civarına gerilemektedir.

Tane boyutu-köpürtücü miktarı etkileşiminde; artan tane boyutuyla birlikte flotasyon veriminde düşüş eğilimi dikkat çekmektedir. En düşük tane boyutu olan 38 μm 'de verim yaklaşık %90 seviyesinde gerçekleşirken, en iri taneler olan 106 μm 'de bu oran %82 civarına kadar düşmektedir. Köpürtücü miktarında ise, 15 ppm seviyesinde en yüksek flotasyon verimi elde edilmiş, 5 ppm seviyesinde ise verim %82'nin altına gerilemiştir. Bu durum hem daha küçük tane boyutlarının hem de daha yüksek köpürtücü miktarının flotasyon verimini olumlu etkilediğini göstermektedir.

Hava hızı-köpürtücü miktarı etkileşiminde; flotasyon veriminde genel olarak yüksek seviyelerde seyreden ancak sınırlı değişiklikler gösteren bir eğilim gözlemlenmektedir. Hava hızı 4 cm/s ve köpürtücü miktarı 15 ppm seviyelerinde flotasyon verimi yaklaşık %88 civarında en yüksek değerine ulaşırken, 3,5 cm/s hava hızı ve 5 ppm köpürtücü miktarı ile verim %84 seviyelerine düşmektedir.

Flotasyon verimi üzerinde etkili olan ana parametreler birlikte değerlendirildiğinde; küçük taneler, yüzey alanlarının yüksek olması sayesinde kabarcıklarla daha etkin temas kurarak verimi artırmaktadır. Buna karşılık iri taneler, bu

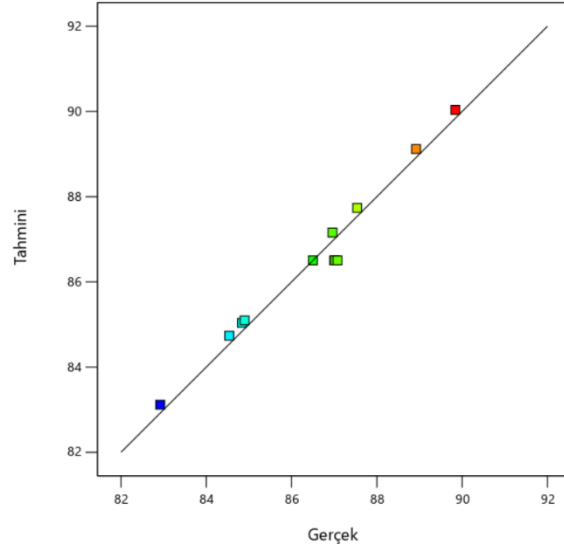
etkileşimde yetersiz kalmakta ve flotasyon performansını olumsuz etkilemektedir. Köpürtücü miktarındaki artış da genellikle verim üzerinde olumlu bir etki yaratmaktadır. Hava hızı açısından bakıldığında, yeterli seviyelerde sağlanan hava akışı, kabarcık oluşumunu ve minerallerin taşınmasını destekleyerek verimi iyileştirmektedir. Ancak bu parametrenin etkisi, tane boyutu ve köpürtücü miktarına kıyasla daha sınırlı düzeyde kalmaktadır.

Denver flotasyon hücresinde yapılan deneylerden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.15. Denver flotasyon deneylerinden elde edilen hız sabitine ait varyans analizi sonuçları (DE-13)

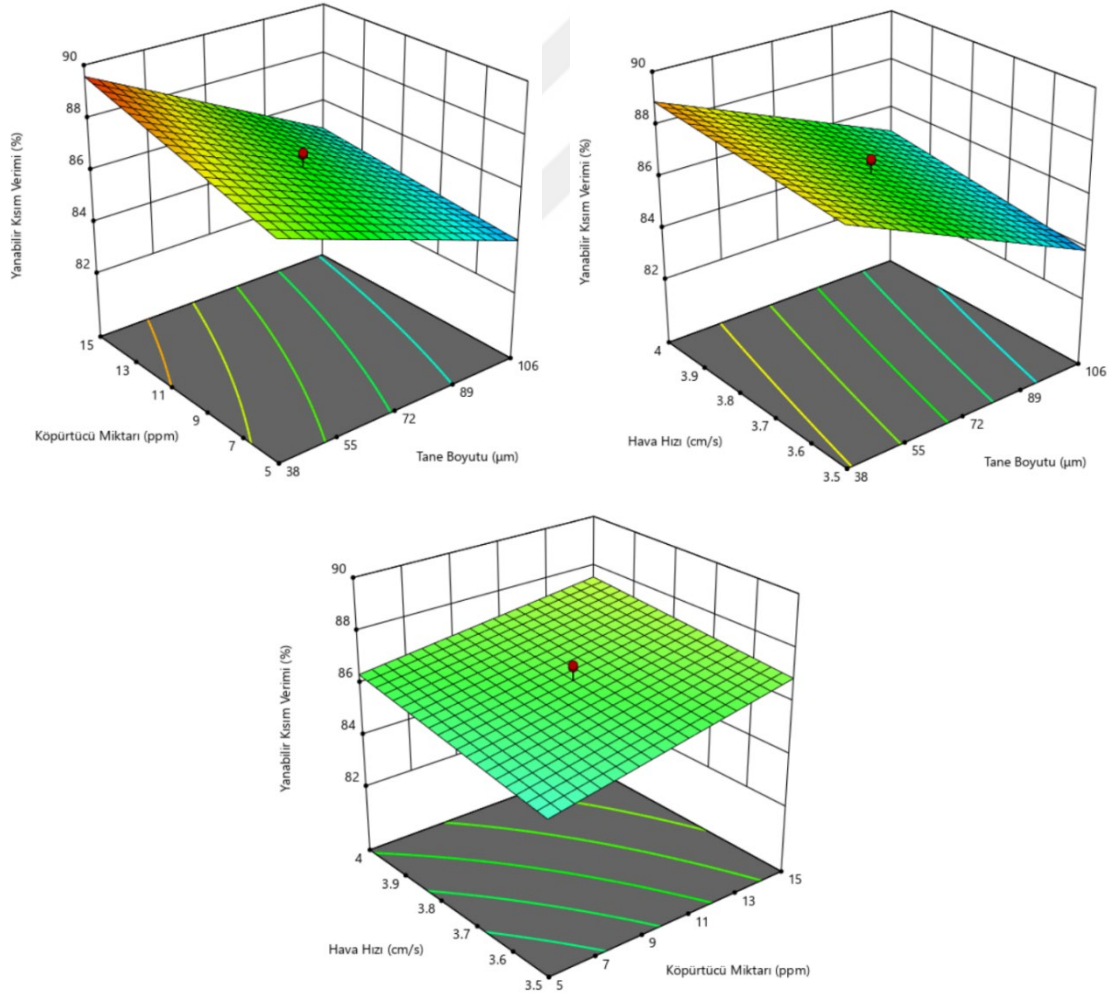
FAKTÖR	KARELER TOPLAMI	SERBESTLİK DERECEŚİ	ORTALAMA KARE	F	p	
Model	39,98	7	5,71	19,820	0,0059	significant
X ₁ -Tane boyutu	32,24	1	32,24	111,850	0,0005	
X ₂ - Hava hızı	1,79	1	1,79	6,200	0,0675	
X ₃ -Köpürtücü Miktarı	4,41	1	4,41	15,300	0,0174	
X ₁ *X ₂	0,0761	1	0,0761	0,264	0,6346	
X ₁ *X ₃	0,8320	1	0,8320	2,890	0,1645	
X ₂ *X ₃	0,1860	1	0,1860	0,646	0,4668	
X ₁ *X ₂ *X ₃	0,4513	1	0,4513	1,570	0,2790	
Hata	1,15	4	0,2882			
Toplam	41,1353	11				
R²	:0,9720					
Adj. R²	:0,9229					

Denver flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deney sonuçlarından elde edilen gerçek ve tahmini flotasyon verimi grafiğı modelin doğruluğunu ve tahmin gücünü görsel olarak ortaya koymaktadır. Noktaların 45 derecelik çizgiye yakın dağılımı modelin verilere uyum sağladığını ($R^2 = 0,9720$) ve denver flotasyon hücresi dinamiklerini doğru bir şekilde yakaladığını gösterir. Gerçek değerler ile tahmini değerlerin karşılaştırılmasına ait sonuçlar Şekil 4.22.’de verilmiştir.



Şekil 4.22. Gerçek ve tahmini değerlerin karşılaştırılması (Denver hücresi)

Denver flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen yanıt yüzey grafikleri aşağıda Şekil 4.23’de sunulmuştur.



Şekil 4.23. Denver flotasyon hücresi deneylerine ait ana parametrelerin etkileşiminin flotasyon verimine etkisi (DE-13)

Tane boyutu-köpürtücü miktarı etkileşiminde; en düşük tane boyutu olan 38 µm ve en düşük köpürtücü miktarı olan 5 ppm seviyesinde, verim yaklaşık %89-90 düzeyine ulaşmaktadır. Tane boyutu 106 µm seviyesine çıktığında ve köpürtücü miktarı 15 ppm olduğunda ise verim %84'ün altına düşmektedir. Hem daha ince taneler hem de daha düşük köpürtücü seviyelerinin flotasyon verimini olumlu etkilemekte buna karşılık iri taneler ve yüksek köpürtücü miktarlarının verim üzerinde olumsuz etkiler yarattığını net biçimde göstermektedir.

Tane boyutu-hava hızı etkileşiminde; parametrelerin her ikisi de arttıkça yanabilir kısım veriminde belirgin bir azalma eğilimi gözlemlenmektedir. Küçük tane boyutlarında (örneğin 38 µm) ve düşük hava hızlarında (3,5 cm/s), yanabilir kısım verimi yaklaşık %89 seviyelerine ulaşmaktadır. Tane boyutu 106 µm seviyesine yükseldiğinde ve hava hızı da 4 cm/s yükseldiğinde, verim %84'ün altına inmektedir.

Hava hızı-köpürtücü miktarı etkileşiminde; düşük hava hızı (yaklaşık 3,5 cm/s) ve düşük köpürtücü miktarı (5 ppm) seviyelerinde, yanabilir kısım verimi yaklaşık %86 düzeyine kadar çıkmaktadır. Buna karşılık, hava hızı 4 cm/s ve köpürtücü miktarı 15 ppm seviyelerine ulaştığında verim %84'e doğru düşüş göstermektedir.

Üçlü etkileşimler bir arada değerlendirildiğinde, tane boyutu, hava hızı ve köpürtücü miktarının yanabilir kısım verimi üzerinde önemli etkileri olduğu görülmektedir. Genel eğilim, bu üç parametrenin artışıyla birlikte verimin azaldığını göstermektedir. Daha küçük tane boyutları, daha düşük hava hızları ve düşük köpürtücü miktarları, yanabilir kısım verimini artıran koşulları oluşturmaktadır.

Denver flotasyon hücresinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle SPSS'de oluşturulan flotasyon veriminin regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Verim (\%)} = 87,275 - 0,061 * X_1 + 1,590 * X_2 + 0,164 * X_3$$

Flotasyon kolonunda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerle DE'de oluşturulan flotasyon veriminin regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\text{Verim (\%)} = 94,4281 - 0,292647 * X_1 - 1,73941 * X_2 - 0,766235 * X_3 + 0,0673529 * X_1 X_2 + (0,0190588 * X_1 X_3 + 0,280353 * X_2 X_3 - 0,00558824 * X_1 X_2 X_3$$

X₁ (Tane Boyutu): SPSS'de ve DE-13'te elde edilen denklemlerde X₁'in katsayısı negatif yani tane boyutu arttıkça flotasyon verimi azalmaktadır. İnce taneler, yüzey alanı bakımından flotasyonda avantaj sağlasa da çok ince taneler suyla birlikte

taşınma eğiliminde olup verimi düşürebilir. Öte yandan iri tanelerde yüzey alanı azalır ve minerallerin köpükle etkileşim şansı sınırlamaktadır (Wills & Finch, 2015; Pawlik, 2022).

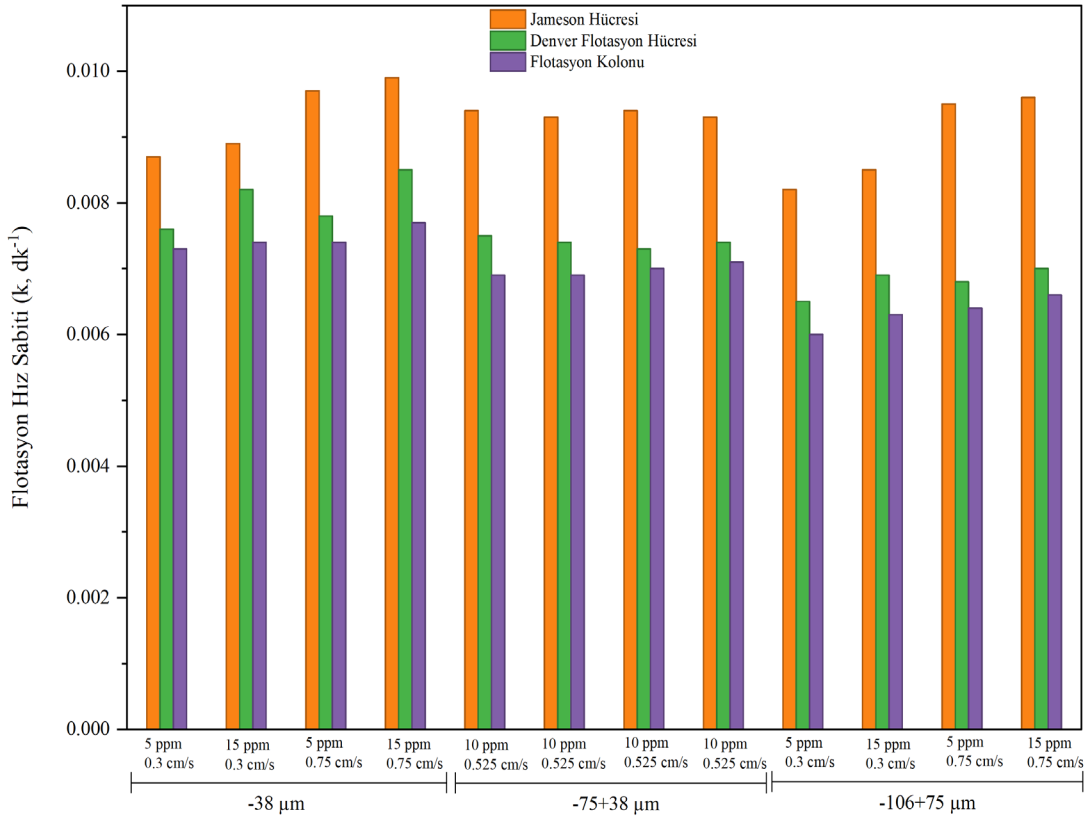
X₂ (Hava Hızı): SPSS’de oluşturulan modelde hava hızı artıkça flotasyon verimi artarken aksine DE-13’te azalış göstermektedir. Flotasyon hücresinde hava hızı, kabarcık oluşumu ve büyüklüğü üzerinde kritik rol oynar. Artan hava hızı, küçük ve daha fazla kabarcık oluşturarak minerallerin yüzeye taşınmasını kolaylaştırır. Ancak hava hızının çok yüksek olması durumunda köpük kararlılığının bozulduğu ve bu nedenle verimin azaldığı belirtilmiştir. Bu yüzden hava hızı, optimal seviyede ayarlanmalıdır (Fuerstenau ve diğ., 2007).

X₃ (Köpürtücü Miktarı): Köpük miktarı, flotasyon sürecinde minerallerin taşındığı ortamdır ve verim üzerinde belirleyici bir etkisi vardır. SPSS ile elde edilen regresyon modeline göre köpük miktarındaki artış flotasyon verimini artırırken tam tersi DE-13’te oluşturulan modelde ise köpürtücü miktarının artışı flotasyon veriminde azalmaya neden olmaktadır. Yeterli köpük miktarı, mineral tanelerinin etkin şekilde yüzeye taşınmasını sağlar. Ancak aşırı köpük miktarının, mineral kayıplarına neden olarak proses verimliliğini düşürdüğü vurgulanmıştır. Bu nedenle köpük hacminin kontrollü ve dengeli olması gerekmektedir (Rao, 2013; Wills & Finch, 2015).

4.4. Jameson Hücresi, Flotasyon Kolonu ve Denver Flotasyon Hücresinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada; Jameson hücresi, flotasyon kolonu ve Denver flotasyon hücresi kullanılarak elde edilen flotasyon hız sabiti (k) ve flotasyon verimi değerleri karşılaştırılmıştır.

Bu kapsamda. farklı tane boyutları için elde edilen flotasyon hız sabiti ve yanabilir verim değerleri karşılaştırmasına ait sonuçlar Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’de sunulmuştur.



Şekil 4.24. 3 farklı flotasyon cihazında yapılan deneylerin tane boyutuna bağlı olarak flotasyon hız sabitinin karşılaştırılması

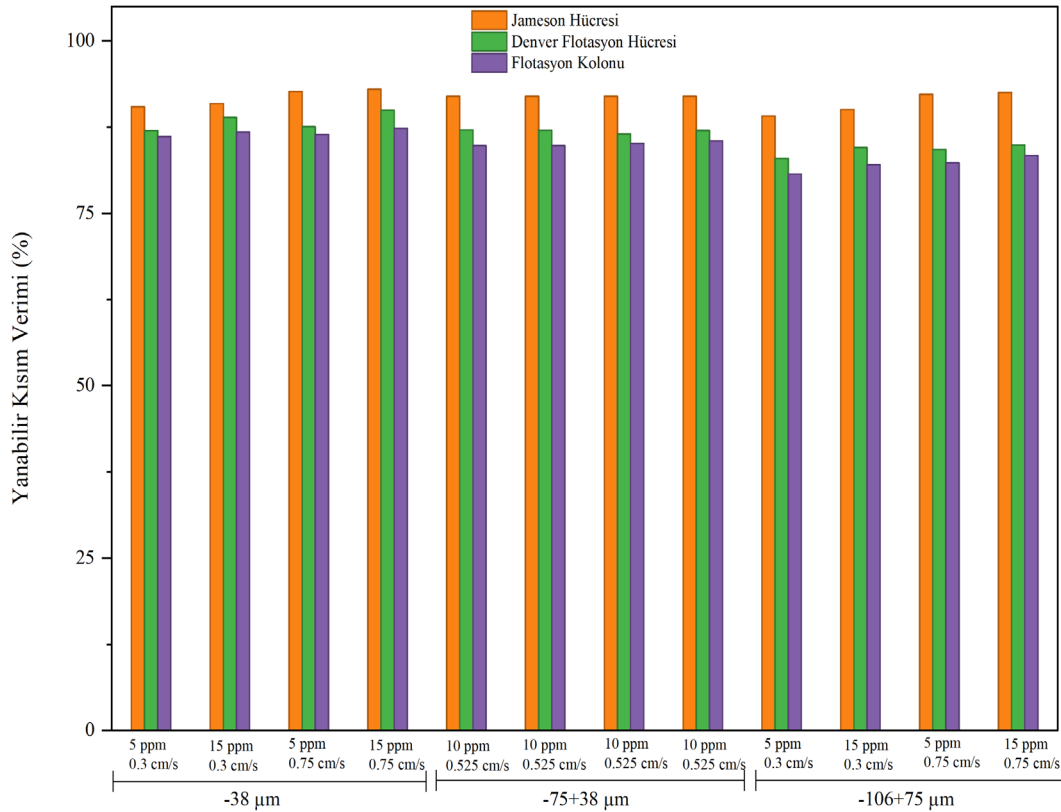
Şekil 4.24, farklı flotasyon hücre tiplerinin proses verimliliğini doğrudan etkileyen ekipman tasarımı ve çalışma parametrelerinin ne kadar önemli olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Grafik verilerine göre, Jameson hücresi tüm tane boyutu, köpürtücü miktarı ve bias hızı kombinasyonlarında en yüksek flotasyon hız sabitini sağlayarak en etkin performansı göstermektedir. Bu durum, Jameson hücresinin yüksek türbülanslı yapısı, ince kabarcık üretimi ve güçlü hava-mineral etkileşimi gibi avantajlarından kaynaklanmaktadır. Özellikle ince tanelerde ve yüksek köpürtücü miktarlarında Jameson hücresi, kısa sürede yüksek miktarda mineral kazanımı sağlamaktadır (Yianatos. 2007; Ata ve Ahmed, 1999).

Diğer yandan, Denver tipi mekanik flotasyon hücresi, Jameson hücresine kıyasla daha düşük fakat oldukça istikrarlı bir performans sergilemektedir. Bu hücre hem kabarcık üretimi hem de karıştırma işlemlerinin mekanik olarak sağlanması nedeniyle geniş bir işlem aralığında kullanılabilir ve proses değişikliklerine karşı daha toleranslıdır. Denver hücresi hem ince hem de iri tanelerde dengeli sonuçlar vermekte

ve proses kontrolü açısından avantaj sunmaktadır (Ahmed ve Jameson, 1985; Gorain ve diğ., 1999).

Flotasyon kolonu ise genellikle en düşük flotasyon hız sabiti değerlerini vermektedir. Bu, kolon hücrelerinin daha düşük türbülans seviyeleri ve daha uzun süreli kabarcık-mineral etkileşim süreçleriyle çalışmasından kaynaklanmaktadır (Finch ve Dobby, 1990). Her ne kadar kolon hücreleri verim açısından daha düşük gibi görünse de bu sistemler genellikle daha selektif (seçici) bir ayırma sağlar. Yani, istenmeyen gang minerallerinin flotasyonuna daha az eğilimli oldukları için daha temiz ve yüksek kaliteli konsantre elde edilmesine olanak tanır. Bu durum, özellikle ince taneli cevherlerde veya düşük tenörlü yatakların değerlendirilmesinde kolon hücrelerinin tercih edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.25. 3 farklı flotasyon cihazında yapılan deneylerin tane boyutuna bağlı olarak yanabilir verimin karşılaştırılması

Şekil 4.25, farklı flotasyon hücrelerinin flotasyon verimi üzerindeki etkilerini ortaya koyarak hücre tasarımının ve çalışma parametrelerinin ürün kazanımı üzerindeki rolünü gözler önüne sermektedir.

Jameson hücresi, önceki hız sabiti grafiğinde olduğu gibi, burada da çoğu koşulda en yüksek yanabilir kısım verimini sağlamaktadır. Özellikle ince taneli fraksiyonlarda ve yüksek köpürtücü miktarlarında Jameson hücresinin performansı belirgin şekilde öne çıkmaktadır.

Denver flotasyon hücresi ise Jameson'a kıyasla biraz daha düşük ancak oldukça tutarlı bir verim sergilemektedir. Denver hücresinin mekanik karıştırılmalı yapısı, kabarcık-mineral çarpışmalarını yeterli düzeyde sağlayarak hem ince hem de orta boyutlu tanelerin kazanımında dengeli sonuçlar üretmektedir.

Flotasyon kolonu, hız sabiti grafiğinde olduğu gibi burada da genellikle en düşük flotasyon verimini sağlamaktadır. Kolonun düşük türbülanslı yapısı ve daha uzun kabarcık tutma süreleri verim açısından dezavantaj oluşturabilmektedir. Ancak bu hücre tipi seçimlilik açısından avantaj sağlayarak daha temiz ürün eldesi mümkün olabilir. Fakat flotasyon verimi açısından değerlendirildiğinde, özellikle iri taneli fraksiyonlarda kolon hücresinin Jameson ve Denver flotasyon hücrelerine göre daha düşük performans gösterdiği görülmektedir.

Genel olarak grafikte; köpürtücü miktarı ve bias/hava hızı arttıkça, üç hücre tipinde de yanabilir kısım veriminin arttığı gözlemlenmektedir. Bu durum, daha fazla yüzey aktif madde ve hava ile minerallerin kabarcıklara tutunma olasılığının arttığını ve dolayısıyla verimin yükseldiğini göstermektedir. Ancak bu artış, her durumda lineer değildir. Özellikle kolon hücresinde belirli bir noktadan sonra verim artışının sınırlı kaldığı dikkati çekmektedir.

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25, farklı tasarıma sahip hücrelerin yalnızca kinetik açıdan değil ürün kazanımı (flotasyon verimi) açısından da birbirinden farklı performans sergilediğini göstermektedir. Jameson hücresi yüksek verim hedeflenen prosesler için öne çıkarken, Denver hücresi dengeli ve istikrarlı sonuçlar vermektedir. Flotasyon kolonu ise daha düşük verime rağmen, seçicilik ve ürün kalitesi açısından belirli uygulamalarda tercih edilebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada Jameson hücresi, flotasyon kolonu ve Denver flotasyon hücrelerinin flotasyon performanslarının karşılaştırılması flotasyon kinetiğinin anlamlı analizini ve flotasyon verimlerini belirleyebilmek amacıyla yapılmıştır.

Türkiye Taşkömürü Kömürü Kozlu müessesesine ait çok düşük kül içerikli konsantre kömürünün kullanıldığı deneylerde tane boyutu, köpürtücü miktarı ve bias/hava hızının flotasyon hız sabiti ve verime etkileri her üç cihaz için karşılaştırmalı olarak belirlenmiştir.

Kullanılan numunenin temas açısı değeri 109° , Zeta potansiyeli değeri ise doğal pH (6,4)'da -39,05 mV olarak ölçülmüştür. -106+75 μm , -75+38 μm , -38 μm tane boyutlarında ölçülen kalorifik değerleri sırası ile 7289,25; 7652,70 ve 7996,10 kcal/kg olarak tespit edilmiştir.

Çalışmada %95 güven aralığında çalışılmıştır.

Deneylerde iri tane boyutlarında (-106 μm) kömür numunesi kullanıldığı için pozitif biasta çalışılmıştır.

Deneyler sırasında her üç cihazın çalışma şartları değiştirilmeden zamana bağlı olarak 60, 90, 150 ve 300 sn aralıklarla konsantre alımı yapılmıştır.

Bağımsız değişkenlerin (tane boyutu, bias/hava hızı ve köpürtücü miktarı) flotasyon verimi ve flotasyon hız sabitine etkilerini belirlemek için, 2^3 tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak, 4 adet düşük seviyede, 4 adet yüksek seviyede ve 4 adet orta seviyede olmak üzere 12 adet farklı deney şartı belirlenmiş olup deneyler her bir cihaz için ayrı ayrı yürütülmüştür.

Deneysel sonuçlardan elde edilen veriler ve grafiklerden belirlenen flotasyon hız sabitleri ve verimleri IBM SPSS 22 ve Design Expert-13 istatistik programları kullanılarak parametrelerin ana ve çoklu etkilerini gösteren modeller oluşturulmuştur.

Ana değişkenlerden; farklı köpürtücü miktarları (5 ppm, 10 ppm, 15 ppm), farklı bias/hava hızlarında (0,3 cm/s, 0,525 cm/s, 0,75 cm/s) ve farklı boyut aralıklarındaki (-38 μm , -75+38 μm ve -106+75 μm) numuneler için üç farklı flotasyon sisteminin (Jameson hücresi, flotasyon kolonu ve Denver flotasyon hücresi) flotasyon hız sabitleri (k , dk^{-1}) ve verimleri (%) karşılaştırılmıştır.

Jameson hücresine ait ANOVA sonuçlarına göre ;

Flotasyon hız sabiti için bias hızı, tane boyutu ve köpürtücü etkisi SPSS'te anlamlı iken DE-13'te sadece bias hızı anlamlı bulunmuştur.

Flotasyon verimi için bias hızı, tane boyutu ve köpürtücü etkisi SPSS'te anlamlı iken DE'de sadece bias hızı anlamlı bulunmuştur.

Flotasyon kolonuna ait ANOVA sonuçlarına göre;

Flotasyon hız sabiti ve verim için bias hızı, tane boyutu ve köpürtücü etkisi SPSS'de anlamlı bulunmuştur.

Aynı şekilde flotasyon hız sabiti için bias hızı, tane boyutu ve köpürtücü etkisi DE'de anlamlı bulunmuştur. Flotasyon veriminde ise DE'de sadece tane boyutu anlamlı bulunmuştur.

Denver flotasyon hücresine ait ANOVA sonuçlarına göre;

Flotasyon hız sabiti ve verim için bias hızı, tane boyutu ve köpürtücü etkisi SPSS'de anlamlı bulunmuştur.

Aynı şekilde flotasyon hız sabiti için bias hızı, tane boyutu ve köpürtücü etkisi DE'de anlamlı bulunmuştur. Flotasyon veriminde ise DE'de tane boyutu ve köpürtücü miktarı anlamlı bulunmuştur.

SPSS'de yapılan ANOVA sonuçlarına göre oluşturulan modeller incelendiğinde flotasyon hız sabiti modellerinde en yüksek R^2 değeri sırasıyla Jameson hücresi (0,9970), Denver hücresi (0,9950) ve flotasyon kolonu (0,9900) olduğu görülmektedir. Flotasyon verimine (%) ait R^2 değerleri de aynı şekilde Jameson hücresi(0,9999), Denver hücresi (0,9950) ve flotasyon kolonundan (0,9930) elde edilmiştir.

Jameson hücresi en yüksek flotasyon hız sabitine sahip olup performansı en yüksek sistem olarak öne çıkmaktadır. Bunu Denver flotasyon hücresi ve flotasyon kolonu izlemektedir. Özellikle ince tane boyutlarında ($-38 \mu\text{m}$) Jameson hücresinin diğer iki flotasyon sistemine göre daha belirgin bir üstünlük sağladığı görülmektedir.

Sonuç olarak hem ince hem de iri tanelerde Jameson hücresinin daha etkili olduğu, Denver hücresinin orta düzeyde ve flotasyon kolonunun ise nispeten düşük performans sergilediği bulunmuştur.

5.2. Öneriler

Deney sayısını artırarak sonuçların güvenilirliği artırabilir, istatistiksel hatalar azaltılabilir.

Farklı tane boyutlarında çalışılarak analizler genişletilebilir ve tane boyutunun flotasyona etkisi daha detaylı değerdendirebilir.

Farklı tipte köpürtücüler (örneğin MIBC, pine oil vb.) kullanılarak köpürtücünün hem köpük yapısına hem de flotasyona etkileri detaylandırılabilir.



KAYNAKLAR

- Ahmed. N. & Jameson. G., 1985. The effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles. *International Journal of Mineral Processing*. 14 (3). 195-215.
- Ahmed. N., & Jameson. G. J. (1989). Flotation kinetics. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 5(1-4). 77-99.
- Aksanl. B., 1998. Flotation Columns-Part I Basic Operation Principles and Parameters Affecting the Separation. *Scientific Mining Journal*. 37 (2). 21-40.
- Aksoy. D. O., 2016. The effect of collector. frother dosage and their interaction on the flotation of bottom ash by full factorial design. *Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*. 17 (3). 594-604.
- Albijanlic. B., Ozdemir. O., Nguyen. A. V. & Bradshaw. D., 2010. A review of induction and attachment times of wetting thin films between air bubbles and particles and its relevance in the separation of particles by flotation. *Advances in colloid and interface science*. 159 (1). 1-21.
- Aldrich. C., Marais. C., Shean. B. & Cilliers. J., 2010. Online monitoring and control of froth flotation systems with machine vision: A review. *International Journal of Mineral Processing*. 96 (1-4). 1-13.
- Alexander. D., Franzidis. J. & Manlapig. E., 2003. Froth recovery measurement in plant scale flotation cells. *Minerals Engineering*. 16 (11). 1197-1203.
- Anzoom. S. J., Tripathy. S. K., Sahu. L., Bhattacharya. S., & Mukherjee. A. K. (2020). Influence of impeller speed and cell volume on coal flotation performance in a self-aerating flotation machine. *Advanced Powder Technology*. 31(9). 4053-4063.
- Arbiter. N. & Harris. C. C., 1962. Flotation kinetics. *Froth flotation*. 50 (1).
- ASTM 2004. Annual book of ASTM standards. *West Conshohocken PA American Society for Testing and Materials*.
- ASTM D5865-13. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. *American Society for Testing and Materials*.
- Ata. S., & Ahmed. N. (1999). The effect of hydrophobicity on the froth phase behavior. In *Chemical 99 (27th: 1999: Newcastle. Australia)* (pp. 456-461). [Barton. ACT]: Institution of Engineers. Australia.
- Ata. S., Ahmed. N. & Jameson. G. J., 2003. A study of bubble coalescence in flotation froths. *International Journal of Mineral Processing*. 72 (1-4). 255-266.
- Ata. S., 2009. The detachment of particles from coalescing bubble pairs. *Journal of Colloid and Interface Science*. 338 (2). 558-565.

- Atkinson. B. & Conway. C., 1993. Fundamentals of Jameson Cell operation including size-yield response. *6th Australian Coal Preparation Society Conference*. Mackay QLD.
- Banford. A., Aktas. Z. & Woodburn. E., 1998. Interpretation of the effect of froth structure on the performance of froth flotation using image analysis. *Powder technology*. 98 (1). 61-73.
- Barbian. N., Hadler. K., ventura-medina. E. & Cilliers. J., 2005. The froth stability column: linking froth stability and flotation performance. *Minerals Engineering*. 18 (3). 317-324.
- Barbian. N., Cilliers. J. J., Morar. S. H. & Bradshaw. D. J., 2007. Froth imaging. air recovery and bubble loading to describe flotation bank performance. *International Journal of Mineral Processing*. 84 (1-4). 81-88.
- Bouchard. J., Desbiens. A., del Villar. R. & Nunez. E., 2009. Column flotation simulation and control: An overview. *Minerals Engineering*. 22 (6). 519-529.
- Bournival. G., Ata. S., & Jameson. G. J. (2017). Bubble and froth stabilizing agents in froth flotation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 38(6). 366-387.
- Boutin P. & Tremblay. R. J., 1964. Method and apparatus for the separation and recovery of ores. *Canadian patent (694547)*.
- Brown. D. J. (1962). Coal flotation. *Froth Flotation*. 50. 518-538.
- Bu. X., Xie. G., Chen. Y. & Ni. C., 2017. The order of kinetic models in coal fines flotation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 37 (3). 113-123.
- Bulatovic. S. M., 2007. Handbook of flotation reagents: chemistry. theory and practice: Volume 1: flotation of sulfide ores. *Elsevier*.
- Cassandra Austen. I., Chennakesavulu. K., Gharai. M., Vasumathi. N., Kumari. A., Ramanjaneya Reddy. G. & Vijaya Kumar. T., 2025. Process upgradation and kinetic modeling of high-ash non-coking coal flotation using bio-based collector for enhanced clean coal recovery. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 1-26.
- Ciribeni, V., Yianatos, J., Sarquis, P., & Borella, L., 2005. Influence of Air Sparger Height in Flotation Columns" p: 387-394.
- Chander. S. & Polat. M., 1995. Coal flotation kinetics: Interaction between physical and chemical variables.

- Chaves. A. P. & Ruiz. A., 2009. Considerations on the kinetics of froth flotation of ultrafine coal contained in tailings. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 29 (6). 289-297.
- Chen. Y., Zhou. B., Zhang. X., Yang. S. & Huang. W., 2022. Understanding the role of kerosene on the coal particle and bubble attachment process. *Fuel*. 307. 121915.
- Cheng. G., Ma. L., Gui. X., Liu. J. & Wang. Y., 2013. Study on kinetic modelling for fine coal flotation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 33 (1). p: 12-25.
- Cheng. G., Zhang. M., Lu. Y., Zhang. H. & Von Lau. E., 2024. New insights for improving low-rank coal flotation performance via emulsified waste fried oil collector. *Fuel*. 357. 129925.
- Choung. J., Luttrell. G. & Yoon. R., 1993. Characterization of operating parameters in the cleaning zone of microbubble column flotation. *International Journal of Mineral Processing*. 39 (1-2). p: 31-40.
- Clayton. R., Jameson. G. & Manlapig. E., 1991. The development and application of the Jameson cell. *Minerals Engineering*. 4 (7-11). p: 925-933.
- Clift. R., Grace. J. R., & Weber. M. E. (2005). Bubbles, drops and particles.
- Cole. K. E., 2011. Bubble size, coalescence and particle motion in flowing foams. Imperial College London.
- Cole. M., Dickinson. J. & Galvin. K., 2022. The effect of feed solids concentration on flotation performance using the Reflux Flotation Cell. *Fuel*, 320. 123931.
- Collins. G. & Jameson. G., 1976. Experiments on the flotation of fine particles: the influence of particle size and charge. *Chemical Engineering Science*. 31 (11). 985-991.
- Cowburn. J., Harbort. G., Manlapig. E. & Pokrajcic. Z., 2006. Improving the recovery of coarse coal particles in a Jameson cell. *Minerals Engineering*. 19 (6-8). 609-618.
- Çolpan. S., 2019. Türkiye kömür işletmeleri (TKİ) kömürlerinden farklı kalitelerde kömür üretim olasılıklarının araştırılması, Ankara.
- Dey. S., Pani. S., & Singh. R. (2014). Study of interactions of frother blends and its effect on coal flotation. *Powder Technology*. 260. 78-83.
- Derjaguin. B. & Dukhin. S., 1993. Theory of flotation of small and medium-size particles. *Progress in Surface Science*. 43 (1-4). 241-266.
- Dippenaar. A., 1982a. The destabilization of froth by solids. I. The mechanism of film rupture. *International Journal of Mineral Processing*. 9 (1). 1-14.

- Dippenaar. A., 1982b. The destabilization of froth by solids. II. The rate-determining step. *International Journal of Mineral Processing*. 9 (1). 15-22.
- Düzyol. S. (2009). Cevher Hazırlamada Islanabilirliğe Dayanan İşlemlerde Hidrofobisite ve Yüzey Geriliminin Etkisi (Doctoral dissertation. Doktora Tezi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Konya.
- Drzymala, J. (2007). Mineral processing. *Foundations of theory and practice of mineralogy*, 381-382.
- Evans. G. M. & Atkinson. B. W., 1995. The Jameson Cell, Flotation science and engineering. 331-363.
- Fan. M., Tao. D., Zhao. Y. & Honaker. R., 2013. Effect of nanobubbles on the flotation of different sizes of coal particle. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 30 (3). 157-161.
- Farrokhpay. S., 2011. The significance of froth stability in mineral flotation-A review. *Advances in colloid and interface science*. 166 (1-2). 1-7.
- Farrokhpay, S., & Bradshaw, D. (2012). Effect of clay minerals on froth stability in mineral flotation. *A review, XXVI. IMPC*. New Delhi, India, Paper, 313.
- Feng. D., & Aldrich. C. (1999). Effect of particle size on flotation performance of complex sulphide ores. *Minerals Engineering*. 12(7). 721-731.
- Field. A. (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. Sage publications limited.
- Finch. J. & Dobby. G., 1990. *Column flotation* Pergamon press. Oxford USA.
- Franco. A. & Diaz. A. R., 2009. The future challenges for “clean coal technologies”: joining efficiency increase and pollutant emission control. *Energy*. 34 (3). 348-354.
- Fuerstenau. D. W., Rosenbaum. J. M., & Laskowski. J. (1983). Effect of surface functional groups on the flotation of coal. *Colloids and Surfaces*. 8(2). 153-173.
- Fuerstenau, M. C., Jameson, G. J., & Yoon, R. H. (Eds.). (2007). *Froth flotation: a century of innovation*. SME.
- Gorain. B., Franzidis. J. & Manlapig. E., 1997. Studies on impeller type. impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. Part 4: Effect of bubble surface area flux on flotation performance. *Minerals Engineering*. 10 (4). 367-379.
- Gorain. B. K., Franzidis. J. P., & Manlapig. E. V. (1999). The empirical prediction of bubble surface area flux in mechanical flotation cells from cell design and operating data. *Minerals Engineering*. 12(3). 309-322.

- Govindarajan. B., Rao. T. & Vanangamudi. M., 1991. An empirical model for batch coal flotation. *Coal Preparation*. 9 (3-4). 155-168.
- Güldan. G., 2010. Zonguldak Taşkömürünün Kuru Zenginleştirilmesi. *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü-Yüksek Lisans Tezi*. Zonguldak. p: 108
- Gülsuna. G., 2007. Linyit kömürü ara ürününün flotasyon ile zenginleştirilmesinin araştırılması. *Fen Bilimleri Enstitüsü*
- Gürsoy, Y. H., & Oteyaka, B. (2015). Effects of air-to-pulp ratio and bias factor on flotation of complex Cu-Zn sulphide ore in the Jameson cell. *Physicochemical problems of mineral processing*, 51.
- Hacifazlıoğlu. H., & Sutcu. H. (2007). Optimization of some parameters in column flotation and a comparison of conventional cell and column cell in terms of flotation performance. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*. 38(3-4). 287-293.
- Hacifazlıoğlu. H., 2008. Kolon flotasyonu ile bitümlü kömür atıklarından temiz kömür kazanımı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 8 (2). 11-19.
- Hacifazlıoğlu. H., 2011. Jameson hücresinde bitümlü şlam kömürün flotasyonu için en uygun köpürtücü & toplayıcı tipinin araştırılması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*. 2 (1). 33-43.
- Hadler. K., Greyling. M., Plint. N. & Cilliers. J., 2012. The effect of froth depth on air recovery and flotation performance. *Minerals Engineering*. 36. 248-253.
- Harbort. G., De Bono. S., Carr. D. & Lawson. V., 2003. Jameson Cell Fundamentals-a revised perspective. *Minerals Engineering*. 16 (11). 1091-1101.
- Harbort. G. & Schwarz. S., 2010. Characterisation measurements in industrial flotation cells. *Flotation Plant Optimisation*. 95-106.
- He. J., Liu. C. & Yao. Y., 2018. Flotation intensification of the coal slime using a new compound collector and the interaction mechanism between the reagent and coal surface. *Powder technology*. 325. 333-339.
- Hernainz. F., Calero. M. & Blazquez. G., 2005. Kinetic considerations in the flotation of phosphate ore. *Advanced Powder Technology*. 16 (4). 347-361.
- Huber-Panu. I., Ene-Danalache. E. & Cojocariu. D., 1976. Mathematical models of batch and continuous flotation. *Flotation, A. M. Gaudin Memorial*.
- Jameson. G. (1988). A New Concept in Flotation Machine Design. *Metallic Process. Feb*. 44-47.

- Jameson. G. J., 2006. Theory and Applications of the Jameson Cell. *Proceedings of the International Seminar on Mineral Processing Technology and Indo-Korean Workshop on Resource Recycling (MPT-2006)*. 49.
- Jameson. G. J. (2010). New directions in flotation machine design. *Minerals Engineering*. 23(11-13). 835-841.
- Jameson. G. J. (2012). The effect of surface liberation and particle size on flotation rate constants. *Minerals Engineering*. 36. 132-137.
- Jameson. G. J., Cooper. L., Tang. K. K. & Emer. C., 2020. Flotation of coarse coal particles in a fluidized bed: The effect of clusters. *Minerals Engineering*. 146. 106099.
- Johansson. G. & Pugh. R., 1992. The influence of particle size and hydrophobicity on the stability of mineralized froths. *International Journal of Mineral Processing*. 34 (1-2). 1-21.
- Kadagala. M. R., Nikkam. S. & Tripathy. S. K., 2023. Application of Kerosene/crude palm oil and their mixtures as collectors for flotation of oxidized coal fines and their performance analysis. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 43 (11). 1951-1975.
- Kaya. M., & Laplante. A. R. (1986). Investigation of batch and continuous flotation kinetics in a modified Denver laboratory cell. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 25(1). 1-8.
- Karaca. S., Uçar. A. & Şahbaz. O., 2022. Kinetic modelling of flotation column and Jameson cell in coal. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 58.
- Karaca. S., (2017). Modifiye flotasyon kolonu ve jameson hücresinde kömür flotasyonunda çalışma parametrelerinin flotasyon kinetiğine etkisi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*. Kütahya.
- Kelebek. S., Demir. U., Şahbaz. O., Ucar. A., Cinar. M., Karaguzel. C. ve Oteyaka. B., 2008. The effects of dodecylamine. kerosene and pH on batch flotation of Turkey's Tunçbilek coal. *International Journal of Mineral Processing*. 88 (3-4). 65-71.
- Kemal. M., 1991. Linyit kömürü değerlendirilmesi ve kullanımında kömür özelliklerinin etkileri. Önal. G., Atesok. G., *Kömür Teknolojisi & Kullanımı Semineri*. YMGV.
- Kim. H. & Park. C.-H., 2024. Estimation of Bubble Size and Gas Dispersion Property in Column Flotation. *Separations*. 11 (12). 331.
- Klimpel. R., Hansen. R., Meyer. W. & Nimerick. K., 1979. Laboratory characterization of the influence of reagent changes on coal flotation. *AIIME Annual Meeting*.

- Klimpel. R. R., Dhansen. R., & Fee. B. S. (1986). Selection of flotation reagents for mineral flotation. *su: Design and Installation of Concentration and Dewatering Circuit. Ed. AL Mular and MA Anderson. Capítulo. 26.* 384-404.
- Kohmuench. J., Mankosa. M., Thanasekaran. H. & Hobert. A., 2018. Improving coarse particle flotation using the Hydro Float™(raising the trunk of the elephant cur&). *Minerals Engineering.* 121. 137-145.
- Koursari. N., Arjmandi-Tash. O., Trybala. A., & Starov. V. M. (2019). Drying of foam under microgravity conditions. *Microgravity Science and Technology.* 31(5). 589-601.
- Laskowski. J., 2001. Coal flotation and fine coal utilization. *Elsevier.*
- Levine. J. R., 1993. Coalification: the evolution of coal as source rock and reservoir rock for oil and gas.
- Li, L., Lu, X., Qiu, J., & Liu, D. (2013). Effect of micro emulsified collector on froth flotation of coal. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 113(11), 877-880.
- Li. Q.-W., Xiao. Y., Zhong. K.-Q., Shu. C.-M., Lü. H.-F., Deng. J. & Wu. S., 2020. Overview of commonly used materials for coal spontaneous combustion prevention. *Fuel.* 275. 117981.
- Li. B., Yu. X., Zhang. K., Yuan. Y., & Dou. N. (2025). Experimental study on ash reduction by classification flotation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization.* 45(3). 479-499.
- Lu. T., Deng. Z., Tang. Y., & Cheng. W. (2023). Effects of particle size on the flotation behavior of coal slime. *Energy Exploration & Exploitation.* 41(4). 1344-1355.
- Lynch. A., Watt. J., Finch. J. & Harbort. G., 2007. History of flotation technology. Froth flotation: A century of innovation. 65-91.
- Ma. G., Xia. W. & Xie. G., 2018. Effect of particle shape on the flotation kinetics of fine coking coal. *Journal of Cleaner Production.* 195. 470-475.
- Marchese. M., Uribe-Salas. A. & Finch. J., 1993. Hydrodynamics of a downflow column. *XVIII International Mineral Processing Congress.* 813-820.
- Mavros. P., & Matis. K. A. (Eds.). (2013). *Innovations in flotation technology* (Vol. 208). Springer Science & Business Media.
- Melo. B. J. S., Amancio Filho. A., Sousa. M. F., Silva. A. C. & Silva. E. M. S., 2025. Comparative Study of the Efficiency of Jameson Cell and Conventional Cell in Copper Ore Flotation. *Revista Foco.* 18 (3). E7443-E7443.

- Mervit. R. D. & Roy. D., 1986. Coal exploration. *Mine Planning and Development*. 478.
- Miskovic. S., 2011. An investigation of the gas dispersion properties of mechanical flotation cells: An in-situ approach.
- Moolman. D. W., Aldrich. C., & Van Deventer. J. S. J. (1995). The monitoring of froth surfaces on industrial flotation plants using connectionist image processing techniques. *Minerals engineering*. 8(1-2). 23-30.
- Morar. S., Hatfield. D., Barbian. N., Bradshaw. D., Cilliers. J. & Triffett. B., 2006. A comparison of flotation froth stability measurements and their use in the prediction of concentrate grade. *Proceedings of the XXIII International Minerals Processing Congress*. 739-744.
- Murhula. E., Hashan. M., & Otsuki. A. (2022). Effect of solid concentration and particle size on the flotation Kinetics and entrainment of quartz and hematite. *Metals*. 13(1). 53.
- Nakhaei. F., Iran najad. M. & Mohammad Nejad. S., 2023a. A comprehensive review of froth surface monitoring as an aid for grade and recovery prediction of flotation process. *Part B: Texture and dynamic features. Energy Sources. Part A: Recovery. Utilization. and Environmental Effects*. 45 (3). 7812-7834.
- Nakhaei. F., Iran najad. M. & Mohammad nejad. S., 2023b. A comprehensive& review of froth surface monitoring as an aid for grade and recovery prediction of flotation process. *Part A: Structural features. Energy Sources. Part B: Recovery. Utilization. and Environmental Effects*. 45 (1). 2587-2605.
- Napier-Munn. T., 2005. Preface to 7th Edition. *Wills' Mineral Processing Technology*.
- Negeri. T. (2021). Flotation-Calcination-Magnetic Separation Hybrid Process for Concentration of Rare Earth Minerals Contained in a Carbonatite Ore. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 9(3). 271-289.
- Neethling. S. & Cilliers. J., 2003. Modelling flotation froths. *International Journal of Mineral Processing*. 72 (1-4). 267-287.
- Nguyen. A. & Schulze. H. J., 2003. Colloidal science of flotation. CRC press.
- Noble. A. & Luttrell. G. H., 2015. A review of state-of-the-art processing operations in coal preparation. *International Journal of Mining Science and Technology*. 25 (4). 511-521.
- Norori-McCormac, A., Brito-Parada, P. R., Hadler, K., Cole, K., & Cilliers, J. J. (2017). The effect of particle size distribution on froth stability in flotation. *Separation and Purification Technology*, 184, 240-247.
- OECD (1983). Coal information report. Organization for Economic Co-operation and Development. France-Paris. *OECD*. 7-41.

- Ofori. P., O'Brien. G., Firth. B. & Jenkins. B., 2006. Flotation process diagnostics and modelling by coal grain analysis. *Minerals Engineering*. 19 (6-8). 633-640.
- Ostadrahimi. M., Farrokhpay. S., Gharibi. K., Dehghani. A. & Aghajanloo. M. (2021). Flotasyon işlem parametrelerinin köpük stabilitesi ve köpük geri kazanımı üzerindeki etkileri. *Güney Afrika Madencilik ve Metalurji Enstitüsü Dergisi*. 121 (1). 11-20.
- Ozmaç. M. & Aktas. Z., 2006. Coal froth flotation: Effects of reagent adsorption on the froth structure. *Energy & Fuels*. 20 (3). 1123-1130.
- Öney. Ö. & Bilgin. E., 2016. Zonguldak İnce Taşkömürlerinin Optimal Flotasyon Parametrelerinin verimlilik İndeksi ile Belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen & Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 16 (3). 759-769.
- Öteyaka. B. & Soto. H., 1995. Modelling of negative bias column for coarse particles flotation. *Minerals Engineering*. 8 (1-2). 91-100.
- Özbayoğlu. G. (1994). Kömür Zenginleştirme Yöntemleri. *Cevher Hazırlama El Kitabı. Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı*. Ed. Önal. G. ve Ateşok. G., İstanbul. 349-367.
- Patwardhan. A., & Honaker. R. Q. (2000). Development of a carrying-capacity model for column froth flotation. *International Journal of Mineral Processing*. 59(4). 275-293.
- Pawlik, M. (2022). Fundamentals of froth flotation. *Chem Texts*, 8(4), 19.
- Peterson. M., Duchene. L. J. & Shirts. M., 1990. Column flotation of multiple products from a fluorite ore. 9309. *US Department of the Interior. Bureau of Mines*.
- Pita. F. A., 2015. True flotation and entrainment of kaolinitic ore in batch tests. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 36 (4). 213-222.
- Polat. M. & Chander. S., 2000. First-order flotation kinetics models and methods for estimation of the true distribution of flotation rate constants. *International Journal of Mineral Processing*. 58 (1-4). 145-166.
- Polat. M., Arnold. B., Chander. S., Hogg. R., & Zhou. R. (1993). Coal flotation kinetics-effect of particle size and specific gravity. *Coal Science and Technology*. 21. 161-170.
- Pudasainee. D., Kurian. V. & Gupta. R., 2020. Coal: Past. present. and future sustainable use. *Future Energy*. 21-48.
- Rao. S. R., & Leja. J. (2004). *Surface chemistry of froth flotation: reagents and mechanisms*. Kluwer Academic/Plenum Publishers.

- Rahman. R. M., Ata. S. & Jameson. G. J., 2015a. Study of froth behavior in a controlled plant environment–Part 1: Effect of air flow rate and froth depth. *Minerals Engineering*. 81. 152-160.
- Rahman. R. M., Ata. S. & Jameson. G. J., 2015b. Study of froth behavior in a controlled plant environment–Part 2: Effect of collector and frother concentration. *Minerals Engineering*. 81. 161-166.
- Rao, S. R. (2013). *Surface chemistry of froth flotation: Volume 1: Fundamentals*. Springer Science & Business Media.
- Rao. D. S. & Gouricharan. T., 2016. Coal processing and utilization. CRC Press/Taylor & Francis Group London. UK.
- Rawat. S. & Kumar. S., 2022. Critical review on processing technologies and economic aspect of bio-coal briquette production. *Preparate& Biochemistry & Biotechnology*. 52 (8). 855-871.
- Reay. D. & Ratcliff. G., 1975. Experimental testing of the hydrodynamic collision model of fine particle flotation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 53 (5). 481-486.
- Roberts. T., Firth. B. & Nicol. S., 1982. A modified laboratory cell for the flotation of coal. *International Journal of Mineral Processing*. 9 (2). 191-200.
- Subedi. D. P., Madhup. D. K., Laghu. A. K., Joshi. U. M., & Tyata. R. B. (2008). Hydrophilization of low-density polyethylene by dielectric barrier discharge. *Journal of Science and Technology in the Tropics*. (4). 73-77.
- Sastri. S., 1998. Column flotation: Theory and practice.
- Sawant. S., Joshi. J., Pangarkar. V. & Mhaskar. R., 1981. Mass transfer and hydrodynamic characteristics of the Denver type of flotation cells. *The Chemical Engineering Journal*. 21 (1). 11-19.
- Schwarz. S. & Grano. S., 2005. Effect of particle hydrophobicity on particle and water transport across a flotation froth. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 256 (2-3). 157-164.
- Seaman. D. R., Manlapig. E. & Franzidis. J.-P., 2006. Selective transport of attached particles across the pulp–froth interface. *Minerals Engineering*. 19 (6-8). 841-851.
- Shah. Y., Kelkar. B. G., Godbole. S. & Deckwer. W. D., 1982. Design parameters estimations for bubble column reactors. *AIChE Journal*. 28 (3). 353-379.
- Shahbazi. B., 2023. Effect of Bubble-Particle Interactions on Collection Efficiency of Froth Flotation. *Journal of Environment and Sustainable Mining*. 1 (2). 48-58.

- Shi, Y., Wei, Z., Xu, H., Wu, F., Gao, H., & Ping, A. (2024). Analysis of bubble parameters in a fluidized flotation column with steel ball particles. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 60.
- Sokolović. J. M., Stanojlović. R. D. & Marković. Z. S., 2012. The effects of pretreatment on the flotation kinetics of waste coal. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 32 (3). 130-142.
- Sokolović. J. M., & Miskovic. S. (2018). The effect of particle size on coal flotation kinetics: A review. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 54(4). 1172-1190.
- Schuhmann Jr. R. (1942). Flotation Kinetics. I. Methods for steady-state study of flotation problems. *The Journal of Physical Chemistry*. 46(8). 891-902.
- Sönmez. İ. & Cebeci. Y., 2006. Performance of classic oils and lubricating oils in froth flotation of Ukraine coal. *Fuel*. 85 (12-13). 1866-1870.
- Sripriya. R., Rao. P. & Choudhury. B. R., 2003. Optimisation of operating variables of fine coal flotation using a combination of modified flotation parameters and statistical techniques. *International Journal of Mineral Processing*. 68 (1-4). 109-127.
- Stach. E., Mackowsky. M.-T., Teichmüller. M., Taylor. G., Chandra. D. & Teichmüller. R., 1982. Stach's textbook of coal petrology: Gebrüder Borntraeger. Berlin. 535p.
- Subrahmanyam. T. & Forssberg. E., 1988. Froth stability. particle entrainment and drainage in flotation—a review. *International Journal of Mineral Processing*. 23 (1-2). 33-53.
- Sutherland. K., 1948. Physical chemistry of flotation. XI. Kinetics of the flotation process. *The Journal of Physical Chemistry*. 52 (2). 394-425.
- Szatkowski. M., 1985. Model describing mechanism of the flotation process. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*. Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 94. p:129-135.
- Şahbaz. O., 2005. Tunçbilek Termik Santral Cürufundan Yanmamış Karbonun Jameson Flotasyon Kolonu ile Kazanımı. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*. Kütahya.
- Şahbaz. O., 2010. Jameson flotasyon hücresinde düşeyboru modifikasyonu ve performansa etkisi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya.
- Şahbaz. O., 2013. Determining optimal conditions for lignite flotation by design of experiments and the halbich upgrading cur&. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 49 (2). s:535-546

- Şensöğüt. C. & Ören. Ö., 2020. Çan Linyitlerinin Kendiliğinden Yanma Yetkinliklerinin Araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 35 (3). s:593-608.
- Tao. D. (2005). Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles a review. *Separation science and technology*. 39(4). p: 741-760.
- Tan. J., Liang. L., Peng. Y., & Xie. G. (2019). Effect of particle size on the froth property in coal flotation. *Journal of China University of Mining & Technology*. 48(01). p: 195-203.
- Tavera. F., Gomez. C. & Finch. J., 1996. A gas holdup sensor for slurry-air systems. *Trans. IMM Sect. C.*, 105. C99-104.
- Teichmüller. M., & Teichmüller. R. (1982). The geological basis of coal formation. *Stach's Textbook of Coal Petrology*. 3. 5-86.
- Thielemann. T., Schmidt. S. & Gerling. J. P., 2007. Lignite and hard coal: Energy suppliers for world needs until the year 2100—An outlook. *International Journal of Coal Geology*. 72 (1). p: 1-14.
- Tian. Q., Zhang. Y., Li. G. & Wang. Y., 2017. Floc-flotation of ultrafine coal slimes achieved by flotation column. *Energy Sources. Part A: Recovery. Utilization. and Environmental Effects*. 39 (9). p: 899-904.
- Tomlinson. H. S., & Fleming. M. G. (1963). Flotation Rate Studies. in “*Mineral Processing*”. ed. A. Roberts.
- Trahar. W., 1981. A rational interpretation of the role of particle size in flotation. *International Journal of Mineral Processing*. 8 (4). p: 289-327.
- Tsatouhas. G., Grano. S. & Vera. M., 2006. Case studies on the performance and characterisation of the froth phase in industrial flotation circuits. *Minerals Engineering*. 19 (6-8). p: 774-783.
- Tuteja. R., Spottiswood. D. & Misra. V., 1995. Column parameters: Their effect on entrainment in froth. *Minerals Engineering*. 8 (11). 1359-1368.
- Uribe-Salas. A., de Lira-Gómez. P., Pérez-Garibay. R., Nava-Alonso. F., Magallanes-Hernández. L. & Lara-Valenzuela. C., 2003. Overloading of gas bubbles in column flotation of coarse particles and effect upon recovery. *International Journal of Mineral Processing*. 71 (1-4). 167-178.
- Van Krevelen. D. W. (1993). Coal: typology-physics-chemistry-constitution.
- Vanangamudi. M. & Rao. T., 1986. Modelling of batch coal flotation operation. *International Journal of Mineral Processing*. 16 (3-4). 231-243.

- Ventura-Medina. E. & Cilliers. J., 2002. A model to describe flotation performance based on physics of foams and froth image analysis. *International Journal of Mineral Processing*. 67 (1-4). 79-99.
- Vera. M., Franzidis. J. & Manlapig. E., 1999. Simultaneous determination of collection zone rate constant and froth zone recovery in a mechanical flotation environment. *Minerals Engineering*. 12 (10). 1163-1176.
- Wen. Z., Zhou. C., Pan. J., Nie. T., Zhou. C., & Lu. Z. (2021). Deep learning-based ash content prediction of coal flotation concentrate using convolutional neural network. *Minerals Engineering*. 174.
- Wills. B. A. & Finch. J., 2015. Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Butterworth-Heinemann.
- Wills. B. A., & Finch. J. A. (2016). Froth flotation. Chapter 12. *Wills' Mineral Processing Technology* (8th).
- Wu. J., Wu. D., Gao. X., & Li. B. (2023). Evolutionary analysis of coal molecular structure under different metamorphism: An attempt to use electron paramagnetic resonance. *ACS Omega*. 8(43). 40547-40560.
- Yang. D. C., 1988. A new packed column flotation system. *Column flotation*. 88. p: 257-265.
- Yan. D. & Gupta. A., 2006. Mineral processing design and operations: an introduction. Elsevier Science [Imprint].
- Yang. H., Cai. Y., & Wu. L. (2018). Flotation behavior of raw and oxidized fine coal when mixed with coarse particles. *Fuel*. 232. p: 225-232.
- Yel. E., Onen. V. & Kalem. M., 2024. Co-flotation of effluents from detergent and marble processing industries in Denver and dispersed air flotation systems, *Chemosphere*, p: 362.
- Yeşilyurt. Z., 2014. Farklı Yapıdaki Non-iyonik Sürfaktanların Bitümlü Kömür Şlamı Üzerinde Flotasyon & Gang Taşıma Davranışları ile Filtrasyon Performanslarının İncelenmesi.
- Yianatos. J., Espinosa-Gomez. R., Finch. J., Laplante. A. & Dobby. G., 1988. Effect of column height on flotation column performance. *Minerals & Metallurgical Processing*. 5. p:11-14.
- Yianatos. J. B., & Levy. A. R. (1989). Estimation of gas holdup. diameter and apparent density of mineralized bubbles in industrial flotation columns. In *International colloquium: Developments in froth flotation* (pp. 19-40). Cape Town. South Africa: The South African Institute of Mining and Metallurgy. Western Cape Branch.

- Yianatos. J. & Bergh. L., 1995. Troubleshooting industrial flotation columns. *Minerals Engineering*. 8 (12). p: 1593-1605.
- Yianatos. J. B., Bergh. L. G., & Cortés. G. A. (1998). Froth zone modelling of an industrial flotation column. *Minerals Engineering*. 11(5). p: 423-435.
- Yianatos. J., Bucarey. R., Larenas. J., Henríquez. F., & Torres. L. (2005). Collection zone kinetic model for industrial flotation columns. *Minerals Engineering*. 18(15). 1373-1377.
- Yianatos. J., 2007. Fluid flow and kinetic modelling in flotation related processes: columns and mechanically agitated cells—a review. *Chemical Engineering Research and Design*. 85 (12). p: 1591-1603.
- Yoon. R. H. (1993). Microbubble flotation. *Minerals Engineering*. 6(6). 619-630.
- Yoon. R.-H. & Mao. L., 1996. Application of extended DLVO theory. IV: derivation of flotation rate equation from first principles. *Journal of Colloid and Interface Science*. 181 (2). 613-626.
- Yoon. R.-H., 2000. The role of hydrodynamic and surface forces in bubble–particle interaction. *International Journal of Mineral Processing*. 58 (1-4). 129-143.
- Yoon. R. & Luttrell. G., 1989. The effect of bubble size on fine particle flotation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 5 (1-4). p: 101-122.
- Zanin. M., Wightman. E., Grano. S. & Franzidis. J.-P., 2009. Quantifying contributions to froth stability in porphyry copper plants. *International Journal of Mineral Processing*. 91 (1-2). p: 19-27.
- Zhang. W. (2016). The effects of frothers and particles on the characteristics of pulp and froth properties in flotation—A critical review. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 4(4). p: 251-269.
- Zhang. C., Qian. X., Song. H. & Jia. J., 2024. A microscopic mechanism study of the effect of binary surfactants on the flotation of Wiser bituminous coal. *Scientific Reports*. 14 (1).
- Zhu. W., Liu. N., Zhu. Z., Li. H., Fu. W., Zhang. Z., & Zhang. X. (2023). Ash Detection of Coal Slime Flotation Tailings Based on Chromatographic Filter Paper Sampling and Multi-Scale Residual Network. *Intelligent Automation & Soft Computing*. 38(3).
- Zuniga. H. G., 1935. Flotation recovery is an exponential function of its rate. *Boln. Soc. Nac. Min.*, Santiago, Chile. 47. p: 83-86.