

Mikro-Kabarcık İlavesinin Mekanik Flotasyonda Verim Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Gencer Yıldırım

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2021

The Investigation of the Effect of Microbubble Addition on the Yield of Mechanical Flotation

Gencer Yıldırım

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mining Engineering

January 2021

Mikro-Kabarcık İlavesinin Mekanik Flotasyonda Verim Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Gencer Yıldırım

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Cevher Hazırlama Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Derya Öz Aksoy

Ocak 2021

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç.Dr. Derya ÖZ AKSOY danışmanlığında hazırlamış olduğum “Mikro-Kabarcık İlavesinin Mekanik Flotasyonda Verim Üzerine Etkisinin İncelenmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

20/01/2021

Gencer Yıldırım

İmza

ÖZET

Günümüzde yüksek tenörlü cevherlerin azalması, serbestleşme boyutunu düşürmüştür. Bu da daha ince boyutlu cevherlerin zenginleştirilmesini gerekli hale getirmiştir. Diğer zenginleştirme yöntemlerinin çoğunun verimsiz olduğu -0,2 mm boyutunda en başarılı süreçlerden birisi flotasyondur. Ancak tane boyutu -0,02 mm'ye kadar incelendiğinde flotasyonun etkinliği de azalmaya başlamaktadır. Bu sebeple, çok ince tane boyutlarında etkin flotasyon üzerine birçok araştırma yapılmaktadır ve çözümlerden birisi olarak mikro-kabarcıkların kullanılması önerilmektedir.

Bu çalışmada, endüstride oldukça yaygın ve yapısal özellik ve maliyetler açısından modifikasyona uygun olan mekanik hücre temel alınmıştır. Bu çalışma için, kavitasyon prensiplerinden yararlanarak ince (yaklaşık 0,6-0,8 mm) hava kabarcığı üreten bir mikro-kabarcık üretici imal ettirilmiştir. Mikro-kabarcık üretici, klasik mekanik flotasyon hücresine monte edilerek hücrenin modifikasyonu sağlanmıştır. -0,15 mm boyutlu taneler klasik ve modifiye hücreler kullanılarak flotasyona tabi tutulmuş, her iki hücre ile gerçekleştirilen deneyler sonucu hesaplanan flotasyon hız sabiti "k" değerleri karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Flotasyon çalışmalarında, katı oranı, pervane hızı ve toplayıcı miktarının flotasyon verimi ve flotasyon hız sabiti üzerindeki etkisi istatistiksel tasarım yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

Çalışmalar sonucunda, klasik hücre ile elde edilebilecek maksimum flotasyon veriminin yaklaşık %75, modifiye hücre ile ise farklı koşullar altında, bu değer %85'in üzerinde olabileceği saptanmıştır. Flotasyon hız sabitleri açısından, klasik flotasyon çalışmalarında en yüksek flotasyon hız $12,13 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, modifiye hücre flotasyon çalışmalarında ise farklı koşullarda $22,14 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Mikro-kabarcık üretici, İnce tane flotasyonu, Mekanik flotasyon

SUMMARY

Nowadays, the depletion of high grade ores has decreased the liberalization size. This made it necessary to enrich finer sized ores. One of the most successful processes at -0.2 mm size, where most of the other enrichment methods are inefficient, is flotation. However, when the grain size becomes approximately -0.02 mm, the efficiency of flotation becomes to decrease. For this reason, many researches have been carried out on effective flotation in very fine grain sizes and the use of microbubbles is recommended as one of the solutions.

This study is based on a mechanical cell, which is very common in the industry and suitable for modification in terms of structural properties and costs. For this study, a microbubble generator using cavitation principles that generates thin (approximately 0.6-0.8 mm) air bubbles was designed and built. The cell modification was done by mounting the microbubble generator to the classical mechanical flotation cell. -0.15 mm sized particles were subjected to classical and modified flotation, and the effect of adding microbubbles to the classical cell on the yield and floating speed constant “k” have been researched. In flotation studies, the effect of solids ratio, impeller speed and collector amount on maximum yield and flotation speed in classical and modified flotation was investigated by using statistical design methods.

As a result of the studies, it has been observed that while the maximum efficiency that can be achieved with classical flotation remains around 75%, it can be exceeded 85% in modified flotation on different conditions. In terms of flotation rate constants, it was observed that the highest flotation rate value was $12,13 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ in classical flotation studies and $22,14 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ on different conditions in modified cell flotation studies.

Keywords: Micro-bubble generator, Fine particle flotation, Mechanical flotation

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Flotasyon Makinelerindeki Gelişim	6
2.1.1. Flotasyon kolonu	9
2.1.1.1. <u>Microcel</u>	10
2.1.1.2. <u>CavTube</u>	11
2.1.2. Reaktör/Ayırıcı flotasyon makinaları	12
2.1.2.1. <u>Davcra hücre</u>	13
2.1.2.2. <u>Jameson hücre</u>	14
2.1.2.3. <u>Contact hücre</u>	15
2.1.2.4. <u>Imhoflot</u>	16
2.1.2.5. <u>Aşamalı flotasyon reaktörü (Staged Flotation Reactor, SFR)</u>	17
2.1.3. Özel tasarlanmış flotasyon makinaları	18
2.1.3.1. <u>Flash flotasyon</u>	18
2.1.3.2. <u>Hydrofloat ayırıcı</u>	19
2.1.3.3. <u>StackCell®</u>	21
2.1.3.4. <u>Concorde hücre</u>	22
2.1.3.5. <u>Reflux flotasyon hücresi (RFC)</u>	23
2.1.4. Mekanik flotasyon hücresi	24
2.1.4.1. <u>Denver (Fahrenwald)</u>	25
2.1.4.2. <u>Galigher Agitair</u>	27
2.1.4.3. <u>Wemco (Fagergren)</u>	28

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.1.4.4. <u>Outotec (Outokumpu)</u>	29
2.2. Kavitasyon ile Hava Kabarcığı Üretimi Yöntemleri.....	31
2.2.1. Hidrodinamik kavitasyonla hava kabarcığı üretimi.....	32
2.2.1.1. <u>Mekanik karıştırma</u>	32
2.2.1.2. <u>Hızlı sıvı akışı</u>	34
2.2.1.3. <u>Çözünmüş hava içeriği</u>	35
2.3. Flotasyon Kinetiği.....	35
2.3.1. Kesikli hız sabitleri.....	38
3. MATERYAL VE YÖNTEM	42
3.1. Malzeme.....	42
3.2. Yöntem.....	43
3.2.1. Flotasyon çalışmaları	43
3.2.2. İstatiksel deney tasarımı	46
3.2.3. Sonuçların incelenmesi.....	47
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	49
4.1. Deneysel Bulgular	49
4.1.1. Flotasyon verimi üzerindeki etkiler	49
4.1.1.1. <u>Katı oranının etkisi</u>	49
4.1.1.2. <u>Karıştırma hızının etkisi</u>	52
4.1.1.3. <u>Toplayıcı miktarının etkisi</u>	53
4.1.1.4. <u>Hücre tipinin etkisi</u>	54
4.1.2. Flotasyon hızı üzerindeki etkiler	55
4.1.2.1. <u>Katı oranının etkisi</u>	55
4.1.2.2. <u>Karıştırma hızının etkisi</u>	56
4.1.2.3. <u>Toplayıcı miktarının etkisi</u>	58
4.1.2.4. <u>Hücre tipinin etkisi</u>	59
4.2. İstatiksel Analiz.....	60
4.2.1. R_{∞} değeri için sonuçların analizi ve modelleme.....	60
4.2.2. k değeri için sonuçların analizi ve modelleme	64

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	68
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Dünya Bakır-Çinko Üretimi (1950-2018)	6
2.2. Outotec flotasyon hücre kapasitesi (1970-2018)	8
2.3. Flotasyon kolonu (Courtesy Metso) a) Şematik gösterim b) Zenginleştirme tesisindeki flotasyon kolonu	10
2.4. Microcell (Courtesy Metso).....	11
2.5. Kavitasyon tüpü (CavTube) ve Kolondaki uygulaması (Cortesy Eriez Manufacturing Co.)	12
2.6. Reaktör-Ayırıcı flotasyon makinesinin ilk örneklerinden bir tasarım (Hebbard, 1913)	13
2.7. Davcra Hücre (Davis, 1969).....	14
2.8. Jameson Hücre (Jameson, 1990)	15
2.9. Contact Hücre (Amelunxen, 1993).....	16
2.10. V-tipi ve G-tipi Imhoflot hücre (Imhof vd., 2005).....	17
2.11. Aşamalı Flotasyon Reaktörü (SFR), Woodgrove Technologies	18
2.12. Flash Flotasyon Hücresi (MacKinnon vd., 2003).....	19
2.13. Hydrofloat (Cortesy Eriez Manufacturing Co.).....	20
2.14. StackCell® (Courtest Eirez Manufacturing Co.)	21
2.15. Concorde Hücre (Graeme J Jameson, 2010)	22
2.16. Reflux Flotasyon Hücresi (RFC) (Dickinson ve Galvin, 2014)	23
2.17. SuperCell® 600 m ³ (Courtesy FLSmidth)	25
2.18. Denver hücreden hücreye ve açık akışlı makinalar	26
2.19. Galigeher 42.5 m ³ Agitair Flotasyon makinası ve Agitar mekanizması (Gorain vd., 1997).....	27
2.20. Wemco Fagergren Hücresinin Şeması	28
2.21. SuperCell (Courtesy FLSmidth) flotasyon makinaları: (a) Kendinden havalandırma Wemco mekanizmalı ve (b) kompresörlü Dorr-Oliver mekanizmalı.....	29
2.22. FloatForce® mekanizmasına sahip TankCell® e500.....	30
2.23. Kavitasyon sınıflandırma.....	32
2.24. İlave hava olmadığı durumda, karıştırma ve çözünmüş havanın hava kabarcığı oluşumuna etkisi (1400 ml çeşme suyu, 1200 rpm, Denver hücre)(Zhou vd., 2005)	33
3.1. Modifiye flotasyon hücresi	43
3.2. Yöntemin şematik gösterimi.....	45
3.3. Modifiye hücre flotasyon deney düzeneği (1- Mikro-kabarcık üretici, 2- Kare kesitli flotasyon hücresi 3- Flotasyon makinası)	46
4.1. Klasik hücre çalışmalarında katı oranın verim üzerine etkisi.....	51
4.2. Modifiye hücre çalışmalarında katı oranın verim üzerine etkisi	51
4.3. Klasik hücrede çalışmalarında karıştırma hızının verim üzerine etkisi.....	52
4.4. Modifiye hücrede çalışmalarında karıştırma hızının verim üzerine etkisi	53
4.5. Klasik hücrede çalışmalarında toplayıcı miktarının verim üzerine etkisi	53
4.6. Modifiye hücre çalışmalarında toplayıcı miktarının verim üzerine etkisi.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.7. Hücre tipinin verim üzerindeki etkisi	55
4.8. Klasik hücre çalışmalarında katı oranının flotasyon hızı üzerindeki etkisi	56
4.9. Modifiye hücre çalışmalarında katı oranının flotasyon hızı üzerindeki etkisi	56
4.10. Klasik hücre çalışmalarında karıştırma hızının flotasyon hızı üzerindeki etkisi	57
4.11. Modifiye hücre çalışmalarında karıştırma hızının flotasyon hızı üzerindeki etkisi ...	57
4.12. Klasik hücre çalışmalarında toplayıcı miktarının flotasyon hızı üzerindeki etkisi	58
4.13. Modifiye hücre çalışmalarında toplayıcı miktarının flotasyon hızı üzerindeki etkisi	59
4.14. Hücre tipinin flotasyon hızı üzerindeki etkisi	59
4.15. R_{∞} değeri model tahmin değerleri-deneysel veriler uyum grafiği.	61
4.16. R_{∞} değeri parametrelerin ana etki grafiği a) Klasik flotasyon hücresi b) Modifiye flotasyon hücresi	62
4.17. R_{∞} değerine hücre tipinin ana etki grafiği	63
4.18. R_{∞} değeri Karıştırma hızı-toplayıcı miktarı etkileşim grafiği a) Klasik flotasyon hücresi b) Modifiye flotasyon hücresi	63
4.19. k değeri model tahmin değerleri-deneysel veriler uyum grafiği.	65
4.20. k değeri parametrelerin ana etki grafiği	65
4.21. k değerine hücre tipinin ana etki grafiği	66
4.22. k değeri üzerindeki toplayıcı miktarı-karıştırma hızı etkileşim grafiği a) Klasik flotasyon hücresi b) Modifiye flotasyon hücresi	67
4.23. k değeri üzerindeki hücre tipi-toplayıcı miktarı etkileşim grafiği	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. BHP firmasının üretim oranları ve karları (1886-1902).....	3
2.2. Broken Hill'deki Zenginleştirme raporu, 1990	4
2.3. Flotasyon makinesi teknolojisindeki gelişmeler.....	7
2.4. 1980 Sonrası Flotasyon makinaları	9
3.1. Bağımsız parametreler ve seviyeleri.....	47
4.1. Deney sonuçları	50
4.2. R_{∞} değeri için indirgenmiş ANOVA Çizelgesi	61
4.3. k değeri için indirgenmiş ANOVA Çizelgesi.....	64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
C	Flotasyon konsantresi
T	Flotasyon süresi
k	Flotasyon hız sabiti
R	Flotasyon kazanımı
R_{∞}	Elde edilebilecek maksimum verim
$f(k)$	Flotasyon hız sabiti fonksiyonu
K_B	Ortalama flotasyon hız saibiti
G_{fr}	Hava akış hızı
H	Flotasyon hücresinin yüksekliği
d_b	Hava kabarcığı çapı
V_{cell}	Flotasyon hücresinin hacmi
E_c	Tane-Hava kabarcığı karşılaşma verimliliği
E_a	Tane-Hava kabarcığı bağlı kalma verimliliği
Φ	Hız sabiti fraksiyon oranı
α	Her bir aksenel noktaya olan uzaklık
R^2	Korelasyon katsayısı
PR^2	Tahmin edilen korelasyon katsayısı
<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
MSC	The Mineral Seperation Company
BHP	Broken Hill Proprietary Company Limited

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Flotasyon, minerallerin fiziko-kimyasal yüzey özelliklerinin farkından faydalanan bir zenginleştirme yöntemidir. Günümüzde yüksek tenörlü cevherlerin azalması, serbestleşmesi için daha ince öğütme gerektiren düşük tenörlü cevherlerin zenginleştirilmesini gerekli hale getirmiştir. Diğer zenginleştirme yöntemlerinin çoğunun etkinliği tane boyutundaki küçülmeye paralel olarak azalmaktadır. 100-200 mikron tane boyutu aralığı için flotasyon oldukça etkili bir zenginleştirme yöntemidir. Ancak tane boyutu 20 mikronun altına düşmeye başladığında, tanecik hava kabarcığı karşılaşma ve çarpışma olasılıkları düşmekte ve bu da flotasyon olasılığını düşürmektedir (Clift vd., 1978; Dobby ve Finch, 1987; Feng ve Aldrich, 1999; Kantarci vd., 2005; Subrahmanyam ve Forsberg, 1990; Tao, 2005; Woodburn vd., 1971). Dolayısıyla, günümüzde halen en yaygın olarak kullanılan hücrelerden olan mekanik hücreler (Souza Pinto vd., 2018) 20 mikron altı tanelerin flotasyonunda etkin değildir. Bu probleme yönelik araştırmalar sonucunda ince tane flotasyon hücreleri (Jameson hücresi, Microcell vb.) geliştirilmiştir. Ancak bu hücreler sadece ince tanelerin flotasyonunda etkin olabilmektedir. Ayrıca, 1 mm'nin altında ince hava kabarcıkları ile ince taneciklerin daha etkin bir şekilde yüzdürülmesi, araştırmacıları daha ince hava kabarcığı elde etmek için kabarcık üreteçleri geliştirmeye yönlendirmiştir. Calgaroto vd. (2015) çalışmalarında, ince hava kabarcığının sadece çok ince tanelerin değil, -0,2 mm boyutundaki tanelerin de flotasyon etkinliğini arttırdığını rapor etmişlerdir. Ahmadi vd. (2014) venturi tüpü prensibine dayalı benzer bir çalışma yayınlamıştır. Bununla birlikte, bahsedilen çalışmaların ikisinde de kullanılan yöntemler laboratuvar ölçekli ve endüstriyel uygulaması zor olan süreçlerdir; dolayısı ile soruna endüstriyel ölçekli bir çözüm üretememiştir. Endüstriyel ölçekte en iyi çözüm ise, ince kabarcık üretiminde kavitasyon tüplerinin kullanılması olarak görülmektedir. Bunun sebebi, bu tür ekipmanların uygulanmasının ve kontrolünün kolay ve ilk yatırım masraflarının düşük olmasıdır (Brennen, 2014; Wu vd., 2012). Ancak kavitasyon tüpleri endüstriyel ölçekte kolonlarda uygulanmaktadır.

Bu çalışmada, endüstride oldukça yaygın ve yapısal özellik ve maliyetler açısından modifikasyona uygun olan mekanik hücre temel alınmıştır. Bu çalışma kavitasyon

prensiplerinden yararlanarak ince (yaklaşık 0,6-0,8 mm) hava kabarcığı üreten bir mikro-kabarcık üretici tasarlanıp, üretilmiş ve klasik mekanik flotasyon hücresine monte edilmiştir. -0,15 mm boyutlu yüksek saflıkta kuvars kullanılarak, elde edilen modifiye hücre ve aynı koşullarda klasik flotasyon hücresi ile flotasyon çalışmaları yapılmış ve elde edilen sonuçlar, toplam verim ve hız sabiti olan “k” için karşılaştırılmıştır. Katı oranı, karıştırma hızı ve toplayıcı miktarı etkilerinin incelendiği flotasyon deneylerinin planlanmasında istatistiksel tasarım yöntemlerinden yararlanılmış, sonuçların istatistiksel analizi ve sürecin modellenmesi de yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Mineral endüstrisinde 1850'lerde 200 yıllık bir teknolojik durgunluk yaşanmaktaydı. O zamana kadar yapılmış en son yenilikler: 16.yy da su gücünü kullanan kırma öğütme makinaları, 17.yy da barutla patlatma ve alaşımlandırmaydı. Bu gelişmeler endüstrinin artan metal ve mineral ihtiyacından kaynaklanan problemleri karşılayacak donanımına sahip değildi. 1850-1900 arasında yeni bir teknolojik değişim gerçekleşti; kara barut, el arabası, ezme değirmen ve sulama kanalları döneminden dinamitler, ekskavatörler, bilyalı değirmenler ve Wilfey masaları dönemine geçildi. Bu kadar yeniliğe rağmen ince taneler gravite ayırmayla konsantreye taşınırken problem yaşanıyordu, verimler çok düşüktü. Ancak yüksek tenörlü cevher rezervlerinin azalmasından dolayı birçok metalin üretimde iri taneli cevherlerin yerini ince taneler almaya başlamıştı. Bu durum Avusturalya'daki BHP firmasının üretim verilerini gösteren Çizelge 2.1'de görülmektedir. BHP firmasının ürettiği cevher miktarları artmasına rağmen, kar payları giderek azalmaktaydı.

Çizelge 2.1. BHP firmasının üretim oranları ve karları (1886-1902)

Yıllar	1886	1888	1890	1892	1894	1896	1898	1900	1902
Madencilik yapılan miktar (Kiloton)	10	80	170	300	590	440	400	520	660
Kar payı ve ekstralar(A\$*1000)	50	370	1000	800	580	420	280	180	100

Kaynak: (A J Lynch vd., 2007)

BHP firması Broken Hill'de madencilik yapmaya 1886'da başladı, ilk yıllarda gümüş ve kurşun bakımından zengin olan yüzeydeki iri taneli cevherleri çıkarıldığı için kar oranları çok yüksekti. Yüzeydeki gümüş ve kurşun bakımından zengin iri taneli oksitli cevherler tükenmeye başladığı zaman kazançları giderek düşmeye başlamıştı ve bu durum Broken Hill'de ince taneli sülfürlü cevherlerin işlenmesi zorunluluğunu ortaya çıkarmıştı. Ancak

değirmenlerden elde edilen ince taneli sülfürlü kurşun-gümüş cevherlerinde gravite ayırma işlemi uygulandığı zaman cevherin hemen hemen tamamı artığa gitmekteydi. Bu durum Çizelge 2.2’de görülmektedir.

Çizelge 2.2. Broken Hill’deki Zenginleştirme raporu, 1990

ÜRÜN	Ton	Analiz			İçerik		
		Pb, %	Ag, oz	Zn, %	Pb, %	Ag, %	Zn, %
Kurşun konsantresi	11,141	60.6	19.6	10.4	69.2	49.8	12.8
Atık	37,936	7.8	5.8	20.8	30.8	57.2	87.2
İşlenmemiş cevher	49,037	19.9	9.9	18.5	100	100	100

Kaynak: (Oliver Holmes Woodward, 1952)

1850-1900 arasında sülfürlü cevherleri zenginleştirmek ve ince taneli cevherleri kazanabilmek için yeni bir yöntem arayışı başladı. Yapılan araştırmalar sonucunda aranan cevabın flotasyon olduğu anlaşılmıştı.

Flotasyon, minerallerin yüzey özellik farklılıklarından faydalanan fiziko-kimyasal bir ayırma yöntemidir. Mineralleri yüzey özelliklerinden faydalanarak ayırma fikri ilk olarak Haynes’in patentli çalışmasında (Haynes, 1860) görülmesine rağmen, flotasyona benzer bir sürece, “kumdaki altın tanelerini ayırmak için yağlı bir maddenin kullanılması”, ilk defa antik Yunan’da MÖ 5.yy da Herodot’un “Historiae, Book IV” isimli yapıtında rastlanmaktadır (Glembotskii vd., 1972). İlk ticari flotasyon tesisi 1877’de Almanya, Dresden’de Bessel kardeşler tarafından grafit cevherini temizlemek için kurulmuştur (Graichen, 1977). Bessel kardeşler kadar ticari bir başarı olmasa da ilk sülfür cevheri flotasyon tesisi de Carrie Everson çalışmasına dayanmaktadır.

Everson (1886) patentli çalışmasında sülfürlü mineralleri zenginleştirmeyi başarmıştı (Everson, 1886). Bu çalışmada Everson, toz haline getirilmiş cevheri bir asit çözeltisinde bir miktar yağ ile karıştırarak sülfürleri yüzdürmüştür. Everson’un yaptığı bu çalışma gereken finansal kaynağı bulamadığı için laboratuvar ölçeğinde kalmasına rağmen, ileride birçok araştırmacıya ilham kaynağı olmuştu. Elmore (1898), patentli çalışmasında toz halindeki sülfürlü cevhere yağ ekleyip aglomere ederek yüzdürmüş ve gang minerallerini yıkayarak uzaklaştırmıştır (Elmore, 1898). Elmore’un bu süreci sülfürlü cevherlerin

yüzdürülmesinde yaygın olarak kullanıldı. Bu yöntem ilk başarılı sülfürlü cevher yöntemi olsa da yapılan işlem günümüzde kullandığımız köpük flotasyonu değildi. O zamanlar hava kabarcığının önemli bir faktör olduğu gerçeği henüz keşfedilememişti ve 1900'e kadar hava kabarcığını sadece Bessel kardeşler kullanmıştı.

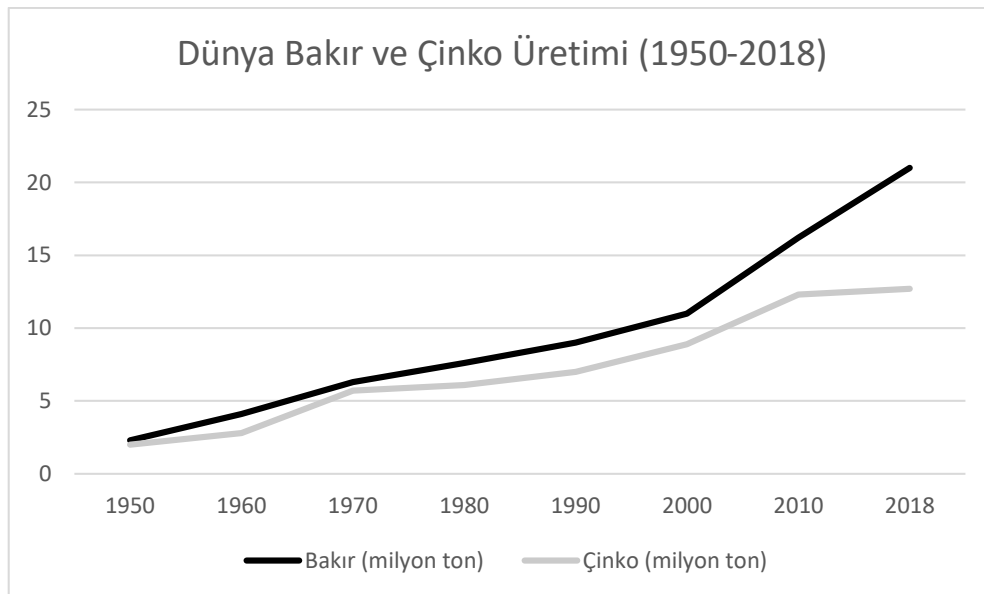
İtalya'da mühendis olarak çalışan Froment (1902) sülfür tanelerini yüzdürmek için hava kabarcığı kullanımının patentini aldı (Froment, 1902). Froment aynı zamanda sülfürik asit ve kireç taşı kullanarak CO₂ üretmeyi başarmıştı (Hoover, 1914).

1900'lerin ilk yıllarındaki artan refah düzeyi ile birlikte manyetik ayırma ve henüz etkinliği ispat edilmemiş olan flotasyon yöntemlerine büyük yatırımlar yapılmıştı. Bu yatırımları yapan büyük firmalardan biri de Avusturya Broken Hill'deki BHP firması idi. Yukarıda da bahsettiğimiz gibi ince taneli sülfürlü cevherlerini konsantre etmenin bir yolunu bulmaları gerekiyordu. Broken Hill'deki mühendisler, bunun için birçok yeni yöntem ve makinalar denediler (Woodward, 1965).

Potter (1902) ve Delprat (1903) Broken Hill'deki karbonat içeren gravite yöntem artığından oluşan sıcak pülpe asit ekleyerek hava kabarcığı ürettiler, böylece çinko cevherini yüzdürmeyi başardılar (Delprat, 1903; Potter, 1902). Potter'ın bu yönteminin ömrü kısaydı, çünkü yüksek miktarda asit kullanımı ve 82°- 88° C pülpte çalışmak çok maliyetliydi. Buna rağmen yöntem 1902'den 1923'e kadar çalışmaya devam etti. Ton başına 12 kg asit tüketildi ve 300 000 ton atıktan yıllık 90 000 ton çinko konsantresi elde edildi (Lynch vd., 2007). Bir diğer denemede Elmore 1904'te asit uygulanmış artığa bir miktar yağ ekleyip, pülpe 500 mm civa basıncında vakum uygulayarak elde ettiği hava kabarcıklarıyla sülfür tanelerini yüzdürmeyi başardı (Elmore, 1906). Elmore'un bu yöntemi vakum flotasyonu olarak bilinmektedir. MSC (The Mineral Separation Company) firması cevher hazırlama üzerine uzmanlaşmış bir firma olarak Broken Hill'deki sorunları çözmek için çalışmalar gerçekleştirmişti. Yaptıkları bazı denemeler başarısız olsa da, sülfürlü cevhere aglomere edecek kadar yağ katıp, pülpü hızlı bir şekilde karıştırıp, sülfür tanelerini köpüğe taşımayı başarmışlardı (Cattermole, 1904). BHP mühendisleri, bu yöntemi sonraları karıştırılmalı flotasyon hücrelerinde kullandı. Artık sülfürlerin zenginleştirme problemi çözülmüştü. BHP mühendisleri için diğer bir araştırma konusu ise sülfürlerin seçimli olarak yüzdürülmesiydi. Bunun için bastırıcı ve canlandırıcı gibi çeşitli kimyasal flotasyon reaktifleri araştırılmaya başlandı. Bu araştırmalardan elde edilen başarılı sonuçlarla, flotasyon esnek olmayan bir

yığın yönteminden, ayrı ayrı her bir mineralin zenginleştirilmesine uygulanabilecek bir yönteme dönüştü. Avusturalya Broken Hill’de başlayan flotasyondaki teknolojik gelişim, Avrupa’da öncelikli olarak kömür flotasyonu, Amerika’da bakır flotasyonu ve Kanada’da çinko ve kurşun flotasyonunda devam etti.

1925-1950 arası, 2. Dünya savaşı ve 1929 büyük buhranından dolayı Flotasyon teknolojisi alanında çok durgun geçmişti. 1950’den sonra, çoğunlukla flotasyon yöntemi ile üretilen metallerin (bakır ve çinko) üretimindeki artışla (Şekil 2.1) beraber flotasyon sürecinde birçok gelişme yaşandı. Bu gelişmeler, flotasyon makineleri, kimyasal reaktifler, kontrol ve analiz sistemleri olarak sınıflandırılabilir. Bu çalışmada flotasyon makinelerindeki teknolojik gelişmeler detaylı incelenecektir.



Şekil 2.1. Dünya Bakır-Çinko Üretimi (1950-2018)

2.1 Flotasyon Makinelerindeki Gelişim

Flotasyon makinelerinin gelişimine bakıldığında hava kabarcığı üretim teknolojisindeki gelişimi izlediği görülmektedir. Bunun sebebi ise flotasyon makinelerinin 3 temel fonksiyonu gerçekleştirmesinin beklenmesidir. Bunlar

- i. Uygun boyutta (0.5-2mm) yeteri kadar hava kabarcığı üretimi
- ii. Katının düzgün bir şekilde dağılımı

- iii. Taneler ile hava kabarcığının etkili bir şekilde karşılaşmasının sağlanması ve dengeli bir köpük zonu oluşturulması (Lynch vd., 2007).

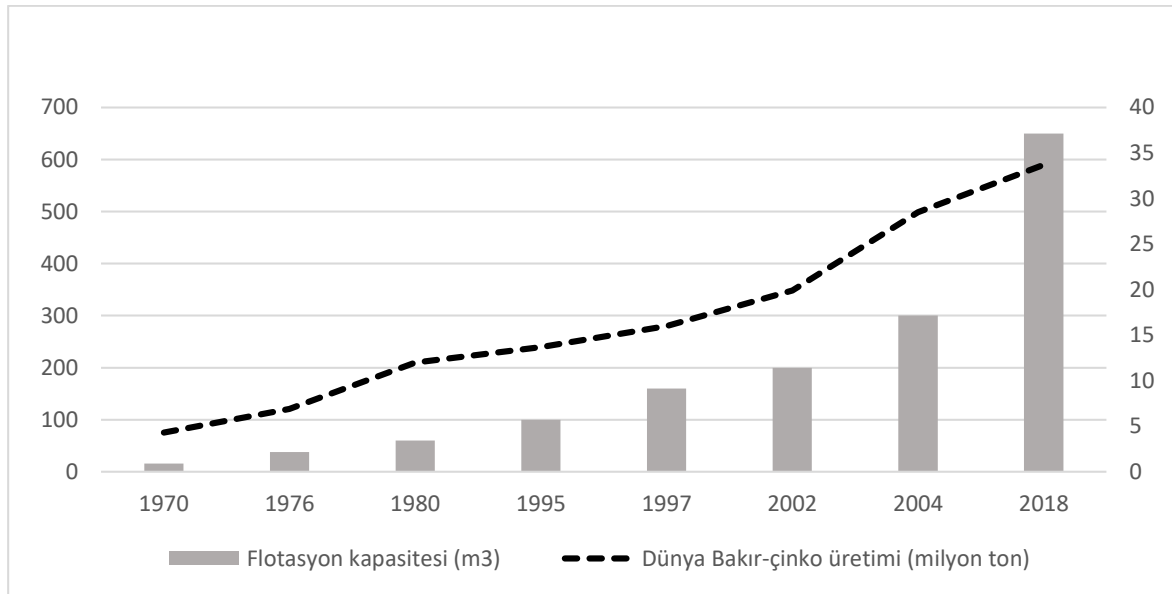
Buna göre flotasyon makinesindeki gelişmeler başlangıçta sadece hava kabarcığı üretimine bağlı olarak ilerlemiştir. Hava kabarcığı ile ilgili problemin çözülmesini takiben flotasyon uygulamalarının oldukça yaygınlaşması ile 1980'lerden sonra, bir taraftan üretimdeki kapasite artışına paralel hücre kapasiteleri büyürken, diğer taraftan da özellikle ince tanelerin etkin şekilde yüzdürülmesine yönelik farklı makineler üretilmeye başlanmıştır.

1911'e kadar hava kabarcığı oluşturma yöntemlerindeki gelişmeler ve bununla birlikte üretilen flotasyon makinesi türleri kronolojik olarak Çizelge 2.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Flotasyon makinesi teknolojisindeki gelişmeler

Yıl	Hava kabarcığı üretme yöntemi	Flotasyon türü
1904	Elektroliz	Elektroflotasyon
1904	Basınç düşürme	Vakum flotasyonu
1905	Karıştırma ile hava dağılımı	Mekanik hücre
	Basınç uygulamak	Çözünmüş hava flotasyonu
1911	Spargerler ile hava dağılımı	Pnömatik hücre

1970'lerden günümüze artan metal talebiyle birlikte, kontrolünün daha kolay yapılabilmesi, yatırım maliyetlerinin düşük olması, tesiste kapladığı yerin az olması ve bakım masraflarının düşük olması gibi faydaları nedeniyle flotasyon hücre kapasitesi giderek artmıştır (Clift vd., 2000). Şekil 2.2'de *Outotec* firmasının ürettiği makinelerde flotasyon hücre kapasitelerindeki artış yıllara göre grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Outotec flotasyon hücre kapasitesi (1970-2018)

Geleneksel klasik hücrelerdeki başarılarla birlikte 1980 sonrası birçok araştırmacı tarafından yeni flotasyon makineleri üretilmiştir. Geliştirilen başlıca flotasyon makinaları, kronolojik olarak Çizelge 2.4'te verilmiştir. Çizelge 2.4'te verilen flotasyon makinaları incelendiğinde, ortak özelliklerinin daha ince hava kabarcığı üretmeye yönelik tasarlanmaları olduğu görülmektedir. Bunların yanında statik karıştırıcılar veya venturi tüpleri yardımıyla ince hava kabarcığı üretme, atıkların geri beslenerek değerli minerallerin yakalanması, yıkama suyu ile köpük zonuna sürüklenen gang minerallerin uzaklaştırılması gibi farklı gelişmeler de olmuştur. Yeni tasarlanan makinalardaki gizli bir özellik ise hidrodinamik kaviteasyonun rolüdür (Lynch vd., 2007).

Bu çalışmada günümüze kadar geliştirilen flotasyon makinaları flotasyon kolonu, reaktör/ayırıcı makinalar, özel tasarım makinalar ve mekanik flotasyon hücresi olarak sınıflandırılıp, tasarımlarına kısaca değinilecektir. Mekanik flotasyon hücresi ise detaylı bir şekilde incelenecektir.

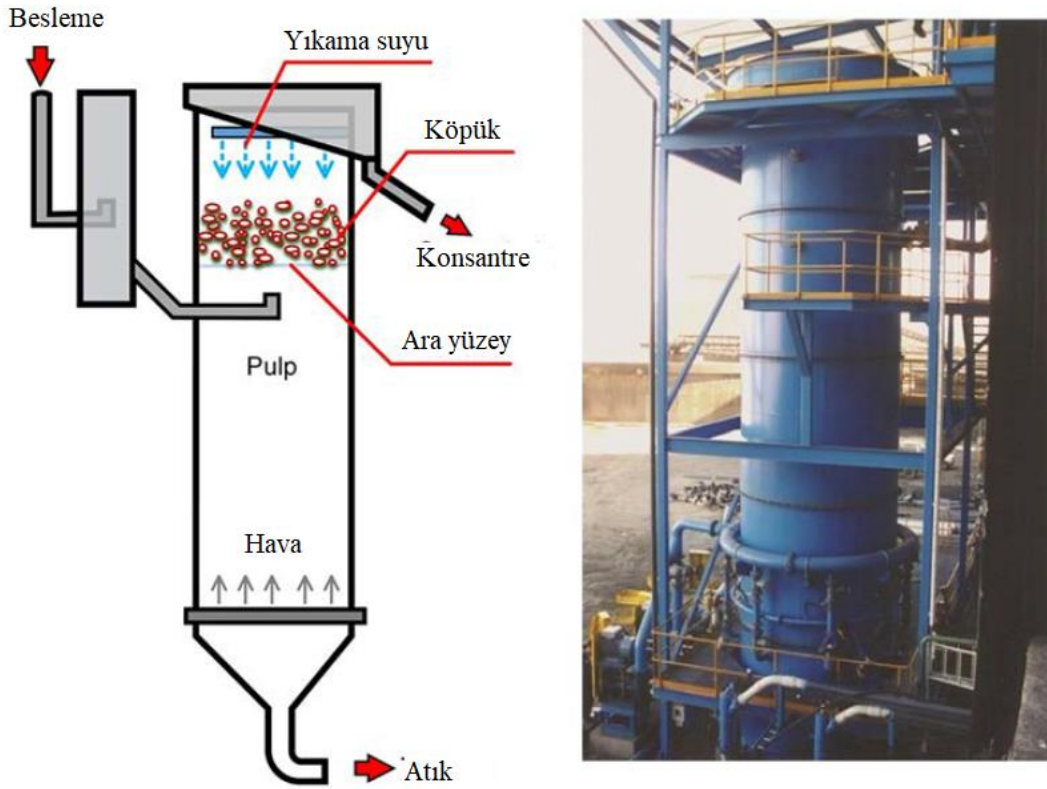
Çizelge 2.4. 1980 Sonrası Flotasyon makinaları

Makine	Özellik	Buluşu yapan
Spargerlı hidrosiklon	Santrifüj güç, porozlu silindir havalandırma	(Miller, 1981)
Pnömatik hücre	Basınçlı havalandırma	(Bahr vd., 1985)
Packed kolonu	Sınırsız köpük yüksekliği	(Yang, 1982)
Jameson hücresi	Kendinden aspirasyon- jet şlam akışı	(Jameson, 1990)
Microcell	Statik karıştırıcı- atık geridönüşümü	(Yoon vd., 1992)
Contact hücre	Besleme havalandırma	(Amelunxen, 1993)
USBM Rapid cell	Statik karıştırıcı	(Hood ve Jordan, 1993)
Ken Flote	Çözünmüş hava ile şartlandırma	(Parekh vd., 1998)
Rapid flotasyon kolonu	Beslemeyle havalandırma- atık geri dönüşüm	(M Xu vd., 1994)
Yeni jenerasyon	Hidrodinamik kaviteasyon	(Zhou vd., 1997)

2.1.1 Flotasyon kolonu

Flotasyon kolonunun endüstriye başarılı bir şekilde uygulaması 1980'lerin başlarında gerçekleşmesine (Cienski, 1981) rağmen, konseptin patenti Boutin ve Tremblay tarafından 1964'de alınmıştır. Adından da anlaşılacağı gibi, bu hücre yüksek bir kolondan oluşmaktadır. Flotasyon kolonunun şematik gösterimi ve çalışan bir flotasyon kolonu sırasıyla Şekil 2.3 (a) ve (b)'de verilmektedir. Şekil 2.3'ten de görüldüğü gibi; hava kabarcığı üretimi kolonun alt kısımlarına yerleştirilmiş beslenen havayı parçalayan kabarcık üreteçleri (spargerlar) ile gerçekleştirilmekte ve gang minerallerinin hava kabarcığıyla taşınmasını engellemek için üst kısmında köpük yıkama sistemi bulunmaktadır. Kolonlar mekanik flotasyon hücrelerine göre çok daha derindir: mekanik hücrelerin yüksekliği 0.5 – 2 m arasında iken endüstriyel kolonların yüksekliği 9-14 m arasında, çapı iste 2 – 4 m arasında değişmektedir. Kolonlarda genelde pozitif biasla çalışılmaktadır, yani aşağı doğru net bir sıvı akışı vardır, böylece hava kabarcığıyla sürüklenen gang minerallerin köpük zonuna erişimi engellenir ve daha istikrarlı bir köpük zonu elde edilmektedir.

Son yıllarda kolon teknolojisinde ince tanelerin flotasyon verimini artırmaya yönelik iki gelişme olmuştur: Bunlardan ilki köpük yıkama teknolojileri, diğeri ise ince ve çok ince hava kabarcığı üreteçleridir. Kolona ince hava kabarcığı üretmek için monte edilen “*Microcell*” ve “*kavitasyon*” cihazları, birim başına flotasyon verimini iyileştirdiğinden dolayı, flotasyon kolonlarını, temizleme devrelerinde yeni nesil mekanik tank hücreleriyle rekabet eder duruma getirmiştir.



Şekil 2.3. Flotasyon kolonu (Courtesy Metso) a) Şematik gösterim b) Zenginleştirme tesisindeki flotasyon kolonu

2.1.1.1 Microcel

Microcel teknolojisi, Virginia Polytechnic enstitüsünde Profesör Yoon vd. tarafından geliştirilmiştir (Yoon vd., 1992). Microcel sistemlerdeki sparger bir iç karıştırıcı ve santrifüj pompasından oluşmaktadır, kolonun tabanından çekilen şlam yüksek yoğunlukta basınçlı hava ile karıştırılarak kolon dışında mikron boyutta hava kabarcıkları oluşturulmaktadır (Brake, 1998; Phillips vd., 1997). Microcel sistemi Şekil 2.4’te görülmektedir.

Microcel sistemlerinin dünya çapında 100'ün üzerinde uygulaması vardır: kömürde tercih edilen bu sistemlerin kullanımı daha sonraları baz metaller için de yaygınlaşmaya başlamıştır.

Microcel, Antamina tesisinde bakır temizleme kolonunda ve molibden devrelerinde kullanılmış ve hava kabarcığı çaplarının 2.7-3.7 mm'den 1.6-2.6 mm'ye düştüğü gözlenmiştir. Yapılan bu microcel uygulamasıyla bakır veriminde %6, molibden kazanımında ise %20'lik bir artış sağlanmıştır (Lizama vd., 2008).

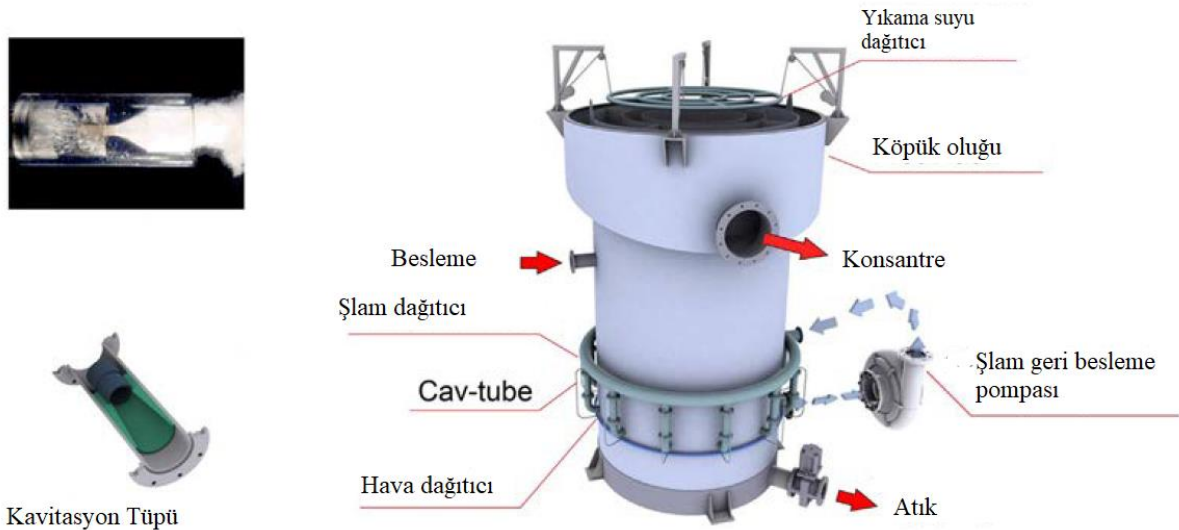


Şekil 2.4. Microcell (Courtesy Metso)

2.1.1.2 CavTube

Bu teknoloji, çok ince boyutta hava kabarcığı üretmek için hidrodinamik kavitasyonu kullanmaktadır. Hidrodinamik kavitasyonda çok ince hava kabarcıkları (picobubbles), özel olarak tasarlanmış spargerlarla hava-pülp karışımının birlikte pompalanması sayesinde üretilmektedir. CavTube cihazı Şekil 2.5'in sol panelinde görülmektedir ve flotasyon

kolonuna uygulaması ise sağ panelde görülmektedir. Çok ince hava kabarcıkları (pico-bubbles) saflaştırılmış su ve deniz suyunda doğal olarak bulunmaktadır ve daha büyük boyuttaki hava kabarcıklarına göre partiküllere daha kolay yapışmaktadır. Yapılan çalışmalar, kavitasyon ve mekanik sistemin birlikte çalıştığı durumda elde edilen flotasyon veriminin, yalnızca kavitasyon veya yalnızca mekanik yoldan hava kabarcığı elde edilen bir sistemle çalışıldığında elde edilen flotasyon veriminden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Konu üzerindeki araştırmalar, verim artışının, çok ince hava kabarcıklarının mineral yüzeyini kaplayarak iri hava kabarcıklarının yüzeye adsorblanmasını güçlendirmesi sayesinde olduğunu göstermiştir (Krasowska ve Malysa, 2007; Maoming vd., 2010).



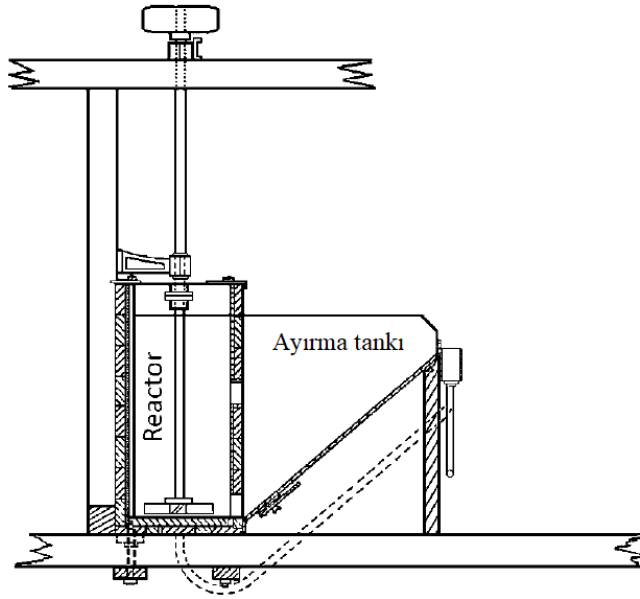
Şekil 2.5. Kaviteasyon tüpü (CavTube) ve Kolondaki uygulaması (Cortesy Eriez Manufacturing Co.)

2.1.2 Reaktör/Ayırıcı flotasyon makinaları

Geleneksel flotasyon makinalarında 2 fonksiyon tek bir haznede sağlanmaktadır. Bu fonksiyonlardan ilki yoğun karıştırma bölgesinde tane-hava kabarcığı karşılaşmasının ve yapışmasının gerçekleşmesi; ikincisi durgun bölgede tane-hava kabarcığı aglomerlerinin gangdan ayrılmasıdır. Reaktör/ayırıcı makinalarda bu fonksiyonlar 2 veya daha fazla kompartımana ayrılmaktadır. Bu makinalar, reaktör içerisinde türbülanslı karıştırmaya sahip olduğu için yüksek-yoğunluklu hücreler olarak isimlendirilmiştir ve hava kabarcığına yapışmış minerallerin atıktan ayrılması için gerekli zamanı sağlamaktadır. Bunun sonucunda

genellikle bekleme süresi (residence time) mekanik hücelere ve kolonlara kıyasla daha düşüktür.

İlk flotasyon makine tasarımları reaktör/ayırıcı makinelere benzemektedir. Şekil 2.6'da Hebbard (1913) tarafından patenti alınan flotasyon makine tasarımı görülmektedir. Bu makinede, tanecikler bir karıştırıcı reaktör içerisinde hava kabarcığı ile karıştırılarak, köpüğün üst akış olarak alındığı ayırma tankına beslenmektedir. Bu makine tasarımı, Mineral Separation Corporation tarafından üretilen ve Amerika'da ilk dönemlerde kullanılan flotasyon hücelerine temel teşkil etmiştir (Lynch vd., 2010).

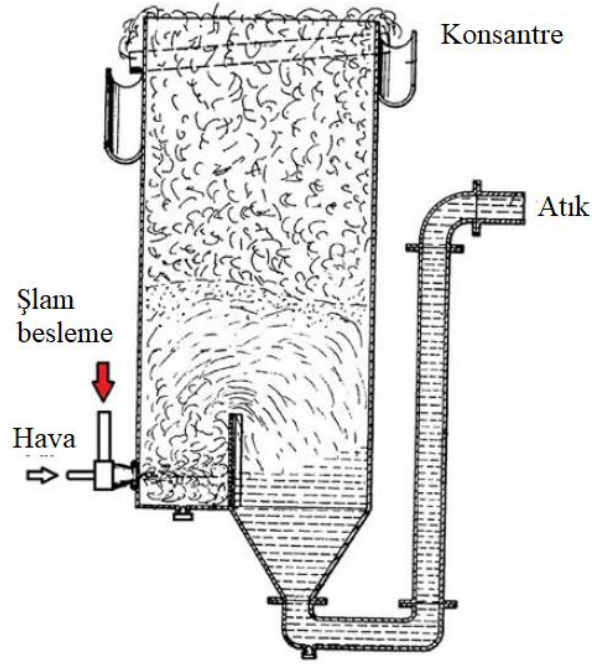


Şekil 2.6. Reaktör-Ayırıcı flotasyon makinesinin ilk örneklerinden bir tasarım (Hebbard, 1913)

2.1.2.1 Davcra hücre

Davcra Hücresi 1960'larda geliştirilmiştir ve ilk yüksek-yoğunluklu hücre olarak bilinmektedir. Bu tasarım, kolon hücre veya reaktör/ayırıcı hücre olarak düşünülebilir. Şekil 2.7'den de görüldüğü gibi, hava ve pülp birleşip, siklon tipi bir dağıtma nozulu ile tanka enjekte edilmektedir, pülp jetinin enerjisi dikey bir çarptırma levhası sayesinde dağılmaktadır. Havanın dağılımı ve tanelerin hava kabarcıkları tarafından toplanması tankın yoğun karıştırma bölgesinde gerçekleşmektedir ve bu bölge çarptırma levhası ile ayrılmaktadır. Pülp çarptırma levhası üzerinden hava kabarcığı tanecik ayrımı için tasarlanan durgun bölgeye doğru hareket etmektedir. Davcra hücresi yaygın olarak kullanılmasa da

Zambiya'daki Chambishi bakır madeninde mekanik temizleme makineleri yerine kullanılmış ve operasyon maliyetlerini düşürdüğü, daha az yer kapladığı ve metalürjik performansı artırdığı rapor edilmiştir.



Şekil 2.7. Davra Hücre (Davis, 1969)

Araştırmacılar daha kompakt bir reaktör/ayırıcı makine tasarlamak için bir kaç denemede bulunmuştur ve bu makinelerin başarılı örneklerden biri de Jameson hücresidir (Cowburn vd., 2005; Jameson, 1990; Kennedy, 1990).

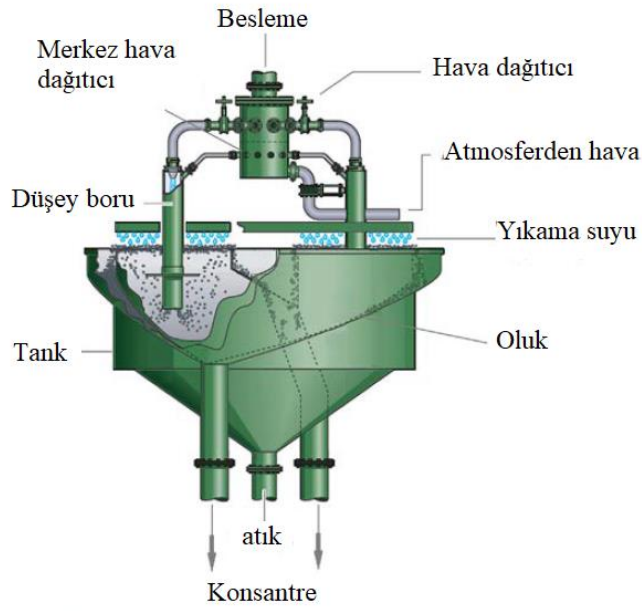
2.1.2.2 Jameson hücre

Avustralya'da kömür endüstrisinde 1980'lerden itibaren yaygın bir şekilde kullanılan Jameson hücre, Avustralya'da Mount İsa madeni ve Newcastle Üniversitesi iş birliği ile geliştirilmiştir. Hücre ilk olarak baz metaller için temizleme amaçlı kurulmuştur (Clayton vd., 1991; Harbort vd., 1994), bunun yanında kömür tesislerinde ön konsantre ve hazırlama kısımlarında da kullanılmıştır. Jameson hücre orijinal patentinde kolon olarak geçse de reaktör/ayırıcı makine olarak da düşünülebilmektedir. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi makinada pülp ve hava birlikte dikey bir boru ile kısa silindir şeklindeki ayırma tankının tabanına doğru beslenmektedir, burada hava kabarcığından ayrı tanecikler ayırma tankı tabanından

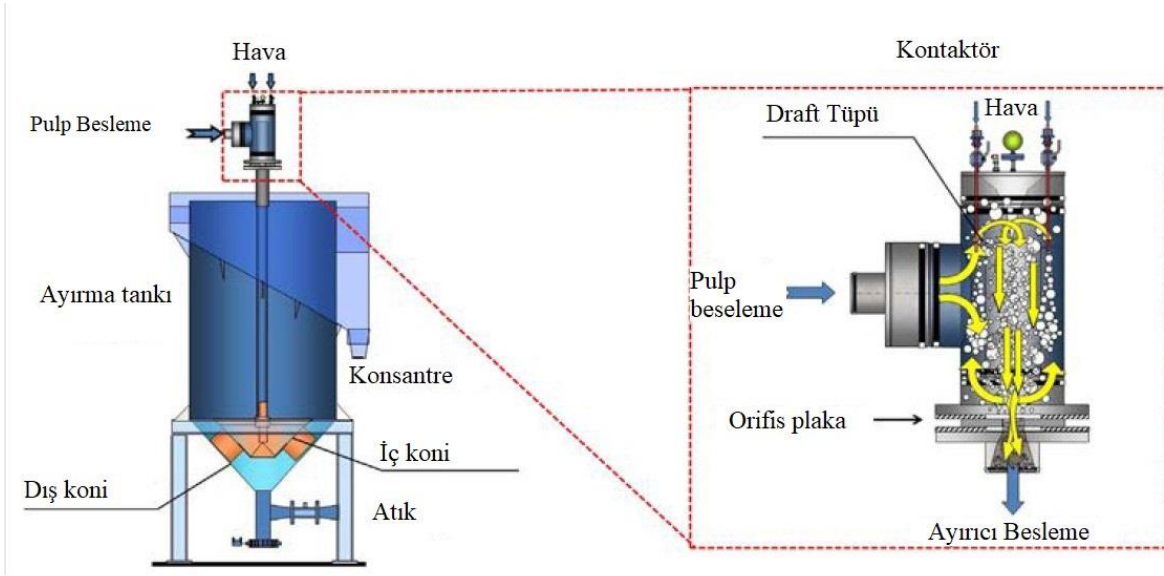
atık olarak alınırken, hava kabarcığı tarafından yakalanan taneler ayırma tankı üst akışından toplanmaktadır. Hava, daldırma jet sayesinde kendiliğinden beslenmektedir. Hava hızını etkileyen faktörler: jet hızı, katı yoğunluğu ve ayırma bölgesinin seviyesidir.

2.1.2.3 Contact hücre

Contact hücre 1980'lerde Kanada'da geliştirilmiştir (Amelunxen, 1993). Pülp beslemesi, orifis plaka ve draft tüpünden oluşan dış kontaktördeki basınçlı hava ile direk olarak bağlanmıştır (Şekil 2.9). Hava-pülp karışımı, kontakör ile hava kabarcığına yapışmış tanelerin köpük zonuna yükseldiği kolon tipi ayırma tankına beslenir. Contact hücrelerde geleneksel kolonlara ve Jameson hücrelere benzer bir köpük yıkama sistemi vardır.



Şekil 2.8. Jameson Hücre (Jameson, 1990)



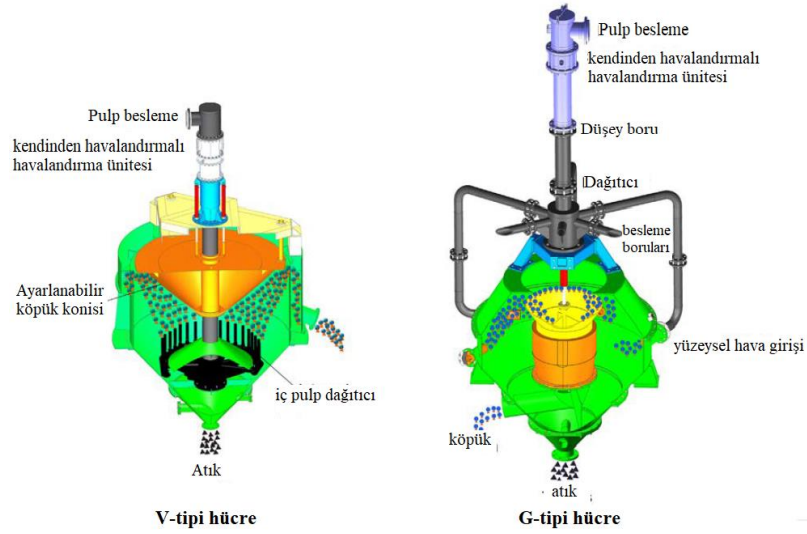
Şekil 2.9. Contact Hücre (Amelunxen, 1993)

2.1.2.4 Imhoflot

Ticari temini Maelgwyn Services Limited şirketi tarafından yapılan Imhoflot teknolojisi Dr Drainer Imhof tarafından, Almanya'da, Berlin ve Clausthal üniversitelerindeki önceki pnömomatik hücre çalışmalarından esinlenerek geliştirilmiştir (Imhof vd., 2005).

2 tür kendinden aspirasyonlu/havalandırmalı Imhoflot flotasyon hücresi geliştirilmiştir; bunlar: V-Cell (dikey beslemeli) ve G-Cell (yüzeysel beslemeli). Imhoflot pnömomatik hücrelerde hava kabarcığı ve taneciklerin yapışması, klasik hücrelerden farklı olarak hücre dışında havalandırma kısmında kendiliğinden gerçekleşmektedir. Imhoflot hücresinde hareketli bir parça bulunmamaktadır, mineral toplama için gerekli bütün enerji besleme pompası ve hacimsel olarak kısıtlı havalandırmadan gelmektedir. Böylece Imhoflot hücresi geleneksel hücrelere göre çok daha yüksek hold-up oranına sahip olmuştur. V tipi Imhoflot hücrelerinde ayırma zonu dik koni şeklindedir. Pülp bu koninin altından nozullarla yukarıya doğru, hava kabarcıklarıyla aynı yönlü olarak beslenir.

En büyük Imhoflot hücresi 1200 m³/saat kapasitesinde ve 5 m çapındadır. Kömür, baz metaller ve demir cevheriyle ilgili rapor edilmiş birçok başarılı Imoflot hücre flotasyon uygulamaları vardır (Imhof vd., 2005). V-tipi ve G-tipi hücrenin görüntüsü Şekil 2.10'da verilmektedir.

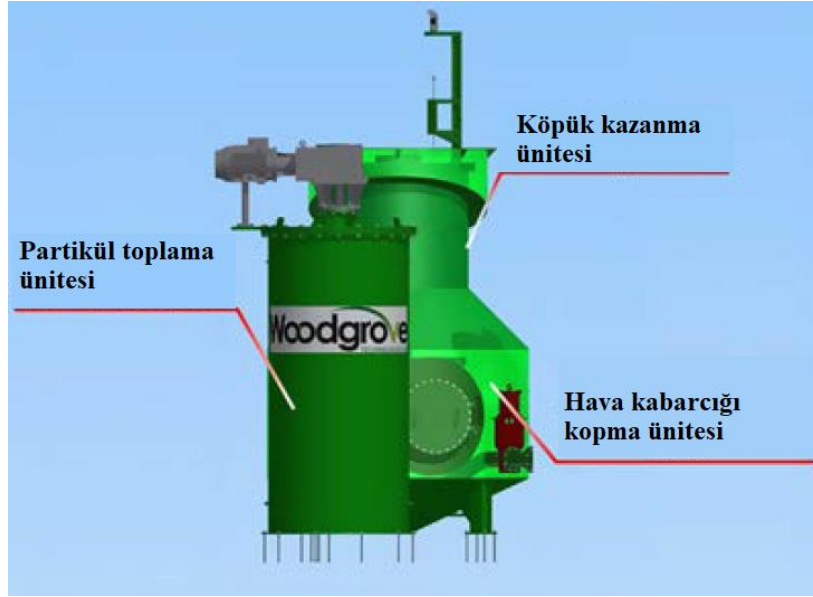


Şekil 2.10. V-tipi ve G-tipi Imhoflot hücre (Imhof vd., 2005)

2.1.2.5 Aşamalı flotasyon reaktörü (Staged Flotation Reactor, SFR)

Aşamalı flotasyon reaktörü (SFR), tanelerin toplanması, hava kabarcığı-atık ayırımı ve köpük kazanımı yöntemlerinin bölümlendirilip, her bir yöntemin ayrı bir haznede gerçekleştiği bir sistemdir (Şekil 2.11). SFR bu 3 ayrı yöntemi birbirinden bağımsız olarak optimize etmeyi amaçlamaktadır.

SFR’de sadece tanelerin toplanmasının gerçekleştiği ilk tank bir karıştırıcı içermektedir. Bu karıştırıcının görevi ilk haznede yüksek enerji yoğunluğu sağlayarak birçok tanenin yüksek kesme karıştırma zonuna geçmesini tetikleyip, toplama verimliliğini artırmaktır. Tanecikler, gravite ile hazneler arasında hareket etmektedir ve toplama tankı hariç diğer haznelerde ekstra bir karıştırıcıya ihtiyaç duyulmamıştır. 2. Tank havasızlandırma ile hava kabarcığı-tanecik kopmasını sağlamak ve böylece köpüğün herhangi bir engelle karşılaşmadan hızlı bir şekilde kazanılması için tasarlanmıştır. 3. aşama, köpük kazanımı köpük yıkanması ve yüksek katı akışı sağlamak için uyarlanmıştır. Bu reaktörlerin yüksekliği daha düşük olduğu için az yer kaplamaktadır ve az güç tüketmektedir. Bu avantajlarının yanında hem kaba hem de temizleme aşamalarında, tanelerin toplanması yüksek seçimlilikle ve verimli bir şekilde sağlanmaktadır.



Şekil 2.11. Aşamalı Flotasyon Reaktörü (SFR), Woodgrove Technologies

2.1.3 Özel tasarlanmış flotasyon makinaları

Kinetiğin düşük olduğu ince ve iri taneleri yüzdürmek için spesifik birkaç flotasyon makinası geliştirilmiştir. Bu bölümde bahsi geçen bu özel tasarım flotasyon makinaları ayrı ayrı incelenmektedir.

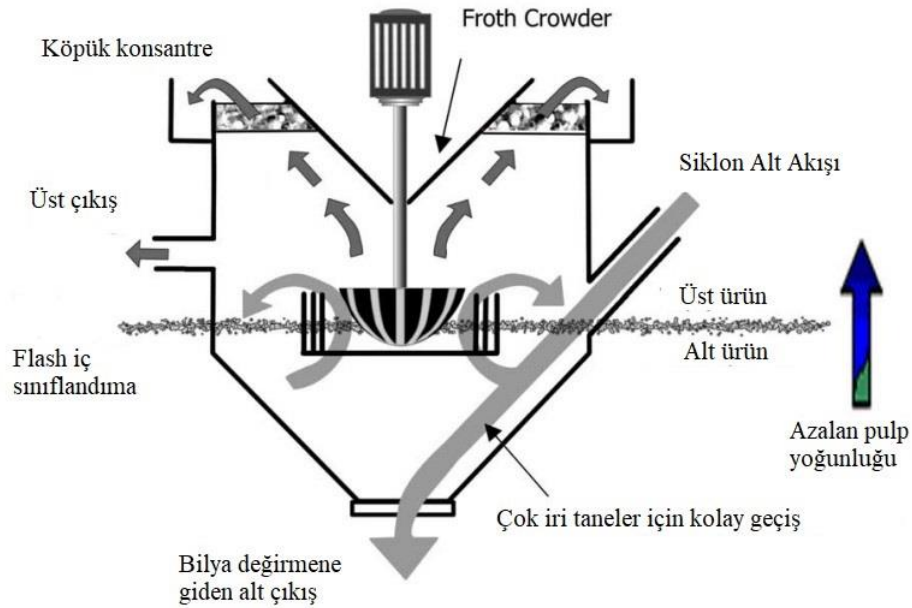
2.1.3.1 Flash flotasyon

Flash flotasyon ilk konsepti Alva (1933)'e aittir. Alva Garrett, Kuzey Broken Hill'de bilyalı değirmen çıkışının 7 hücrelik bir bankta direk olarak yüzdürüldüğü deneysel çalışmalar gerçekleştirdi; bu çalışmada ilk 3 hücreden elde edilen konsantre direk olarak nihai konsantre filtresine gönderilirken, kalan hücrelerinki ise ara ürün akışına yönlendirilmiştir.

Bu yöntemin amacı yüksek tenörlü iri taneleri yüzdürmektir. Genellikle tesis akım şemasında hidrosiklon alt akışı ve bilyalı değirmen arasına yerleştirilmektedir. Buradan elde edilen ürün tenörüne göre ya son konsantre olarak alınır ya da orta akışa gönderilmektedir. Flash hücreler; hidrosiklon alt akımında biriken, öğütme kinetiği düşük, serbestleşmiş metallerin iri boyutta kazanımı için kullanılmaktadır. Buna en iyi örnek altındır: Altın, haddelenebilme özelliği sebebiyle öğütme kinetiği düşük ve yüksek yoğunluğa sahip bir

metaldir, bu özelliklerinden dolayı değirmende geri besleme yükünde birikmektedir (Banisi vd., 1991). Şekil 2.12’de görüldüğü gibi Flash flotasyon hücresi eğimli bir tabana ve çok kaba tanelerin geçişine izin veren dikey bir çıkışa sahip olacak şekilde özel olarak tasarlanmıştır.

İlk zamanlarda flash flotasyon hücresi “birim hücre” olarak isimlendirilmekteydi. Flash flotasyonu, 1980’lerden günümüze kadar farklı operasyonlarda yaygın olarak kullanıldı ve eski konsantratörlerde yerini aldı.



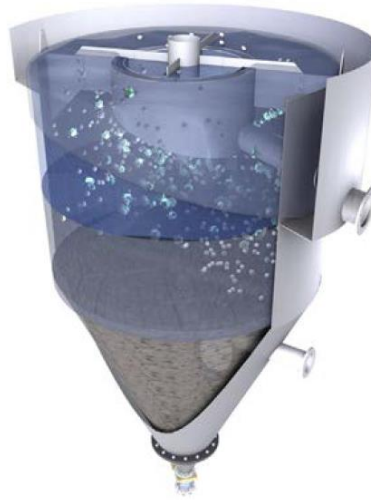
Şekil 2.12. Flash Flotasyon Hücresi (MacKinnon vd., 2003)

2.1.3.2 Hydrofloat ayırıcı

Hydrofloat, 1990’larda geliştirildi ve ilk olarak potasyum hidrat endüstrisinde iri taneleri yüzdürmek için kuruldu (Luttrell vd., 2006). Çökelmeleri engellemek için makinaya beslenecek +250 µm boyutunda pulp önceden hazırlanır, böylece iri tanelerin kazanılması için gerekli flotasyon prensipleri sağlanmış olur. Günümüzde Hydrofloat’ların kullanımı, iri potasyum hidrattan elmas, lityum alüminyum silikat ve vermikulit tanelerinin zenginleştirilmesine kadar yaygınlaşmıştır.

Hydrofloat teknolojisinin şeması Şekil 2.13 te görülmektedir. Şekil 2.13’te görüldüğü gibi, Hydrofloat, üst ayırma haznesi ve alt susuzlandırma haznesine sahip

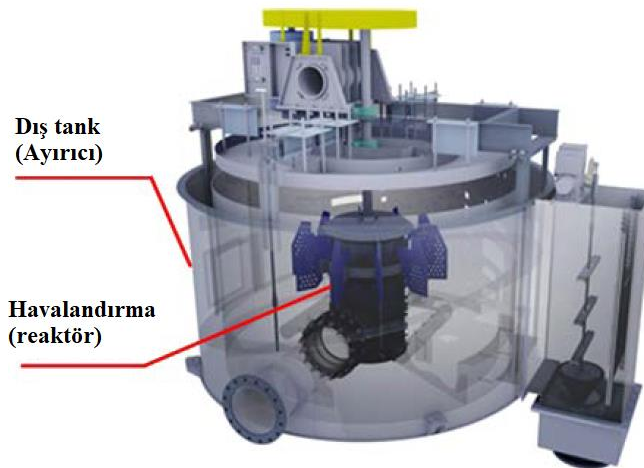
silindirik bir tanktan oluşmaktadır. Bu cihaz engelli çökeltme yataklı ayırıcılar gibi çalışmaktadır, besleme yukarı doğru akışkanlandırma suyunun akışının tersi yönünde yapılmaktadır. Akışkanlandırma suyu ayırma haznesinin bütün kesit alanı boyunca yerleştirilen boru ağı ile beslenmektedir. Basınçlı hava ve az miktar köpürtücü ilave edilmiş akışkanlandırma suyu karışımı sürekli olarak akışkan yatak içerisine enjekte edilmektedir. Hava kabarcığı, hidrofobik tanelere yapışıp akışkan yatağa doğru yükselirken yoğunlukları azalmaktadır ve bu taneler bu şekilde yüzmektedirler. Yoğun fazın kullanımı, akışkan yatakta aksenel karışımın engellenmesine, iri tanelerin kalma süresinin (residence time) artmasına ve böylece hava kabarcığı-tane etkileşimini tetikleyerek flotasyon hızının artmasını neden olmaktadır. Sonuç olarak hem tamamen serbestleşmiş taneler hem de yarı serbestleşmiş taneler için flotasyon hızının yüksek olduğu gözlenmektedir. Hidrofilik taneler hava kabarcıklarına yapışamaz, aşağı akışkan yatağa doğru sürekli olarak hareket eder ve susuzlandırma konisini içerisine yerleşirler. Bu taneler yüksek katı (%75 katı) akımıyla ayırıcının tabanındaki kontrol vanası ile alınır. Vana ayırma haznesi kenarına monte edilmiş basınç transformatörünün sinyaline bağlı olarak hareket eder. Bu konfigürasyon akışkan yatak içerisinde sürekli sabit bir katı yoğunluğu sağlamaktadır.



Şekil 2.13. Hydrofloat (Cortesy Eriez Manufacturing Co.)

2.1.3.3 StackCell®

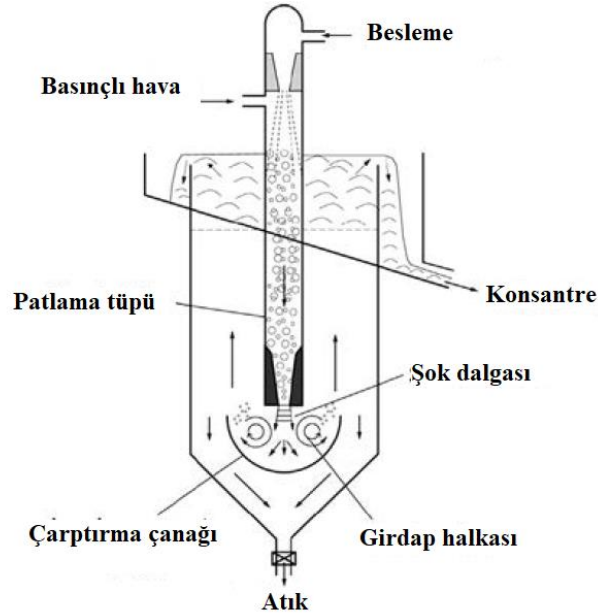
StackCell ince tane flotasyonu (-150 μ m) için geliştirilmiştir. İlk olarak kömür için kullanılan StackCell'in kullanımı zamanla bakır ve demir cevherlerine de yaygınlaşmıştır. StackCell hücresinde besleme pülpü düşük basınçlı hava ile karıştırılıp, bu karışım hücrenin merkezine yerleştirilen yüksek kesme kuvvetine sahip reaktöre doğru hareket eder. Bu sistem etkin bir tane-hava kabarcığı yapışması sağlar, taneciklerin toplanması için gerekli kalma süresini (residence time) büyük oranda düşürür ve böylece gerekli hücre hacmini azaltır. Flotasyon hızının; hava kabarcığı konsantrasyonu, hidrofobik tane konsantrasyonu ve enerjiyle orantılı olduğu bulunmuştur (Williams ve Crane, 1983). Kesme ve karıştırma sayesinde enerji havalandırma içinde yoğunlaşmaktadır ve sadece hava kabarcığı üretmek ve hava kabarcığı-tane karşılaşma olasılığını artırmak için kullanılmaktadır; bu nedenle Stackcell'de elde edilen flotasyon hızının geleneksel hücrelere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Pülp havalandırmadan çıktığı zaman dış tanka geçer ve burada pülp ile hava kabarcığına yapışmış tanelerin faz ayrımı gerçekleşir. Derin köpük zonu oluşturmak için gerekli olan Pülp seviyesi dış tankta sağlanır, ince tanelerin sürüklenmesini minimize etmek için oluşan köpüğe yıkama suyu tatbik edilir. Atık kontrol vanası ile atılırken taşan köpük oluklarla konsantre olarak alınır. Bu sistem özellikle daha az yer kaplayacak ve besleme sistemi graviteyle olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarım StackCell'in flotasyon devrelerine kolay bir şekilde yerleştirilmesine izin vermektedir. StackCell hücrenin şematik görüntüsü Şekil 2.14 te görülmektedir.



Şekil 2.14. StackCell® (Courtest Eirez Manufacturing Co.)

2.1.3.4 Concorde hücre

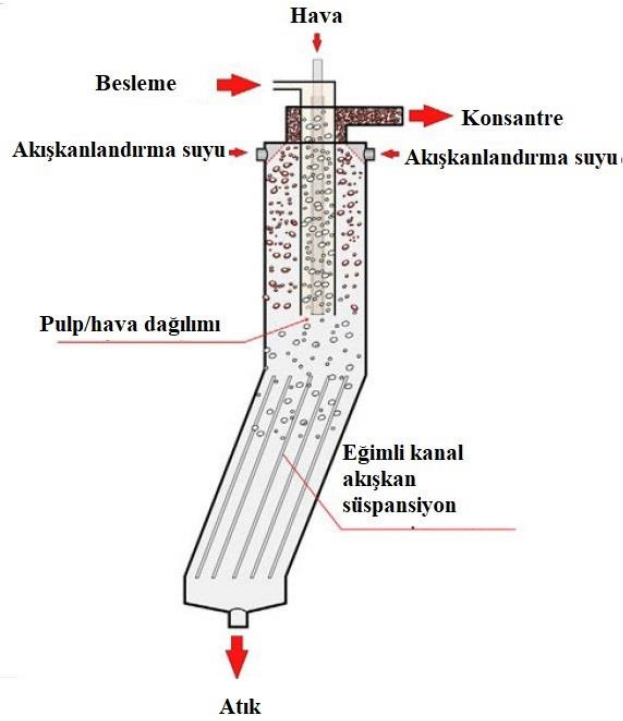
Concorde hücre özellikle 20 µm altı taneleri yüzdürmek için tasarlanmıştır. Concorde hücrenin şematik açıklaması Şekil 2.15'te görülmektedir. Bu hücre Jameson hücre gibi 2 aşamadan oluşmaktadır. İnce hava kabarcıkları basınç altında üfleme tüpü (blast tube) içerisinde oluşur (Jameson, 2010). Besleme, Jameson hücreye benzer şekilde hava ile karışarak dikey bir jet olarak yapılmaktadır; Jamesondan farklı olarak burada hava basınçla beslenmektedir. Pülp/hava kabarcığı karışımı bir patlama tüpünden geçerek hızlanmaya başlar ve ses hızını aşar (Jameson, 2010), böylece şok dalgası oluşur. Patlama tüpü içerisindeki ani basınç değişimi ince hava kabarcıklarının oluşmasına neden olur. Patlama tüpünden çıkan pülp/hava kabarcığı karışımı çarptırma çanağına doğru hareket eder ve böylece akım, ayırma tankı içerisinde yukarıya doğru yön değiştirir. Hava kabarcığına yapışmış olan taneler köpüğe ulaşır konsantre olarak alınırken, hava kabarcığına yapışmamış diğer taneler tankın altından atık olarak alınır. Bu sistemin pilot çalışması Güney Afrika'daki platin grubu metalleri üzerine yapılmıştır ve o zamanda mevcut bulunan mekanik hücrelere göre flotasyon hızınının 100 kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir (Jameson, 2010).



Şekil 2.15. Concorde Hücre (Graeme J Jameson, 2010)

2.1.3.5 Reflux flotasyon hücresi (RFC)

Reflux flotasyon hücresi (RFC), Concorde hücre gibi özellikle ince taneleri yüzdürmek için geliştirilmiştir (Dickinson ve Galvin, 2014). RFC'nin şematik açıklaması Şekil 2.16'da görülmektedir. Hava dikey besleme tüpüne yerleştirilmiş sinter kabarcık üretici (sparger) ile aşağı doğru beslenmektedir. Pülp dikey besleme tüpünden geçerek sparger üzerinden akar, bu süreçte hava kabarcıkları oluşur. Hava/Pülp karışımını aşağı doğru hareket ederek ayırma tankına ulaşır. Şekil 2.16'da görüldüğü gibi ayırma tankı alt kısmında atığın akışını sağlamak için paralel eğimli kanal bulunmaktadır. Bu eğimli kanal hava kabarcıklarının atık akışından ayrılmasını sağlar ve hava kabarcığına yapışmış tane kayıplarını engeller (Dickinson ve Galvin, 2014). RFC geleneksel makinalara kıyasla daha yüksek hava ve yıkama suyu akışı sağlar.



Şekil 2.16. Reflux Flotasyon Hücresi (RFC) (Dickinson ve Galvin, 2014)

2.1.4 Mekanik flotasyon hücresi

Mekanik flotasyon hücreleri en yaygın kullanılan flotasyon hücreleridir (Souza Pinto vd., 2018). Bu makinalarda pülpü karıştıran ve hava kabarcıklarını dağıtan mekanik bir karıştırıcı mevcuttur. Bu makineler kendinden havalandırmalı veya dışarıdan kompresörle havalandırmalı olabilmektedir. Karıştırıcı mekanizması karıştırıcı (rotator) ve sabit kafadan (stator) oluşmaktadır. Karıştırıcı dönmeye başladığı zaman karıştırıcı bıçaklarının gerisindeki alçak basınç bölgesinde kesme kuvvetinden kaynaklanan hava boşlukları ve hava kabarcıkları oluşmaktadır (Crozier ve Klimpel, 1989; Mavros, 1992; Schubert ve Bischofberger, 1998). Statorun esas görevi, hücredeki hava kabarcığı boyutunu ayarlamak değil, hava kabarcığı dağılımını sağlamaktır (Harris, 1976).

İlk mekanik flotasyon hücresi 1905'te Minerals Separation Company tarafından tanıtılmıştır ve bu konsept Hoover'ın flotasyon makinasını geliştirmesinde yardımcı olmuştur. Mekanik flotasyon makinasının ilk olarak Avustralya Broken Hill'deki Central Madeninde kullanıldığı bilinmektedir. İlk kendinden havalandırmalı makine jenerasyonu 1915'lerde geliştirilmiştir ve 1927'ye kadar Fahrenwald (Denver), Fagergen, Agitair, Ruth, Winig ve Geco gibi üreticiler kendi ürettikleri kendinden havalandırmalı (sub-aeration) flotasyon makine tasarımlarını tanıtmışlardır.

1930'dan 1960'a kadar kendinden havalandırmalı makineler 3m^3 'e yaklaşan boyutlarıyla endüstride en çok kullanılan makineler olmuştur. 1960'ların ortalarında flotasyon hücrelerinin hacimleri 5.7 m^3 'e kadardır. 1970 ve 1980'lerde hücre hacimlerinde artış gerçekleşmiş ve $8.5\text{-}28.3\text{ m}^3$ arasında değişen büyük hacimli hücrelerin sayısı giderek artmıştır. Son yıllarda özellikle baz metal cevherleri flotasyonunda, bakım, sermaye ve operasyon maliyetlerini düşürmesi ve otomatik kontrol sağlaması nedeniyle daha yüksek hacimli hücreler geliştirmeye yönelik büyük bir eğilim vardır (Şekil 2.2) (Murphy, 2012). Endüstrinin önde gelen makine üreticileri arasında Denver, Galigher, Wemco, Outokumpu (şimdiki Outotec) ve Sala sayılabilir.

1970'lerde yaklaşık 60 m^3 hacimli küçük silindirik hücreler (TankCell) tanıtılmış, fakat yaygın olarak kullanımı 1990-2000'leri bulmuştur. Son zamanlarda kurulan en büyük hücre $300\text{-}350\text{ m}^3$ hacindedir (Coleman ve Dixon, 2010; Nelson vd., 2009; Zhang vd., 2011). Bir projede 500 m^3 'lük hücre kurulmuşken (Outotec, 2014), Şekil 2.17'de görüldüğü

gibi bir diğer projede 600-650 m³'lük hücreler test edilmektedir (Lelinski vd., 2013). Modern Tank hücre tasarımları silindirik, çoklu köpük oluşuna ve içten tahliyeye sahiptir. Büyük boyutlu hücrelerin kullanılması; kurulu hücre sayısını azaltsa da alet düzeninin daha isabetli yapılmasını ve etkin bir seviye kontrol sistemi gerektirmektedir. Bu sorunu gidermek için flotasyon makinası üreticisi firmalar, flotasyon makinalarında yeni sistemler tasarladılar. Bu tasarımlar aşağıda firma bazlı olarak verilmektedir.



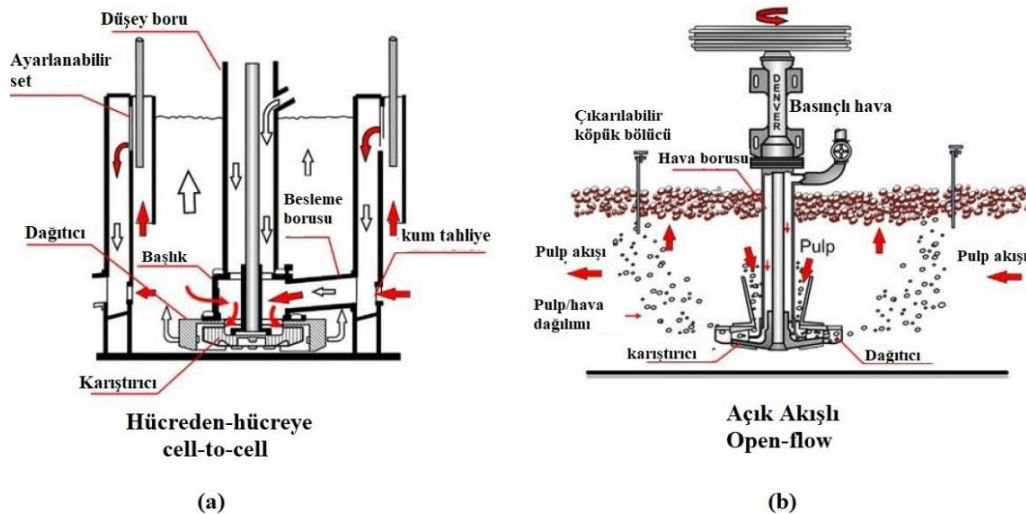
Şekil 2.17. SuperCell[®] 600 m³ (Courtesy FLSmidth)

2.1.4.1 Denver (Fahrenwald)

1970'lerde hücreden hücreye (cell-to-cell) (Şekil 2.18(a)) makinelere göre yüksek üretim miktarlarına daha uygun ve bakımı daha kolay olduğu için endüstride kullanılan flotasyon makinalarının çoğu açık akışlıydı (open-flow) (Şekil 2.18(b)). Denver Sub-A en çok bilinen hücreden hücreye makinaydı, çoklu temizleme devreleri ve küçük tesislerde yaygın olarak kullanılmaktaydı. Bu hücrelerin hacimleri 14.2 m³'e ulaşabiliyordu. Sub-A tasarımı patenti 1922'de Arthur W. Fahrenwald tarafından alınmış olsa da bu makinanın genel tasarımı, flotasyon hücre tasarım ve pazarlamasında öncü firmalardan olan Mineral Separation Company tarafından üretilen ilk makine dizaynlarına dayanmaktaydı (Fahrenwald, 1922; Hebbard, 1913; Lynch vd., 2010; Wray ve Littleford, 1926). Şekil 2.18'in a panelinde de görüldüğü gibi Sub-A'nın karıştırıcı mekanizması silindirik hücreye yerleştirilmiştir ve bağlantılı hücreden ayarlanabilir bir set ile ayrılmıştır. Besleme pompası pülpü önceki hücre setinden bir sonraki hücrenin karıştırıcısına taşır ve bu akış karıştırıcının vakum gücüyle gerçekleşir. Karıştırıcı tarafından oluşturulan vakum, havayı, şaftın etrafında

çevrili bulunan boş dikey boruların altından pülpün içine çeker. Hava akımı, karıştırıcının uyguladığı dönüş ve kesme kuvvetleriyle birlikte ince hava kabarcıklarına dönüşür. Karıştırıcının hemen üzerinde, makine kapatıldığında karıştırıcının kalkmasını engelleyen sabit bir başlık bulunmaktadır. Sabit başlığa bağlı hücrenin köşeleri boyunca uzanan 4 adet çarpıtma levhası bulunmaktadır. Bu çarpıtma levhaları karıştırıcı üzerindeki çalkalanmayı sınırlayıp, durgun zonun oluşmasını sağlamaktadır, bu sayede hava kabarcığına yapışmış tanelerin türbülans tarafından kopması engellenmektedir. Pülp zonundan köpük zonuna geçen tanecik yüklü hava kabarcıkları yukarı doğru hareket edip taşarak konsantre olarak alınır. Taşma işlemi bazı durumlarda dönen köpük pedalları yardımı ile daha etkin bir şekilde gerçekleştirilir, böylece kendiliğinden taşamayan köpüğün çökmesi engellenir.

Açık akışlı makinalarda hücre içine verilecek hava miktarı karıştırıcının dönme hızına bağlı olarak değişir. Daha yüksek hava miktarı için daha yüksek karıştırma hızı gereklidir fakat yüksek karıştırma hızları, pülpü gereğinden fazla karıştırdığı gibi karıştırıcının aşınmasına ve yüksek enerji tüketimine yol açar. Böyle durumlarda hücre dışından ekstra bir kompresörle hava üfleme (süper şarj) uygulanabilmektedir. Hücrenin güvenli bir şekilde çalışması için enjekte edilecek havanın belli bir limitin üzerine çıkmaması gerekir.



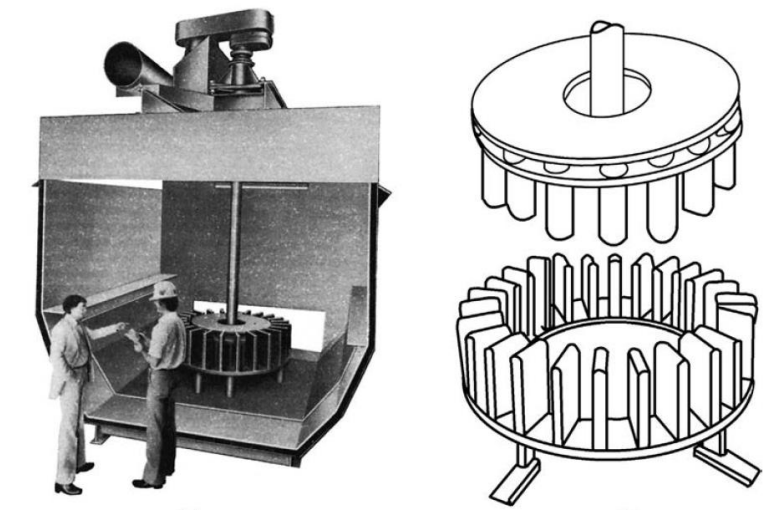
Şekil 2.18. Denver hücreden hücreye ve açık akışlı makinalar

Yığın flotasyon devrelerindeki yüksek tonajlarla çalışabilmek için boyutları 2.8-36.1 m³ aralığında değişen süper şarjlı (ekstra dışarıdan hava üfleme) Denver D-R makinası üretilmiştir. Bu makinalarda hücreler arasında setler ve ara bölmeler bulunmamaktadır. Şekil 2.18'in b panelinde görüldüğü gibi hücreler arasındaki besleme boruları kaldırılmıştır ve pülp serbest bir şekilde bir hücreden diğer hücreye akmaktadır. Pülp seviyesi, oluklardaki atık setleri tarafından otomatik olarak kontrol edilmektedir. Bankların kontrolü kolay olduğu için operatör sayısı minimuma indirilmiştir.

2.1.4.2 Galigher Agitair

Galigher Agitair en iyi bilinen kompresörlü makinadır (Sorensen, 1982). Bu makinalarda hücreler arasında gravite başlığı tarafından sağlanan düz bir pülp akışı mevcuttur. Her bir kompartıman 42.5 m³'lik hacme ve Şekil 2.19'da görüldüğü gibi sabit çarptırıcılar içerisinde dönen ayrı bir karıştırıcıya sahiptir. Hava, karıştırıcı şaftın etrafını saran dikey boru içerisinden pülpe üflenmektedir ve kesme kuvvetiyle birlikte hava kabarcıkları oluşmaktadır. Her bir kompartıman için hava miktarı ayrı ayrı belirlenmektedir.

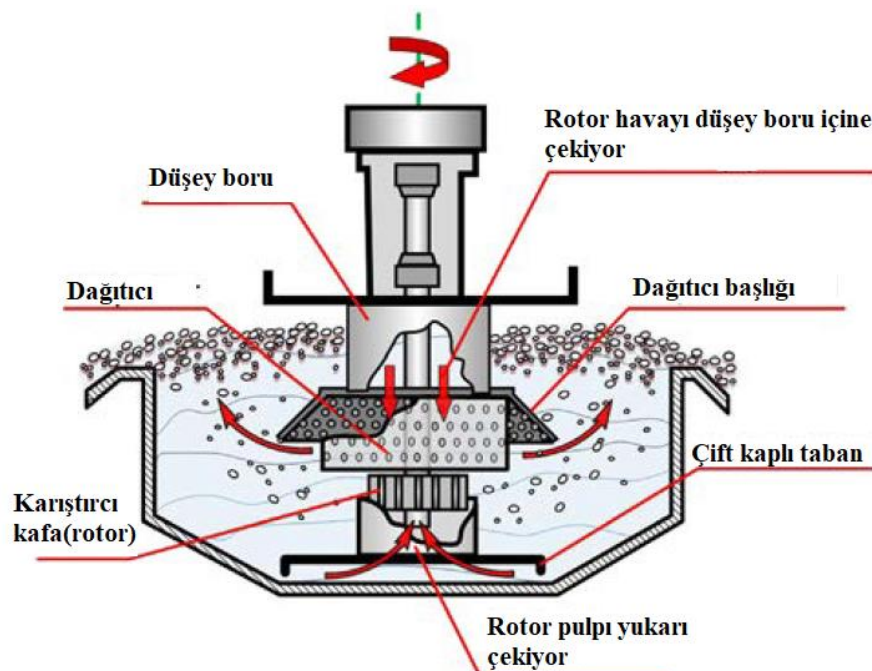
Pülp derinliği, bankın bitişindeki dart vanaları veya savak barlar tarafından kontrol edilirken, her bir hücredeki köpük derinliği ise her bir hücre için farklı boyutlarda tasarlanan savak barlar tarafından kontrol edilmektedir.



Şekil 2.19. Galigeher 42.5 m³ Agitair Flotasyon makinası ve Agitar mekanizması (Gorain vd., 1997)

2.1.4.3 Wemco (Fagergren)

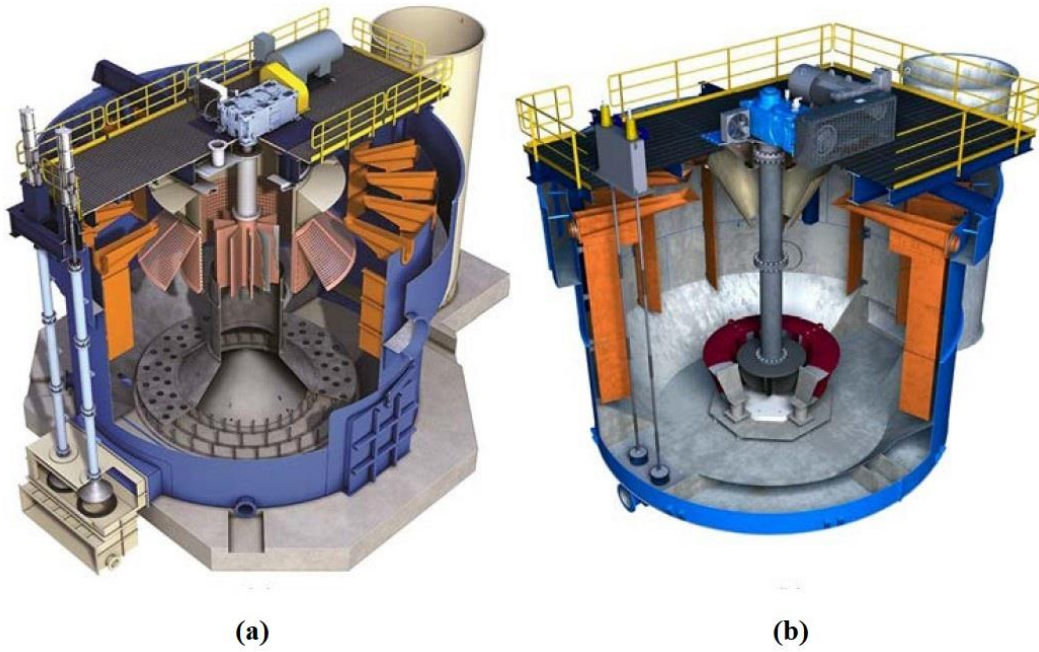
Wemco tasarımı 1930'larda emiş tüplü dikey karıştırıcı ve pülp geri beslemesi için çift tabanlı olarak değiştirildi. Şekil 2.20'de bu hücrenin şeması görülmektedir. 1950'lerde WEMCO Fagergren ismi altında popülerlik kazanan bu makine Western Machinery Co. (WEMCO) tarafında pazarlanmaya başlandı. WEMCO'nun tasarımı, kendinden havalandırmalı mekanizmasıyla yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir. WEMCO günümüzde 600 m³ boyutlara kadar SuperCell hücreler üretmektedir. Modern tasarımlarda birkaç hücreden oluşan bir bankın (kaba, süpürme veya temizleme bankı) yerini tek bir tank hücre almaktadır. Hücreye besleme önceki hücreden veya besleme tankıyla hücre tabanından yapılır. Hücreden hücreye geçen pülp karıştırıcının dönerken oluşturduğu vakumdan dolayı yukarı doğru hareket eder. Oluşan bu vakum aynı zamanda havayı da borunun içinden aşağı doğru çeker. Hava ile pülp iyi bir şekilde karışmaktadır ve dağıtıcı tarafından türbülanslı pülp hareketi saptırılarak küçük çaplı hava kabarcıkları oluşturulmaktadır. Bu sistemde hücre içindeki hava miktarı; karıştırıcı hızı, pülp yoğunluğu ve pülp seviyesinden etkilenmektedir.



Şekil 2.20. Wemco Fagergren Hücresinin Şeması

Dorr-Oliver 1980'lerin ilk yıllarında büyük hücre ihtiyacını karşılamak için bir flotasyon hücresi geliştirdi. Daha geniş bir tank karışımı sağlamak için pompa tipi karıştırıcı hücreden çıkarıldı. Dorr-Oliver patentinde, kıvrık ve parabolik şekildeki 6 bıçaklı karıştırıcıya sahip U şeklinde bir hücre tanıtılmıştır (Lawrence vd., 1984). Hava; karıştırıcı üst plakasındaki bir aparatla, karıştırıcı etrafına sarıllı olan düşey boru içerisinden aşağı doğru hareket ederek gaz haznesine girer. Hücreler dikdörtgen, U şeklinde taban ve silindirik opsiyonlarda 5 den 330 m³ hacimlere kadar tedarik edilebilmektedir (Nelson vd., 2009).

Şekil 2.21'de köpük biriktirici, dairesel oluklara ve akış saptırıcılara sahip modern tank hücresinin şekli görülmektedir. Bu şeklin sol panelinde dış tahliyeye sahip WEMCO mekanizması, sağ tarafında ise iç tahliyeye sahip Dorr Oliver sistemi görülmektedir.

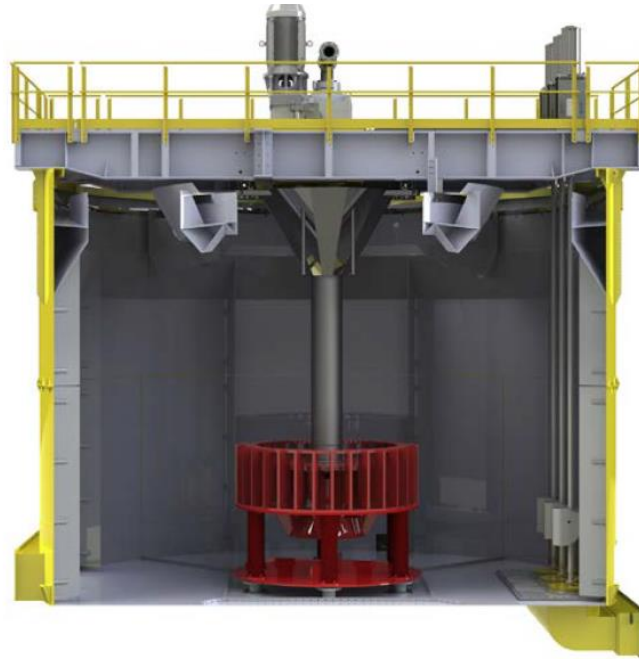


Şekil 2.21. SuperCell (Courtesy FLSmidth) flotasyon makinaları: (a) Kendinden havalandırma Wemco mekanizmalı ve (b) kompresörlü Dorr-Oliver mekanizmalı.

2.1.4.4 Outotec (Outokumpu)

Outotec'in OK flotasyon hücreleri gibi endüstride iyi bilinen birçok ekipmanı, Finlandiya ve bazı ülkelerde, baz metal konstantratörlerinde kullanıldı. OK (Outokumpu) hücresinin tasarımı 1970'lere dayanmaktadır ve OK-U (kumlanmayı engellemek için yuvarlatılmış tank tabanı) ve OK-R (düz tank tabanı) olmak üzere iki farklı tipte, 10.5m³'ten

38 m³'e kadar değişen boyutlarda olabilmektedir. OK hücrenin karıştırıcısı aşığı doğru incelen dikey slotlardan oluşmaktadır ve karıştırıcının üst kısmı yatay bir diskle kapatılmıştır. Karıştırıcı döndüğü zaman, pülp slotlar içerisinde hızlanır. Şaftın içinden hava üflenir ve pülp-hava akımı karıştırıcı-stator açıklığında karşılaşır ve çapın büyük olduğu noktaya doğru hareket ederek hücre içerisine dağılır. Yeni beslenen pülp çapın ve hızın düşük olduğu slotların tabanına girer önceki pülp akışıyla yer değiştirir. Böylece karıştırıcı bir pompa görevi görerek pülpü karıştırıcının tabanına çeker ve dışarıya doğru, hücre içine dağıtır. Pülp akışı hücrenin tabanına doğru olduğu ve yeni besleme de karıştırıcı kafasının oluşturduğu vakumdan dolayı direk bu mekanizmaya girdiği için Tank hücre ve karıştırıcı kafa tasarımı kısa devreleri engellemektedir. Bu kısa devre önleme özelliğinden dolayı şimdilerde 2 büyük hücreden oluşan banklar Dünyada birçok konsantratörde kullanılmaktadır (Niitti ve Tarvanien, 1982). OK karıştırıcı/stator mekanizması zamanla gelişerek farklı geometrilere (çoklu-karıştırma, serbest-akışlı) sahip olsa da, orijinal tasarımın genel yapısı aynı kalmıştır. OK'nin en son tasarımı FloatForce® mekanizmasıdır. 1980'lerde OK-50 hücreleri kullanılmaktaydı ve Outokumpu ileride ilk Tank hücrenin kurulumuna neden olacak olan TC-60 kodlu silindirik hücreleri üretmeye başladı (Gorain vd., 2007). Şekil 2.22'de köpük biriktirici, iç köpük oluğu, FloatForce® mekanizması ve iç dart vanalı tahliyeye sahip 500 m³'lük (10 m çaplı) Tank hücrenin (TankCell®) çizimi görülmektedir.



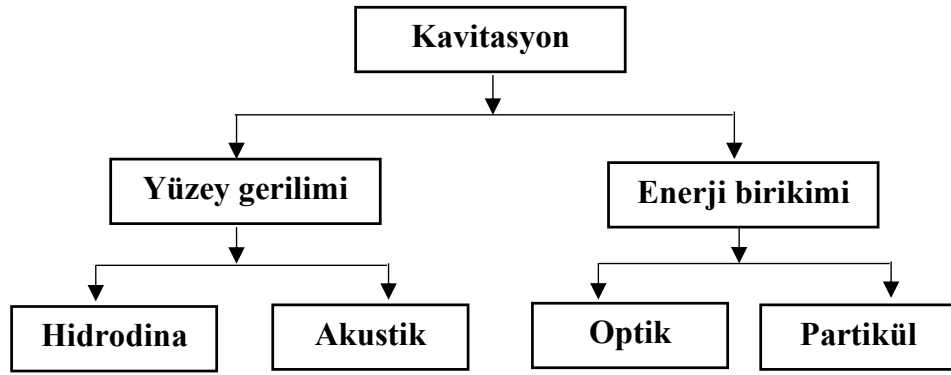
Şekil 2.22. FloatForce® mekanizmasına sahip TankCell® e500

2.2 Kavitasyon ile Hava Kabarcığı Üretimi Yöntemleri

Kavitasyon, sıvı içerisinde içi gaz/buharla veya bunların karışımı ile dolu ince hava kabarcıkları formuna denir ve hava kabarcığının bileşenine göre buhar ve gaz kavitasyon olarak sınıflandırılmaktadır. Bu kelimeyi R E Froude türetmiştir (Thornycroft ve Barnaby, 1895). Kavitasyon ilk defa Barnaby ve Parsons tarafından keşfedilmiş ve araştırılmıştır (Barnaby, 1897).

Kavitasyon, kaynamadan üretme mekanizmasıyla diğer hava kabarcığı üretme yöntemlerinden farklılaşmaktadır ve kritik bir değer altındaki basınç düşüşüyle alakalıdır. Basınç, yüzey gerilimi ve enerji birikimi ile düşürülebilir. Yüzey gerilimi ile 2 tür basınç düşürme yöntemi vardır (Li, 2000). Bunlardan ilki, hızlı sıvı akışı ile oluşturulan hidrodinamik kavitasyondur. Hidrodinamik kavitasyon, sistemdeki hız farklılığından kaynaklanan sıvı akışındaki basınç farklılığı ile sağlanmaktadır. Diğer ise akustik kavitasyondur. Basıncın düşürülmesi, yüzey gerilimini düşürmek yerine, foton ve lazer ışığı veya diğer elementer partiküllerden elde edilen enerji birikimi ile de yapılabilir.

Şekil 2.23'te bahsedilen kavitasyon yöntemlerinden yüzey gerilimi ile kavitasyon üretme yönteminde (akustik-hidrodinamik) ölçek büyütmesi, uygulanması ve geometrik koşullar ve hız gibi operasyon parametrelerinin kontrolü daha kolaydır. Hidrodinamik kavitasyon en ucuz ve en etkili kavitasyon üretme yöntemlerinden biridir, bunun yanında kullanılan ekipmanlar hem basittir hem de bakım maliyetler düşüktür. Bu gibi avantajlarından dolayı ince boyutta flotasyonda, hava kabarcığı üretimde hidrodinamik kavitasyon kullanılmaktadır.



Şekil 2.23. Kavitasyon sınıflandırma

2.2.1 Hidrodinamik kavitasyonla hava kabarcığı üretimi

Hidrodinamik kavitasyon sıvı içerisinde belli bir noktadaki basıncın, yüksek akış hızından dolayı atmosfer basıncının altına düşmesiyle gerçekleşir (Leong vd., 1989). 3 tür hidrodinamik kavitasyonla hava kabarcığı üretme yöntemi vardır: mekanik karıştırma, hızlı sıvı akışı ve çözülmüş hava içeriği.

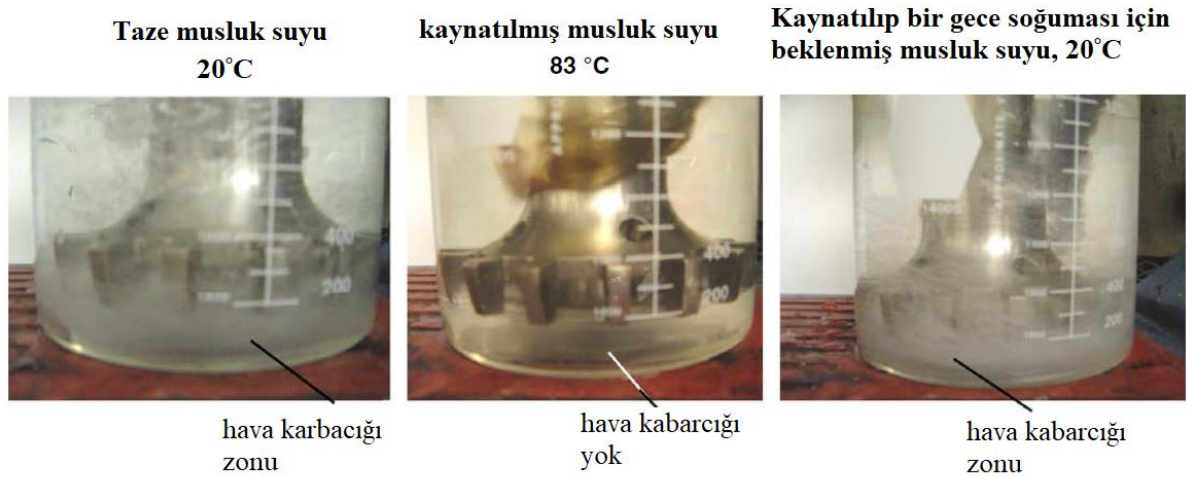
Bu çalışmada bu 3 yöntemde kullanılmaktadır. Mekanik karıştırma ile kavitasyon, mekanik hücrenin karıştırıcısı ile; hızlı sıvı akışı ve çözülmüş hava içeriği ile kavitasyon ise sparger kullanılarak oluşturulmaktadır.

2.2.1.1 Mekanik karıştırma

Mekanik flotasyon hücresinde, karıştırıcının oluşturduğu güçlü kesme kuvvetleri sıvı içerisinde boşlukların, yani hava kabarcıklarının oluşmasını sağlamaktadır. Örneğin, laboratuvar flotasyon hücresinde, hava verilmediği durumda, karıştırma zonunda ince hava kabarcıklarının oluştuğu gözlemlenmiştir (Grainger-Allen, 1969; Schubert, 2005; Zhou ve Chow, 2006). Araştırmalar karıştırma zonunun, karıştırıcı hızındaki artışla birlikte genişlerken oluşan hava kabarcıklarının yok olmasına sebep olacak şekilde basıncı

artırdığını göstermiştir (Kumar ve Pandit, 1999; Zhou ve Chow, 2006). Bu durum oluşan hava kabarcıklarının kısa ömürlü olmasına neden olmaktadır.

Araştırmacılar hava kabarcığı formunun oluşmasında hangi faktörün etkili olduğunu anlamak için birkaç deney yapmışlardır. Bu deneylerden birisinde musluk suyu, hava verilmeden karıştırıldığında kabarcık oluşumu gözlemlenmiştir; ancak aynı su hızlı bir şekilde kaynatılıp, içerisindeki önceden oluşan gaz çekirdekleri ve çözülmüş hava ortamdaki ayrılmış ve sistem mekanik bir karıştırıcı ile karıştırıldığında hava kabarcığı oluşmamıştır. Kaynatılmış suya aynı karıştırma koşullarında çok az miktardaki hava ilave edilmesi ise tekrar hava kabarcığı gözlemlenmesine neden olmuştur (Zhou vd., 2005).



Şekil 2.24. İlave hava olmadığı durumda, karıştırma ve çözülmüş havanın hava kabarcığı oluşumuna etkisi (1400 ml çeşme suyu, 1200 rpm, Denver hücre)(Zhou vd., 2005)

Bu gözlemler, sıvının mekanik bir karıştırıcı ile karıştırılmasının, hava kabarcığı üretiminde etken bir faktör olmadığını doğrulamaktadır. Buna karşın, Şekil 2.24'ten görüldüğü üzere kaynatılmış olan çeşme suyu, 1 gece açık ortamda bekletilip denge sıcaklığına ulaştığı durumda, karıştırıcı ile karıştırıldığında hava kabarcıkları gözlemlenmiştir. Bu durumda, sudaki çözülmüş hava birden yok olmasının engellenmesi için su içerisinde belli bir miktar çözülmüş gaz olması gerekmektedir. Denge miktarına

ulaşmıştır. Bu bulgular gösteriyor ki, havaya doymuş suyun karıştırıldığı durumda hava kabarcığı formu daha kolaylıkla gerçekleşmektedir. Hava kabarcıklarının

2.2.1.2 Hızlı sıvı akışı

Hızlı sıvı akışı ile kavitasyon, akışın nozuldaki geçirilmesi ile elde edilmektedir. Z. A. Zhou vd. (1995, 1999) hızlı sıvı akışı ile kavitasyona etki eden faktörleri incelemişlerdir. Çalışmalarında, sürfektanın (yüzeysel aktif madde) bulunduğu durumda hava kabarcığı oluşumu için gerekli kritik hızın değişmediğini ve sürfektanın kavitasyon başlangıcı üzerinde çok az bir etkisi olduğunu rapor etmişlerdir. Buna karşın sürfektanın transmitansı azalttığını ve hava kabarcığı sayısını artırdığını gözlemlemişlerdir. Hava kabarcığı sayısındaki artış, yüksek basınç altındaki çalkantılara dirençli sürfektan adsorbsiyonuyla oluşan boşlukların stabilizasyonundan da kaynaklanabilmektedir. Bir diğer deyişle sürfektan adsorbsiyonu yüksek çalkantılara mekanik direnç sağladığı için, oluşan hava kabarcıkları sönmemektedir; böylece sürfektan olmadığı duruma göre sistemde daha fazla hava kabarcığı bulunabilmektedir.

Hidrodinamik kavitasyonla hava kabarcığı oluşumuna etki eden diğer faktörler:

- **Nozul boyutu:** Küçük boyutlu nozullarda enerji kaybını önlemek için daha küçük deliklerin (orifis) olması gerekmektedir.
- **Nozul uzunluğu:** Daha kısa uzunluğa ve daha büyük çapa sahip nozullar daha az miktarda hava kabarcığı üretmektedir (Knapp vd., 1970; Ross ve Kuperman, 1989).
- **Su sıcaklığı:** sıcak musluk suyunda, soğuk musluk suyuna göre daha düşük akış hızlarında hava kabarcığı gözlemlenmektedir. Bunun sebebi, yüksek sıcaklıkta su buharı basıncının artmasıdır.
- **Kavitasyon tüpünün konumu:** üst akıma yerleştirilen kavitasyon tüpü alt akıma yerleştirilene göre daha düşük akış hızlarında hava kabarcığı üretebilmektedir (Zhou vd., 1995). Bu durum üst akımdaki statik basıncın alt akıma göre daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

2.2.1.3 Cözünmüş hava içeriği

Hem karıştırarak hem de hızlı sıvı akışıyla hava kabarcıkları elde edilebilmektedir, fakat oluşan bu hava kabarcıklarının kalıcılığını sağlamak için belirli bir miktar çözünmüş gaz gerekmektedir. Çözünmüş hava sıvı içerisine iki yöntemle eklenebilmektedir. Bu yöntemlerde birincisi yüksek çözünürlükteki gazı (CO₂) sparger veya aspirasyon ile sürekli olarak beslemek, diğer yöntem ise çözünmüş havanın yüksek basınç altında beslenmesidir.

Hava kabarcığı formu ve su içerisindeki çözünmüş gaz içeriği, hava kabarcığı oluşum derecesini belirlemektedir (Zhou vd., 1995). Zhou vd. (1995) sıvı içerisindeki daha yüksek çözünmüş gaz içeriğinin, daha fazla hava kabarcığı üretimini ve yüksek hold-up'ı sağlamadığını rapor etmişlerdir. Hava kabarcığı üretimi ve stabilizasyonun, önceden oluşmuş olan gaz çekirdekleri ve hava boşlukları içindeki çözünmüş gaz moleküllerinin dağılımına bağlı olduğunu bulmuşlardır.

2.3 Flotasyon Kinetiği

Flotasyon yönteminin daha iyi anlaşılması için birçok model geliştirilmiştir. Dowling vd. (1985) flotasyon yöntemi ile ilgili 13 farklı model inceledi. Bu çalışmada porfiri bakır cevheri ile yaptıkları deneylerden elde ettikleri zamana göre verim profillerinin veri setlerine dayalı olarak elde ettikleri 13 modeli kategorize etmeye çalıştı. Lynch vd. (1981) bu modeller için 3 kategori tanımladı: *i Ampirik model*: Ampirik modeller çok karmaşık ve optimizasyonda deneme yanılma yaklaşımını içeriyordu. Daha da önemlisi, istatistiksel yollarla elde edilen model parametrelerinin fiziksel olarak anlamlılığı yoktu ve flotasyon sürecini aydınlatacak bilgiler sunmuyordu. Ampirik modeller, deneylerde çalışılan koşulların dışına çıktığında çok düşük öngörü kapasitesine sahipti (Nguyen ve Schultze, 2004), *ii Olasılık modelleri*: Bu modeller kabarcık-tane çarpışması, yapışması, köpük stabilitesi vb. olasılıkları göz önünde bulundurmaktadır. Temel olasılık modeli en basit kinetik modellerin formuna benzemektedir (Sripriya vd., 2003; Yuan vd., 1996), *iii Kinetik modeller*: Bu modeller, süreç ve hız içeren proseslerin daha iyi anlaşılmasında yaygın olarak kullanılmakta, genel olarak teorik altyapısı bulunmaktadır. Flotasyon da bir süreç prosesi olduğu için, flotasyon yönteminin anlaşılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Zuniga (1935) tarafından yazılan ve Şili’de basılan makalenin flotasyon kinetiği ile ilgili ilk makale olduğu genel olarak kabul görmektedir. Zuniga flotasyon sürecini betimlemek için kimyasal reaksiyonların kinetiğini kullandı ve flotasyon kazanımının flotasyon zamanının üstel fonksiyonu olduğunu gözlemledi. Zuniga tarafından bulunan bu fonksiyon Eşitlik 2.1’de gösterilmektedir.

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad 2.1$$

Burada C , t süresine kadar yüzen taneciklerin konsantrisi, t , flotasyon süresi, k , flotasyon hızı sabiti.

Arbiter (1951), Beloglazov (1939), Sutherland (1948) ve Zuniga (1935)’in çalışmalarının yanında laboratuvar testlerinden ve endüstriyel hücrelerden elde ettiği diğer verilere 2. Derece eşitlik öne sürdü. Arbiter (1951) tarafından sunulan orijinal eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$\frac{dC}{dt} = -kC^2 \quad 2.2$$

Eşitlik 2.1 ve 2.2 aşağıdaki gibi genelleştirilebilir.

$$\frac{dC}{dt} = -kC^n \quad 2.3$$

Burada n flotasyon kinetiğinin derecesini temsil etmektedir. (t) süre flotasyon sonrasında köpükteki flotasyon kazanımı (R) aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

$$R(t) = \frac{C_0 - C(t)}{C_0} = 1 - \frac{C(t)}{C_0} \quad 2.4$$

Burada C_0 , $t=0$, yani başlangıç anındaki flotasyon haznesindeki konsantrasyonu göstermektedir. Burada $t=0$ anında hiç köpük alınmadığı için $C_0=1$ olarak alınmaktadır.

Bütün taneler flotasyona tabi olacaktır; diğer bir ifade ile teorik olarak ideal koşullarda hidrofob olup henüz köpük tarafından yakalanmamış bütün tanecikler eninde sonunda yüzeceği için kazanım %100 olabilmektedir. Ancak uygulamada yüzdürülmesi daha zor olan, örneğin belli bir boyutun üzerindeki tanecikler için farklı bir olay söz konusudur: flotasyonun tersi bir olay olarak tanımlanabilecek şekilde, kabarcığa yapışmış taneciğin kabarcık yüzeyinden kopup pülpe geçiş olayı da gerçekleşmektedir (Mika ve Fuerstenau, 1968; Morris, 1952; Schulze, 1977, 1992; Stachurski, 1970; Woodburn vd., 1971).

Eşitlik 2.4'e göre; $t \rightarrow \infty$ koşulunda, maximum kazanım R_∞ aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$R_\infty = 1 - C_\infty \quad 2.5$$

Eşitlik 2.4 ve 2.5 birleştirildiğinde, Eşitlik 2.6'yı elde ederiz

$$\frac{dR}{dt} = k(R_\infty - R)^n \quad 2.6$$

Hem toplam kabarcık yüzey alanı ve hem de verim tane ve kabarcık boyutlarına güçlü bir şekilde bağlıdır. Buna göre tane boyut dağılım aralığı çok dar olmadığı sürece, hız sabiti olan k , aynı zamanda bir verimlilik sabiti de olacaktır; ancak k değerinin verimlilik sabiti olarak da değerlendirilmesi sadece çalışılan koşullarda ve flotasyona tabi tutulan cevherin spesifik boyut dağılımı için geçerli olacaktır (Nguyen ve Schultze, 2004; Polat ve Chander, 2000). Hız sabitinin dağılımı, $f(k)$, flotasyon hücresindeki farklı tanecikler için

k 'nin dağılım fonksiyonu olarak gösterilebilir. Bundan dolayı Eşitlik 2.6'i Eşitlik 2.7'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{dR}{dt} = f(k)(R_{\infty} - R)^n \quad 2.7$$

Burada, R_{∞} , maksimum kazanım; $f(k)$, hız sabiti fonksiyonu; n , flotasyon kinetiğinin derecesini vermektedir. Buradaki “ R ” ve “ t ” değerleri deneysel verilerden elde edilmektedir.

Hız sabiti fonksiyonun kesikli ve sürekli olmak üzere iki tür dağılımı vardır. Bu çalışmada kesikli flotasyon testleri yapılacağı için bu dağılımlardan kesikli dağılımlar üzerinde durulacaktır.

2.3.1 Kesikli hız sabitleri

Kesikli hız sabitiyle ilgili birkaç model vardır. Bu modeller varsaydıkları fraksiyonların sayılarına göre farklılaşmaktadır (Cuttriss, 1977; Imaizumi, 1963; Jowett, 1974; Kelsall, 1961; Kelsall ve Stewart, 1971; Morris, 1952).

Klasik birinci derece flotasyon modeli, birçok araştırmacı tarafından önerilmiş ve flotasyon devresi tasarımında çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Xu, 1998; Dowling vd., 1985; Gulsoy ve Ersayın, 1996; Mazumdar, 1994; Radoev vd., 1990; Sripriya vd., 2003; Vanangamudi vd., 1989; Wills, 1988). Birinci derece klasik model Eşitlik 2.8, Eşitlik 2.6'da n yerine 1 yazarak elde edilebilir.

$$R = R_{\infty}(1 - e^{-k_g t}) \quad 2.8$$

Burada k_g ortalama flotasyon hızı sabiti. Eşitlik 2.8, flotasyon koşullarının tamamı altında bütün taneler için geçerli tek bir ortalama flotasyon hızı sabitine sahip en basit modeldir.

Klasik birinci derece eşitlik aynı zamanda birinci derece Dirac delta fonksiyonu olarak da bilinmektedir (Lynch vd., 1981). k_B , yüzeysel hava hızı, kabarcık boyutu, çarpışma verimliliği ve yapışma verimliliğini hesaba katan temel modeli (Eşitlik 2.9) kullanarak tahmin edilebilir (G J Jameson vd., 1977; Ralston, 1992).

$$k_B = \frac{3}{2} \frac{G_{fr} h}{d_b V_{cell}} E_c E_a \quad 2.9$$

Burada: G_{fr} , hava akış hızı; h , flotasyon hücresinin yüksekliği; d_b , kabarcık çapı; V_{cell} , flotasyon hücresinin hacmi; E_c ve E_a , pülp zonundaki tane-kabarcık karşılaşma, yapışma ve stabilitesinin verimliliğidir. Bu verimlilikler tane yoğunluğu, pülpün akışkanlığı, indüksiyon zamanı, tane boyu, şekli ve karışımı, hold-up, kabarcık boyutu, türbülans, kabarcık viskozitesi, tane viskozitesi, vb. parametrelerden etkilenmektedir (Danoucaras vd., 2013).

Klasik birinci dereceden modele ek olarak, tek fazlı kesikli zamanlı dağılım modeli, 2. Derece flotasyon kinetik modele de Arbiter (1951) tarafından uygulanmıştır.

2-fraksiyon, 2 hız sabiti terimi içermektedir (Kelsall, 1961). Eşitli 2.10'da Modelin matematiksel formu görülmektedir.

$$R = (1 - \phi)(1 - e^{-k_f t}) + \phi(1 - e^{-k_s t}) \quad 2.10$$

Burada ϕ , yüzdürülen malzemedeki düşük hız sabitine sahip fraksiyonun oranı, k_f ve k_s , sırasıyla hızlı ve yavaş bileşenler için hız sabitidir. Bu model maximum kazanım terimi içermemektedir, maksimum kazanım %100 olarak varsayılmıştır. Bu modele göre yavaş yüzen fraksiyonun hızı sifira yaklaşırsa; yani, $k_s \rightarrow 0$, $(1 - e^{-k_s t})$ terimi sifira yaklaşır, bundan dolayı yavaş yüzen bileşenler pülpten kazanılamaz ve $(1 - \phi)$ terimi maximum kazanımdır diyebiliriz.

Eşitlik 2.11'de verilen Kelsall modeli, birçok araştırmacı tarafından flotasyon kinetik model olarak kullanılmaktadır (Albjanic vd., 2015; Apling ve Ersayin, 1986; Harris ve Khandrika, 1985; Mehrotra ve Padmanabhan, 1990). Modifiye edilmiş Kelsall modele

ise, maksimum kazanım teriminin etkisi de eklenmiştir ve modeldeki parametre sayısı; R_∞ , ϕ , k_f ve k_s olmak üzere 4 e çıkmıştır (Jowett, 1974) (Eşitlik 2.11).

$$R = R_\infty[(1 - \phi)(1 - e^{-k_f t}) + \phi(1 - e^{-k_s t})] \quad 2.11$$

Başka bir modifiye Kelsall modeli olan 6 parametresi modele en iyi uyan örnekler olarak; demir cevheri (Saleh, 2010), Rosh Pinah'ın galen cevheri (Coetzer vd., 2003), kömür atığı (Sokolović vd., 2012) ve bakır cürufu (Stanojlovic ve Sokolovic, 2014) çalışmaları verilebilir. Bu model, 3 fraksiyonlu kinetik model olarak tanımlanabilir ve burada yüzen materyal üç guruba ayrılmıştır: yavaş, orta ve hızlı yüzen taneler (Apling ve Ersayin, 1986; Jowett, 1974). Malzemenin yüzme hızına göre 3 fraksiyona ayrılması, bu 3 fraksiyona ait oranları (ϕ_f , ϕ_m , ϕ_s sırasıyla hızlı, orta hız ve yavaş yüzen fraksiyon oranları; ki bunların toplamı Eşitlik 2.13'te verildiği gibi 1'e eşittir) ve bu fraksiyonların hız sabitlerini (k_f , k_m ve k_s sırasıyla hızlı, orta hız ve yavaş yüzen fraksiyonlar için hız sabitleri) temsil eden parametrelerin ilavesi ile toplam parametre sayısı 7'ye çıkmaktadır. Maksimum kazanım içeren bu model Eşitlik 2.12'de gösterilmektedir.:

$$R = R_\infty[\phi_f(1 - e^{-k_f t}) + \phi_m(1 - e^{-k_m t}) + \phi_s(1 - e^{-k_s t})] \quad 2.12$$

$$\phi_f + \phi_m + \phi_s = 1 \quad 2.13$$

Genel kinetik modelin, tane karışımının yüzme hızına göre daha fazla fraksiyona bölüldüğü genelleştirilmiş formu Eşitlik 2.14'te verilmiştir (Huber-Panu vd., 1976). Eşitlik 2.15'te bu fraksiyonların oranları toplamının 1'e eşit olduğunu göstermektedir.

$$R = R_\infty \sum_{i=1}^m y_i (1 - e^{-K_i t}) \quad 2.14$$

$$\sum_{i=1}^m y_i = 1 \quad 2.15$$

Burada, i , her bir hız sabiti için yüzebilirlik fraksiyon sayısını göstermekte, m , sınıflandırılmış fraksiyon sayısını, y_i ise fraksiyon i 'nin oranını göstermektedir.

Çoklu dağılımlı hız sabiti modellerinde: mineraller tane boyut fraksiyonlarına ayrılmakta, ayrılan her bir boyut fraksiyonu da aynı zamanda yüzebilirliğine göre de kısımlarına ayrılmaktadır. Bu modeller yukarıdaki gibi rastsal veya serbestleşme ve yüzeydeki reaktif kaplaması ile bağlantılı olabilmektedir (King, 1976; Niemi vd., 1997).

2 ve 3 fraksiyonlu gibi çoklu fraksiyonlu modellerin, 2 parametrelili modellere göre daha iyi korelasyon gösterdiği sonucuna ulaşılabilir. Bunun sebebinin bu 2 modelin, 2 parametrelili modellere göre daha fazla parametre içermesi olabilir (Albjanic vd., 2015). Buna karşın, bu yorum 2 parametrelili klasik modelin neden deneysel verilere iyi bir uyum sağladığını aydınlatamamaktadır (Agar vd., 1998; Ahmed, 2004; Mazumdar, 1994; Uçurum, 2009; Manqiu Xu, 1998). Bundan dolayı parametrelerdeki artışın etkilerini gösterebilecek ve yüksek değerlerini tespit edebilecek daha uygun model bulmak için daha çok araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır (Apling ve Ersayın, 1986).

Bunların yanında, popülasyon denge modelleri, kesikli zamanlı kinetik modellerin özel bir türüdür. Bu modeller flotasyon alt süreçlerinin gerçekleşme olasılıkları prensibine dayalıdır (Herbst ve Harris, 2007; Jovanovic ve Miljanovic, 2015). Flotasyon sürecinin makro çaptaki modellemesinde, Popülasyon denge modeli yaklaşımı Bloom ve Heindel, (1997), Casali vd. (2002), Sbarbaro vd. (2008) ve Sosa-Blanco vd. (1999) taraflarından kullanılmıştır

3. MATERYAL VE YÖNTEM

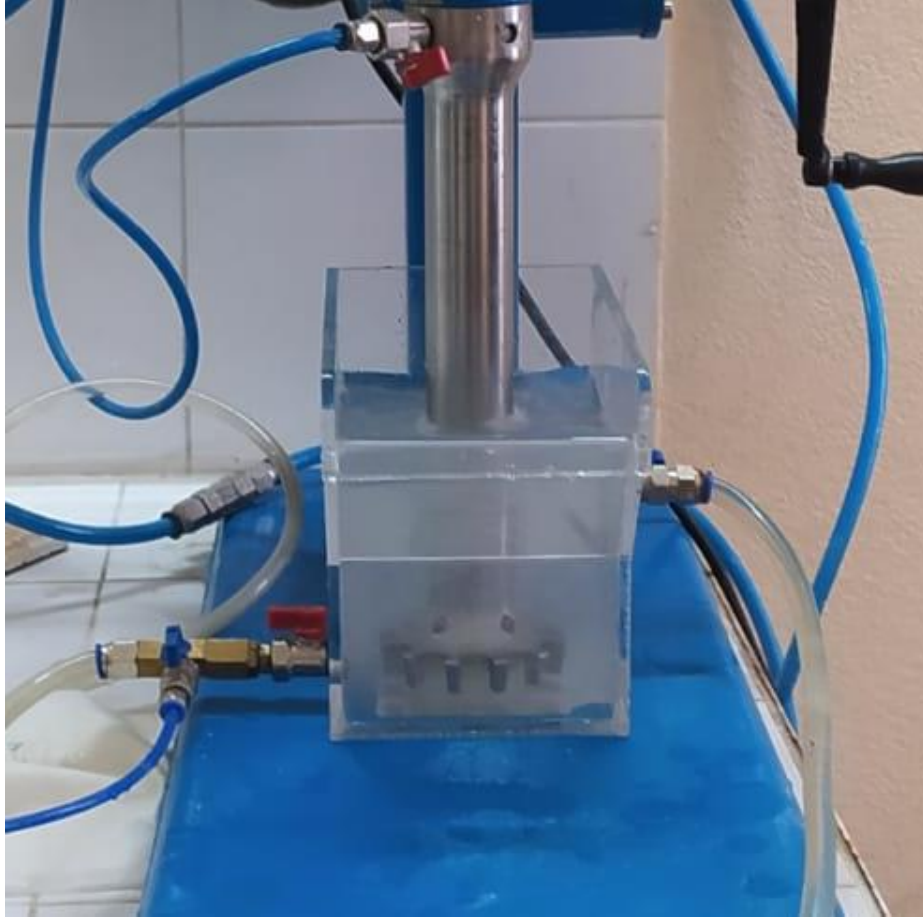
Deneysel çalışmalarda Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarında mevcut laboratuvar ölçekli Denver mekanik karıştırmalı flotasyon makinesi kullanılmıştır. Deneysel, klasik mekanik karıştırmalı flotasyon makinesinde yapılan deneylerde elde edilmiş sonuçlar ile mikro-kabarcık üretici takılarak modifiye edilmiş flotasyon hücresinde yapılan deneylerde elde edilen sonuçların karşılaştırması amacı ile planlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak, mevcut flotasyon makinasına uygun modifiye hücre tasarlanıp yaptırılmış ve modifiye flotasyon hücre deneyleri de aynı flotasyon makinasında gerçekleştirilmiştir. Deneysel %99 saflıkta SiO₂ kullanılmıştır. Flotasyon deneylerinin planlanması ve sonuçların analizlerinde istatistiksel deney tasarımı uygulanmış ve tasarımda Design Expert yazılımının 11. Versiyonunun deneme sürümünden yararlanılmıştır.

3.1 Malzeme

Deneysel ESOĞÜ Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarlarında mevcut -3 mm boyutlu %98 saflıkta SiO₂ numuneleri kullanılmıştır. -0,15 mm boyut fraksiyonu ayrıldıktan sonra kapalı devre öğütme ile +0,15 mm boyut fraksiyonu -0,15 mm'ye indirilmiştir ve deneylerde kullanılmak üzere belirlenen miktarlarda numune, numune bölme kurallarına uygun olarak bölünmüştür.

Hidrofilik yüzeye sahip kuvars tanelerini yüzdürebilmek için toplayıcı olarak Aeromin 3030C kullanılmış, kullanılan toplayıcının köpürme özelliği olduğu için ayrı bir köpürtücüye ihtiyaç duyulmamıştır.

Flotasyon çalışmaları 3 l hacimli kare kesitli hücrelerde yapılmıştır. Bu çalışma için hücreler özel olarak yaptırılmıştır. Mikrokabarcık üreticinin etkisini belirlemek için kare kesitli hücrenin bir seti olduğu gibi kullanılmıştır. Diğer hücre seti, kavitasyon ile mikro-kabarcık üreten bir sistemin monte edilmesi ile modifiye edilmiştir. Modifiye flotasyon hücresi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Modifiye flotasyon hücresi

3.2 Yöntem

Çalışmalar klasik ve mikro kabarcık üretici eklenerek modifiye edilen kare kesitli hücrelerde mekanik karıştırmalı flotasyon çalışmalarıdır. Deneysel çalışmaların planlanıp yorumlanmasında istatistiksel tasarım yöntemlerinden yararlanılmıştır. Deneyler sonunda yanıt değişkenlerinin etkisi incelenen parametrelere bağlı matematiksel modelleri elde edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında klasik ve modifiye mekanik karıştırmalı flotasyon karşılaştırması yapılarak mikro-kabarcık üreticinin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

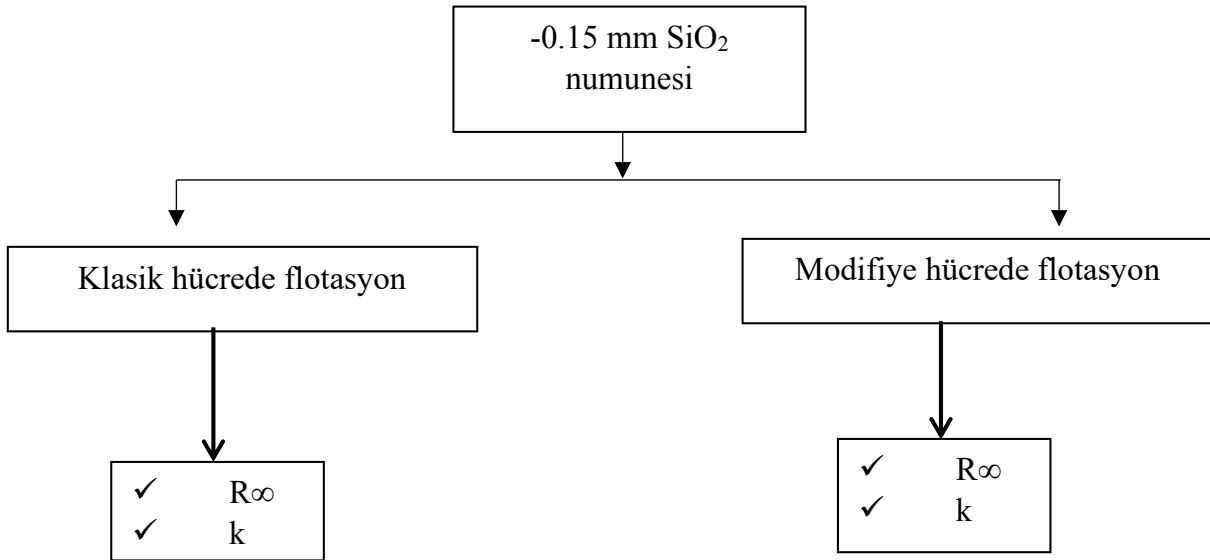
3.2.1 Flotasyon çalışmaları

Flotasyon çalışmalarında numune %50 katı oranında toplayıcı ile 4 dakika şartlandırıldıktan sonra pülp, deneyde uygulanacak katı oranı dikkate alınarak seyreltilmiştir. Flotasyon sırasında hava 7 l/d'da sabit tutulmuştur. Flotasyon hız sabiti olan

“k”yı belirlemek için köpük; ilk 30, 30-60, 60-90 ve 90-150 saniye aralıklarında olmak üzere 4 aşamada alınmıştır. Daha sonra alınan yüzen ürünler kurutulup tartılarak; 30, 60, 90 ve 150 sn de yüzen miktarlar kümülatif olarak hesaplanmıştır. Süreye bağlı kümülatif yüzen miktar değerleri ($R_{30}, R_{60}, R_{90}, R_{150} = R_T, t$) kullanılarak her deneyde sonsuz sürede yüzebilecek maksimum miktar (R_{∞}) parametresi tahmin edilmiştir. Bu hesaplamada, MATLAB yazılımının üssel eğri tahmin kısmında en küçük kareler yönteminden yararlanılmıştır. “k” değerinin hesaplanmasında ise kinetik eşitlik olarak 1. derece klasik model kullanılmıştır (Eşitlik 2.8). Bu modelin seçilmesinin nedeni, tezin Flotasyon Kinetiği bölümünde (Bölüm 2.3) bahsedildiği gibi birçok flotasyon kinetiği modelin bulunmasına rağmen, klasik 1. derece modelin deneysel verilere uyumluluğunun yüksek olmasıdır (Agar vd., 1998; Ahmed, 2004; Mazumdar, 1994; Uçurum, 2009; Manqiu Xu, 1998).

Bu yöntemde, kullanılan yazılım, uygulamada her bir deney için o deneyde yüzen miktarlara bağlı bir R_{∞} değeri tahmin etmiştir. Ancak, bilindiği gibi “ R_{∞} ” değeri ile “k” değeri birbirlerine bağlı olarak değişmektedir. Daha açık bir ifade ile örneğin “ R_{∞} ” değeri %8 gibi çok küçük bir değer ise, flotasyon süresi ilk 30 sn de tamamlanmakta ve sonuçta “k” değeri çok büyük olmaktadır; “ R_{∞} ” değeri %80 gibi büyük bir değere ulaştığında ise, malzemenin tamamının yüzdürülmesi daha uzun sürmekte ve zamanın uzaması “k” değerini düşürmektedir. Bu da, “k” değerlerinin karşılaştırmasının, yüzme hızının değerlendirilmesi açısından güvenilirliğini düşürmektedir. Bu problemi gidermek için “k” değerlerinin hesaplanmasında, klasik ve modifiye hücrelerle yapılan 20 deneyden oluşan setlerinin her birisi için tahmin edilen en yüksek “ R_{∞} ” değeri baz alınmıştır. Diğer bir deyişle 20 deney içindeki en yüksek R_{∞} kullanılarak, Eşitlik 2.8’de, R değerleri yerine 150 saniye sonundaki konsantre, t yerine 150 yazılarak k değerleri hesaplanmıştır.

Elde edilen verilerin istatistiksel analizi sonrasında flotasyon sürecinin, etkisi incelenen parametrelere bağlı olarak “ R_{∞} ” ve “ $R_{\infty, \max}$ ” için hesaplanan “k” için matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Yapılan deneysel çalışmaların şematik gösterimi Şekil 3.2’de verilmektedir.



Şekil 3.2. Yöntemin şematik gösterimi

Modifiye hücre deney düzeneği

Modifiye deneylerde hücre hava tutunum oranı sabit tutulmuştur. Bunun için 7 l/d olarak belirlenen hava debisi, modifiye deneylerde de mekanik pervane kenarından 4 l/d ve mikro kabarcık üreticiden 3 l/d olacak şekilde toplam 7 l/d'da sabit tutulmuştur. Modifiye hücre flotasyon deney düzeneği Şekil 3.4'te verilmektedir.

Şekil 3.4'ten de görüldüğü gibi, hücre modifikasyonu; hücre tabanına yakın mesafeye kabarcık üretici, köpük zonu olarak belirlenen mesafenin altına da kavitasyonun sağlanacağı sıvıyı temin için sıvı emme açıklığı oluşturarak yapılmıştır. Kavitasyon için kullanılan sıvı debisi pülpte çok yükselme ve köpük-pülp ara yüzeyinin hücre boyundan yukarı çıkıp pülpte taşmaya yol açtığı için (ön denemelerde bu görülmüştür), sıvının hücreden alınıp kısa devre halinde hücreye küçük kabarcıklarla birlikte beslenmesi şeklinde tasarlanmıştır.



Şekil 3.3. Modifiye hücre flotasyon deney düzeneği (1- Mikro-kabarcık üretici, 2- Kare kesitli flotasyon hücresi 3- Flotasyon makinası)

3.2.2 İstatiksel deney tasarımı

Deney tasarımında cevap-yüzey yöntemlerinden birisi olan Merkezi Kompozit Tasarım (Central Composite Design; CCD) kullanılmıştır. Eksenel noktaların hesaplanmasında α değeri olarak kullanılan yazılımın önerisi olan 1,68 değeri seçilmiştir. Bu verilere göre etkisi incelenen parametreler ve seviyeleri Çizelge 3.1’de verilmektedir. Deney sonuçlarının incelenmesinde, iki set (klasik ve modifiye hücre flotasyon çalışmaları) elden edilen sonuçlar kategorik faktör olan hücre tipine göre veri seti oluşturulup analiz edilmiştir

Bağımlı parametreler veya yanıt değişkenleri olarak:

1. k değerini belirlemek için hesaplanarak kullanılan R_{∞} değeri,
2. flotasyon hızını belirtir “k” değeri seçilmiştir.

Çizelge 3.1. Bağımsız parametreler ve seviyeleri

Parametre	Seviye				
	$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
Katı Oranı (%)	21,59	25	30	35	38,41
Karıştırma Hızı (rpm)	1197,73	1300	1450	1600	1702,27
Toplayıcı Miktarı (g/t)	52,96	70	95	120	137,04
Hücre tipi	Klasik			Modifiye	

3.2.3 Sonuçların incelenmesi

İlk olarak deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafikler; *etkisi incelenen parametrenin* (-) ve (+) kodlu değerleri için *verimin* flotasyon süresine göre değişimini gösterecek şekilde çizilmiştir. Bu grafiklerin çizilmesinde; etkisi incelenen parametre dışında kalan diğer iki parametrenin (Sabit parametre 1 ve Sabit parametre 2'nin) koşulları:

1. Sabit Parametre 1: (-) Sabit Parametre 2: (-) Etkisi İncelenen Parametre: (-; +)
2. Sabit Parametre 1: (-) Sabit Parametre 2: (+) Etkisi İncelenen Parametre: (-; +)
3. Sabit Parametre 1: (+) Sabit Parametre 2: (-) Etkisi İncelenen Parametre: (-; +)
4. Sabit Parametre 1: (+) Sabit Parametre 2: (+) Etkisi İncelenen Parametre: (-; +)
5. Sabit Parametre 1: (0) Sabit Parametre 2: (0) Etkisi İncelenen Parametre: ($-\alpha$; $+\alpha$)

olarak sabit tutulmuştur; bu şekilde etkisi incelenen her parametre için; toplam 5 grafik çizilmiştir. Grafikler ilk yanıt değişkeni olan verim için 5 ayrı grafik olarak çizilmiştir; ikinci yanıt değişkeni olan flotasyon hız sabiti için ise, zamana göre çizilemediği için, tüm koşullardaki değişim tek grafik halinde gösterilmiştir. Son parametre olan hücre tipinin etkisinin grafiksel gösteriminde ise; yine ilk yanıt değişkeni olan *verimde* zamana bağlı değişim baz alınarak bu kez diğer üç parametrenin iki seviyesi için çizilmiştir. Sonuçta; 2 seviye ve 3 parametreden 2^3 'e göre toplam 8 grafik elde edilmiştir ve tüm veriler tek grafik altında toplanmıştır. İkinci yanıt değişkeni olan *flotasyon hız sabiti* üzerindeki etkisi diğer parametrelerle birlikte incelenmiştir. Bu grafiklerin incelenmesi ile yanıt değişkenler üzerinde etkisi incelenen parametreler hakkında ön değerlendirmede bulunulmuştur. Daha sonrasında bulguların istatistiksel anlamlılığı test edilmiştir.

İstatiksel analiz kısmında ANOVA analizi yapılmıştır. Mikro-kabarcık üreticinin etkisinin anlamlılığını test edebilmek için her iki deney seti, “hücre tipi” nin “kategorik faktör” olarak eklenmesi ile birleştirilmiştir. Birleştirilmiş deney sonuçlarında, seviyeleri “klasik hücre” ve “modifiye hücre” olarak düzenlenen “hücre tipi” kategorik faktörün etkisinin anlamlılığı hem k yanıt değişkeni hem de R_{∞} yanıt değişkeni için incelenmiştir. Her bir yanıt değişkeni için “Model Eşitlikleri” oluşturulup, modelin istatiksel anlamlılığını ve tahmin gücünü gösteren R^2 ve PR^2 değerleri değerlendirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların, bir yanıt değişkeni (R_{∞} k) için ayrı ayrı grafiksel olarak ifade edilip incelenmesi, “4.1. Deneysel Bulgular” başlığı altında yapılmıştır. İnceleme sonucunda elde edilen bulguların istatistiksel olarak değerlendirilmesi ise “4.2. İstatistiksel Analiz” başlığı altında verilmiştir.

4.1 Deneysel Bulgular

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmektedir. Etkisi incelenen parametreler, verim ve flotasyon hız sabiti olmak üzere iki başlık altında değerlendirilmiştir.

4.1.1 Flotasyon verimi üzerindeki etkiler

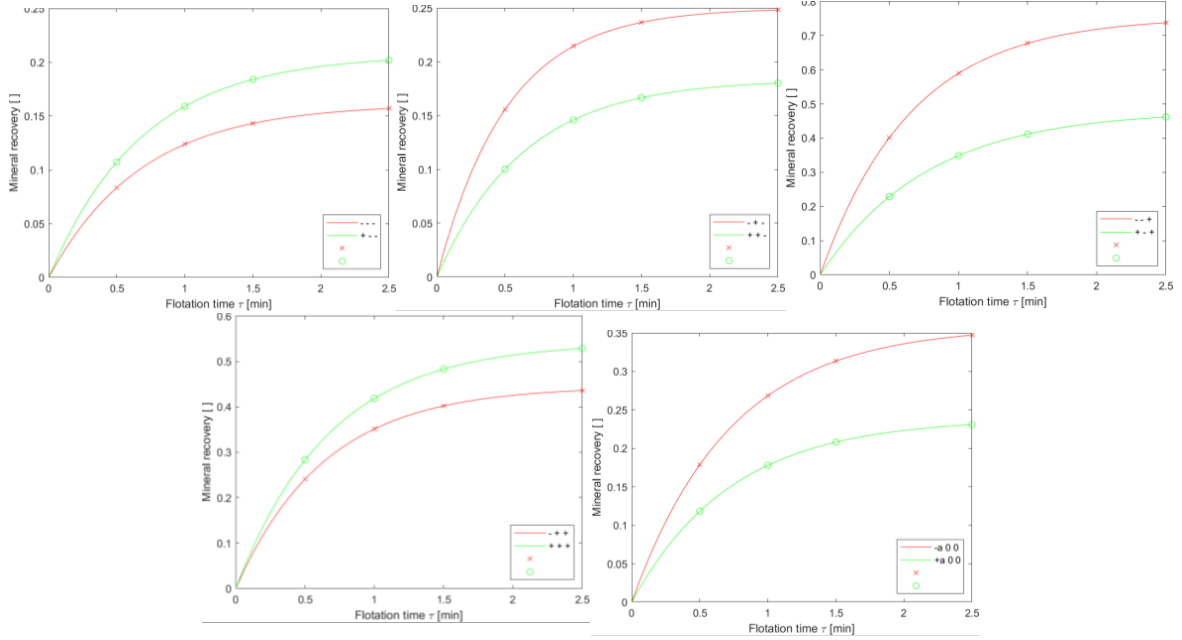
Parametre etkilerini belirlemek için; *etkisi incelenen parametrenin* (-) ve (+) kodlu değerleri için *verimin* flotasyon süresine göre değişimleri incelenmiştir. Etkiler; katı oranı, karıştırma hızı, toplayıcı miktarı ve son olarak hücre tipi olmak üzere ayrı başlıklar altında incelenmiştir.

4.1.1.1 Katı oranının etkisi

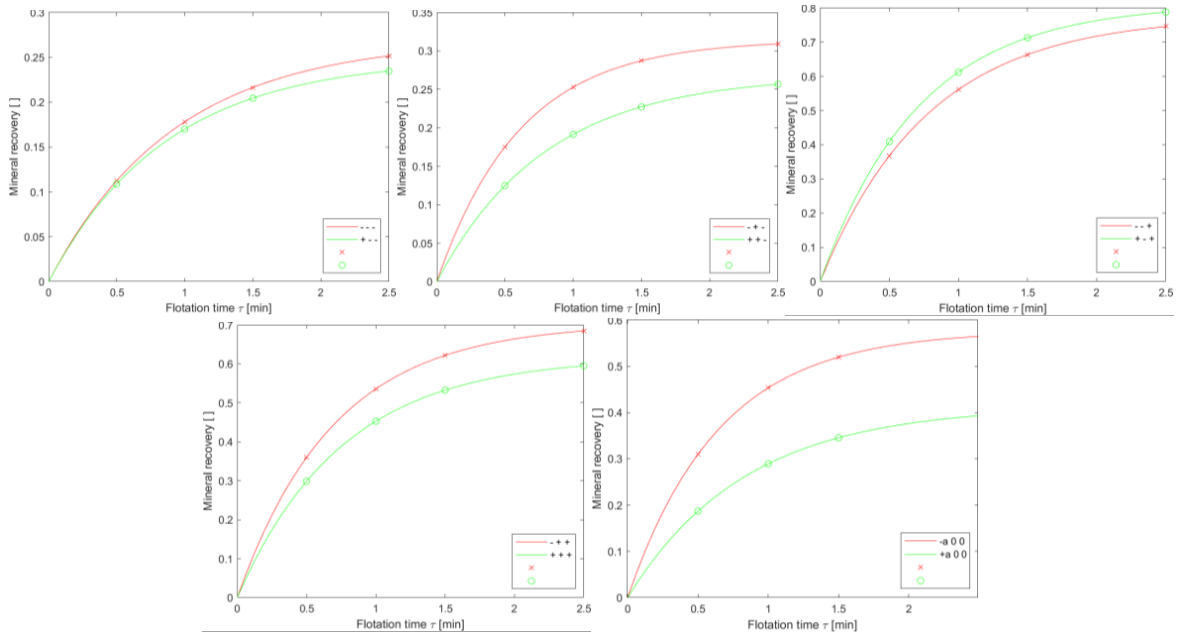
Katı oranının etkisini gösteren veriler, klasik hücre için Şekil 4.1’de 5, modifiye hücre için ise Şekil 4.2’de 5 grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney sonuçları

	A:Katı oranı	B:Kar. hızı	C:Top. mik.	D:hücre tipi	R30	R60	R90	R150	Rmax	k 10 ⁻³
	%	rpm	g/t		%	%	%	%	%	1/s
1	25	1300	70	Modifiye	8,50	19,45	23,12	23,93	26,98	2,06
2	35	1300	70	Modifiye	10,66	16,94	20,89	23,25	24,88	1,99
3	25	1600	70	Modifiye	16,60	26,03	29,40	30,19	31,45	2,72
4	35	1600	70	Modifiye	11,89	19,09	23,79	25,08	26,85	2,18
5	25	1300	120	Modifiye	37,27	55,44	66,88	74,59	77,79	11,77
6	35	1300	120	Modifiye	42,18	60,23	70,50	79,61	81,28	14,39
7	25	1600	120	Modifiye	36,75	52,57	62,55	68,63	70,47	9,59
8	35	1600	120	Modifiye	31,11	44,52	52,13	60,38	61,81	7,41
9	21,591	1450	95	Modifiye	29,27	46,28	53,98	54,90	57,71	6,28
10	38,409	1450	95	Modifiye	18,83	28,85	34,43	39,43	41,40	3,84
11	30	1197,73	95	Modifiye	28,69	43,88	54,53	62,09	66,31	7,81
12	30	1702,27	95	Modifiye	19,59	30,12	36,95	41,10	43,51	4,07
13	30	1450	52,9552	Modifiye	11,44	17,33	19,08	19,99	20,51	1,67
14	30	1450	137,045	Modifiye	51,46	70,60	80,50	86,75	87,32	22,14
15	30	1450	95	Modifiye	17,21	26,50	33,95	37,94	41,00	3,65
16	30	1450	95	Modifiye	27,40	40,36	49,92	56,13	59,05	6,52
17	30	1450	95	Modifiye	15,53	24,66	31,22	35,22	38,26	3,31
18	30	1450	95	Modifiye	17,84	27,39	34,39	39,52	42,58	3,85
19	30	1450	95	Modifiye	21,55	32,51	41,05	47,64	51,37	5,02
20	30	1450	95	Modifiye	26,35	38,30	46,99	53,73	56,28	6,06
Modifiye hücre "k" hesabında kullanılan R _{∞;max}									87,32	
21	25	1300	70	Klasik	7,88	12,65	14,70	15,36	16,13	1,28
22	35	1300	70	Klasik	10,26	16,22	18,73	19,88	20,73	1,71
23	25	1600	70	Klasik	14,92	22,32	23,89	24,31	25,01	2,16
24	35	1600	70	Klasik	10,27	14,24	16,80	18,07	18,39	1,53
25	25	1300	120	Klasik	40,95	57,58	68,53	73,74	75,47	12,13
26	35	1300	120	Klasik	23,70	34,41	40,60	46,72	48,14	5,05
27	25	1600	120	Klasik	28,35	41,24	49,45	52,37	54,21	6,03
28	35	1600	120	Klasik	24,88	34,66	39,55	44,22	44,50	4,65
29	21,591	1450	95	Klasik	16,68	27,45	32,64	33,79	35,87	3,23
30	38,409	1450	95	Klasik	12,02	17,64	20,65	23,22	23,87	2,04
31	30	1197,73	95	Klasik	9,67	14,77	18,32	21,32	22,87	1,85
32	30	1702,27	95	Klasik	15,25	22,48	27,25	30,18	31,44	2,8
33	30	1450	52,9552	Klasik	10,36	14,50	15,49	16,05	16,23	1,34
34	30	1450	137,045	Klasik	39,29	54,00	61,93	68,64	68,98	10,09
35	30	1450	95	Klasik	12,12	18,40	22,81	26,21	27,96	2,36
36	30	1450	95	Klasik	18,27	27,92	34,13	38,94	41,27	3,9
37	30	1450	95	Klasik	17,30	25,57	31,45	34,92	36,62	3,37
38	30	1450	95	Klasik	16,44	23,45	27,32	29,70	30,30	2,74
39	30	1450	95	Klasik	19,62	28,85	34,77	38,58	40,08	3,85
40	30	1450	95	Klasik	20,28	29,65	35,71	37,13	38,58	3,65
Klasik hücre "k" hesabında kullanılan R _{∞;max}									75,47	



Şekil 4.1. Klasik hücre çalışmalarında katı oranın verim üzerine etkisi



Şekil 4.2. Modifiye hücre çalışmalarında katı oranın verim üzerine etkisi

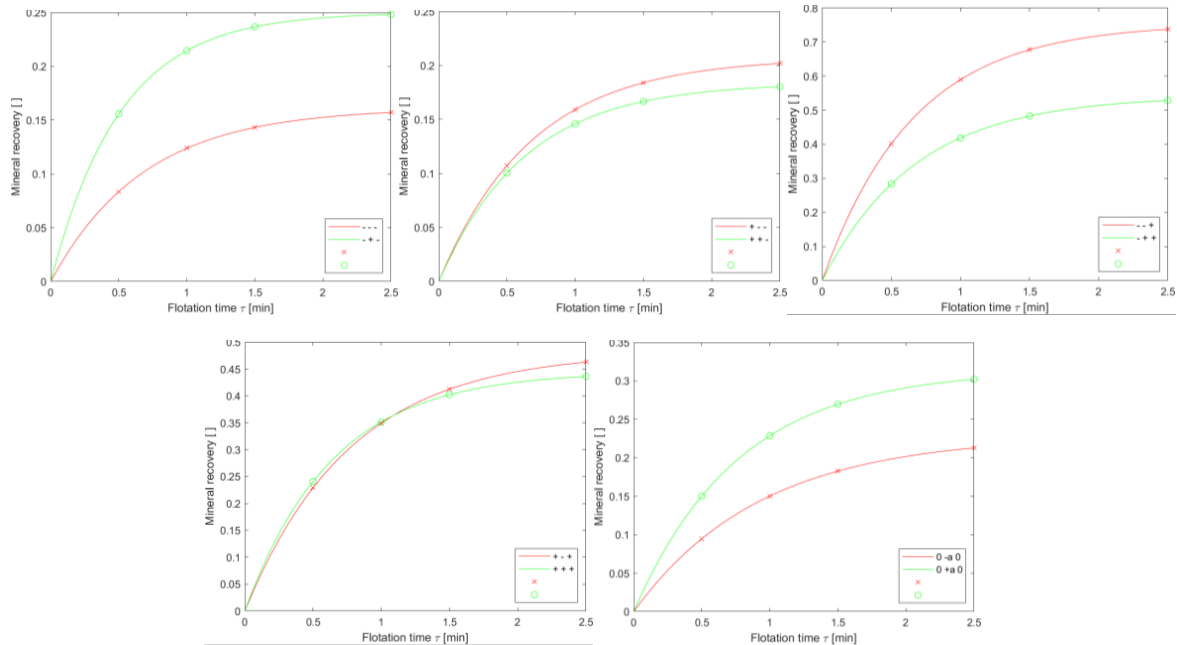
Şekil 4.1 ve 4.2 incelendiğinde; katı oranındaki artışın genel olarak hem klasik flotasyon hücresinde hem de modifiye flotasyon hücresinde verimi azalttığı görülmektedir. Klasik hücrede, sadece diğer iki parametrenin (-) seviyesinde düşük katı oranında verim daha yüksek çıkmıştır, ancak bu fark diğer koşullardaki farka göre daha küçüktür. Modifiye

hücrede ise toplayıcı miktarı fazla olduğunda ve karıştırma hızı düşükken katı oranını arttırmak verimi çok az değiştirmiştir.

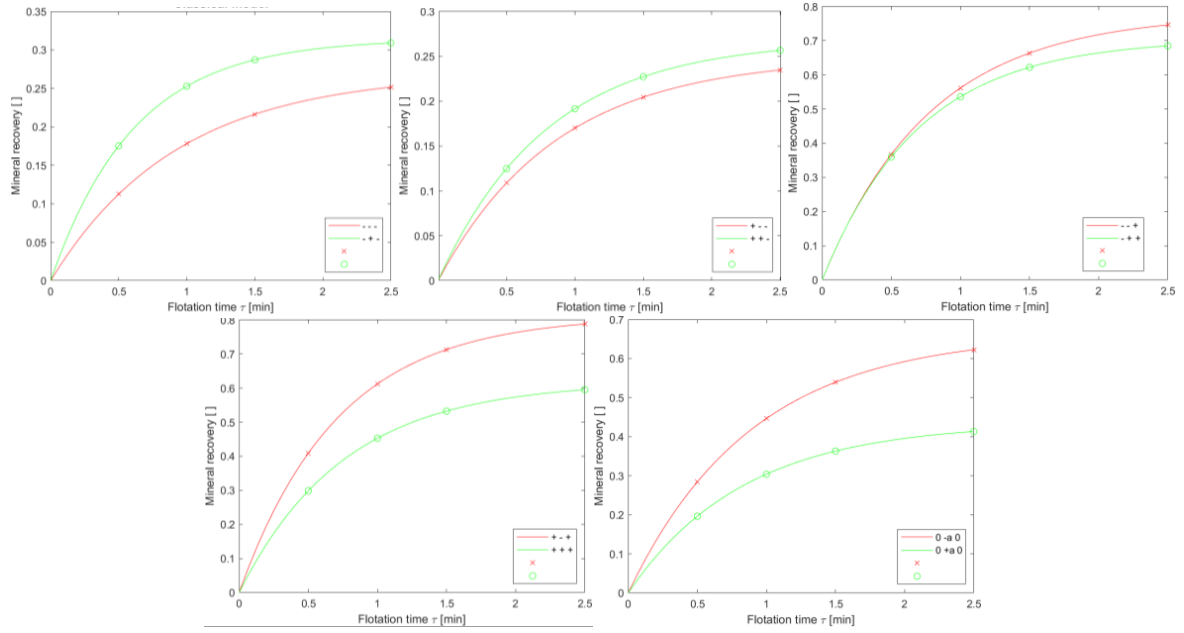
4.1.1.2 Karıştırma hızının etkisi

Karıştırma hızının etkisini gösteren veriler, klasik hücre için Şekil 4.3'te 5, modifiye hücre için ise Şekil 4.4'te 5 grafik olarak verilmiştir.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 incelendiğinde, karıştırma hızındaki artışın genel olarak klasik flotasyon hücresinde toplayıcı ve katı oranının yüksek olduğu seviyelerde verimi artırırma, toplayıcı miktarının ve katı oranının düşük seviyelerinde ise azaltma eğiliminde olduğu görülmektedir. Karıştırma hızının aşırı düşük yada yüksek olduğu noktalarda ise verimde herhangi bir fark söz konusu olmamıştır. Modifiye flotasyon hücresinde ise karıştırma hızını arttırmak verimi genel olarak azaltmıştır. Sadece diğer parametrelerin düşük seviyelerinde karıştırma hızının artması verimi artırma eğilimi göstermiştir. Bu sonuçlar, karıştırma hızının etkisinin diğer parametre seviyelerine bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir.



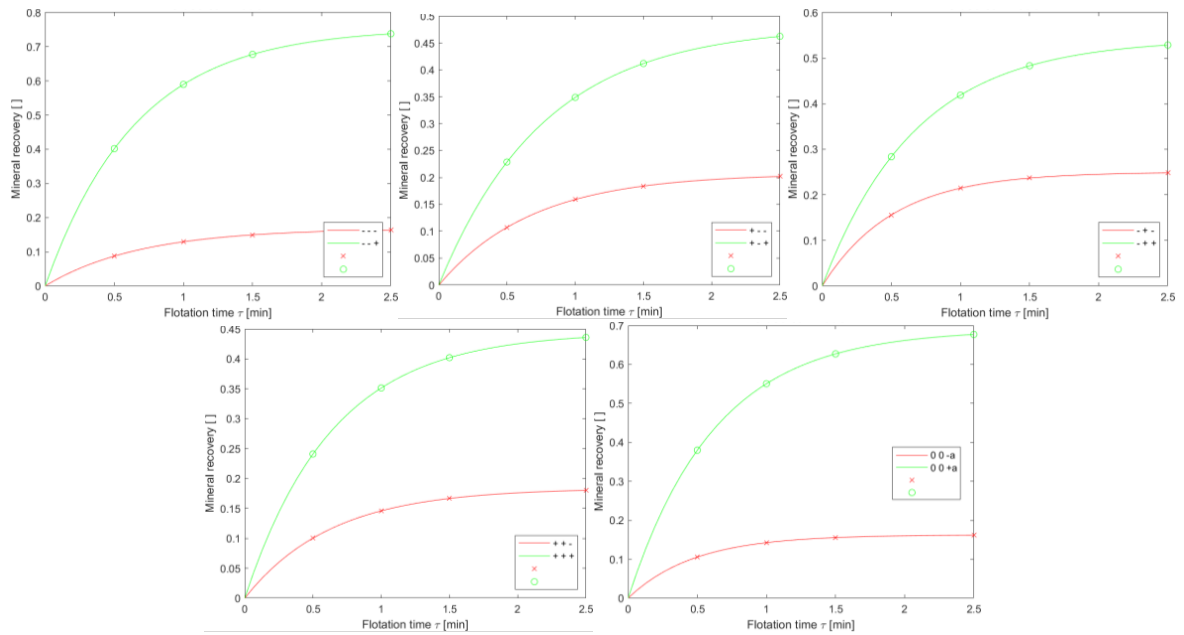
Şekil 4.3. Klasik hücrede çalışmalarında karıştırma hızının verim üzerine etkisi



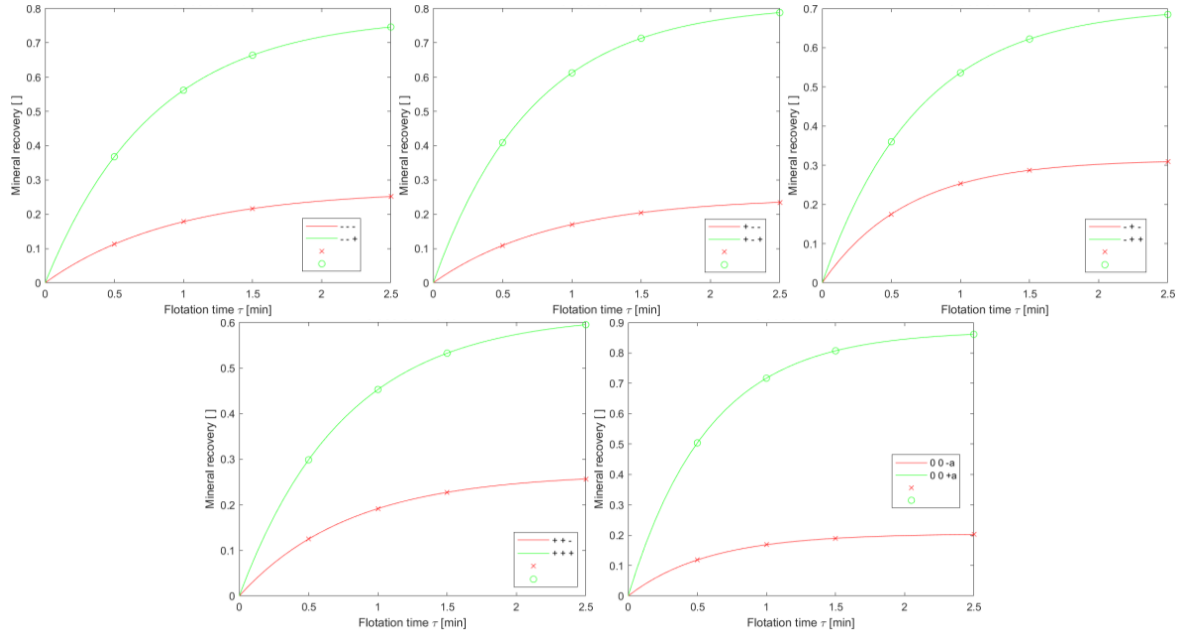
Şekil 4.4. Modifiye hücrede çalışmalarında karıştırma hızının verim üzerine etkisi

4.1.1.3 Toplayıcı miktarının etkisi

Toplayıcı miktarının etkisini gösteren veriler, klasik hücre için Şekil 4.5'te 5, modifiye hücre için ise Şekil 4.6'da 5 grafik olarak verilmiştir.



Şekil 4.5. Klasik hücrede çalışmalarında toplayıcı miktarının verim üzerine etkisi



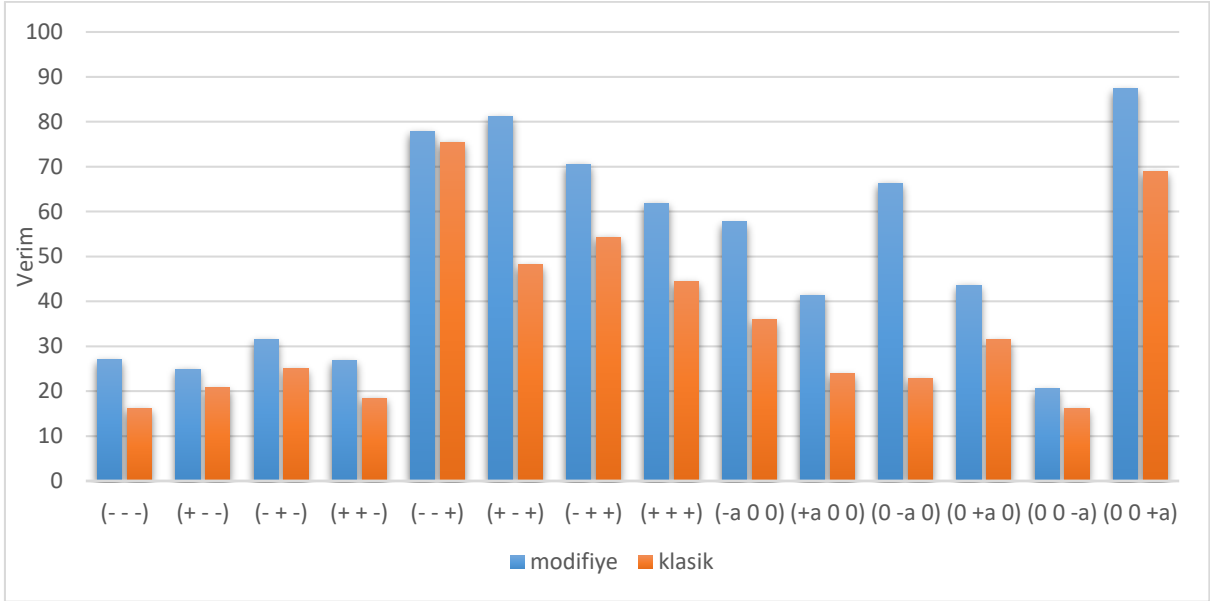
Şekil 4.6. Modifiye hücre çalışmalarında toplayıcı miktarının verim üzerine etkisi

Şekil 4.5 ve 4.6 incelendiğinde; toplayıcı miktarındaki artışın iki hücrede de verimi artırdığı ancak bu artışın modifiye hücrede daha yüksek olduğu görülmektedir

4.1.1.4 Hücre tipinin etkisi

Hücre tipinin etkisini gösteren veriler tek grafik olarak Şekil 4.7’de toplanmıştır.

Hücre tipinin etkisini gösteren Şekil 4.7 incelendiğinde, bütün koşullarda modifiye hücre verim değerlerinin klasik hücreye göre daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bu bulgular, klasik hücreye hava kabarcığı ilavesinin flotasyon verimini artırdığını net olarak göstermektedir.



Şekil 4.7. Hücre tipinin verim üzerindeki etkisi

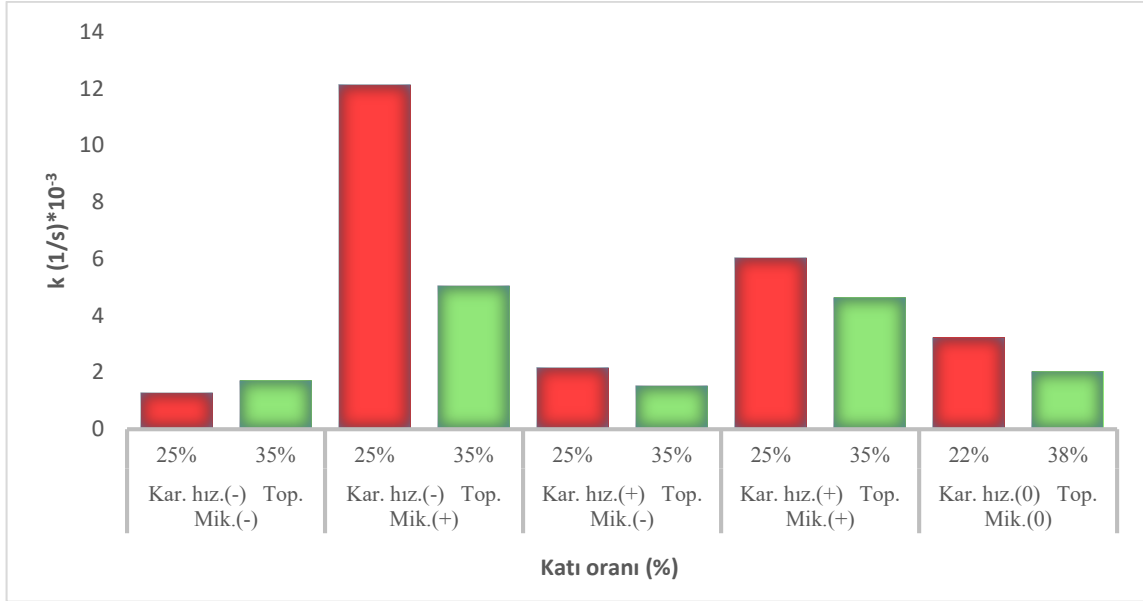
4.1.2 Flotasyon hızı üzerindeki etkiler

Parametre etkilerini belirlemek için; etkisi incelenen parametrenin (-) ve (+) kodlu değerleri için *flotasyon hızı* 'ndaki değişimler incelenmiştir. Etkiler; katı oranı, karıştırma hızı, toplayıcı miktarı ve son olarak hücre tipi olmak üzere ayrı başlıklar altında incelenmiştir.

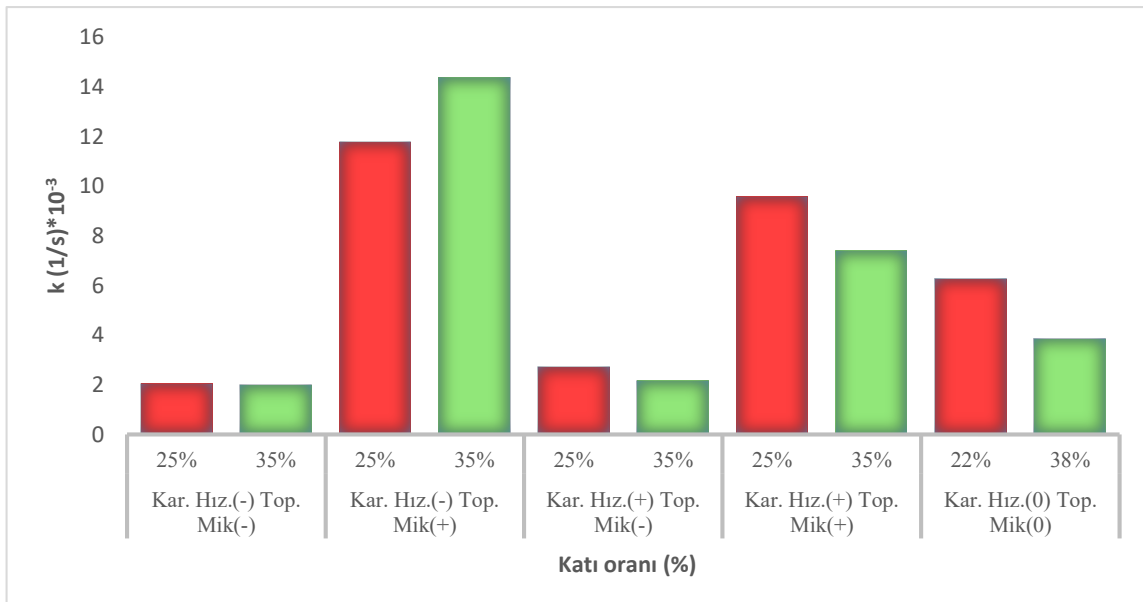
4.1.2.1 Katı oranının etkisi

Katı oranı etkisini gösteren veriler, klasik hücre için Şekil 4.8'de, modifiye hücre için ise Şekil 4.9'da grafik olarak verilmiştir.

Şekil 4.8 incelendiğinde; klasik hücrede hemen hemen bütün koşullarda katı oranındaki artışın flotasyon hızını azalttığı gözlemlenmektedir. Ancak karıştırma hızının ve toplayıcı miktarının düşük olduğu seviyelerde, katı oranındaki artış flotasyon hızını çok az miktar da olsa artırmaktadır. Şekil 4.9 incelendiğinde; katı oranındaki artışın flotasyon hızını genel olarak azaltma eğiliminde olduğu görülmektedir. Ancak karıştırma hızı düşük toplayıcı miktarı yüksek olduğunda flotasyon hızı artış göstermiştir. Bu veriler, katı oranının etkisinin diğer parametre seviyelerine bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.8. Klasik hücre çalışmalarında katı oranının flotasyon hızı üzerindeki etkisi

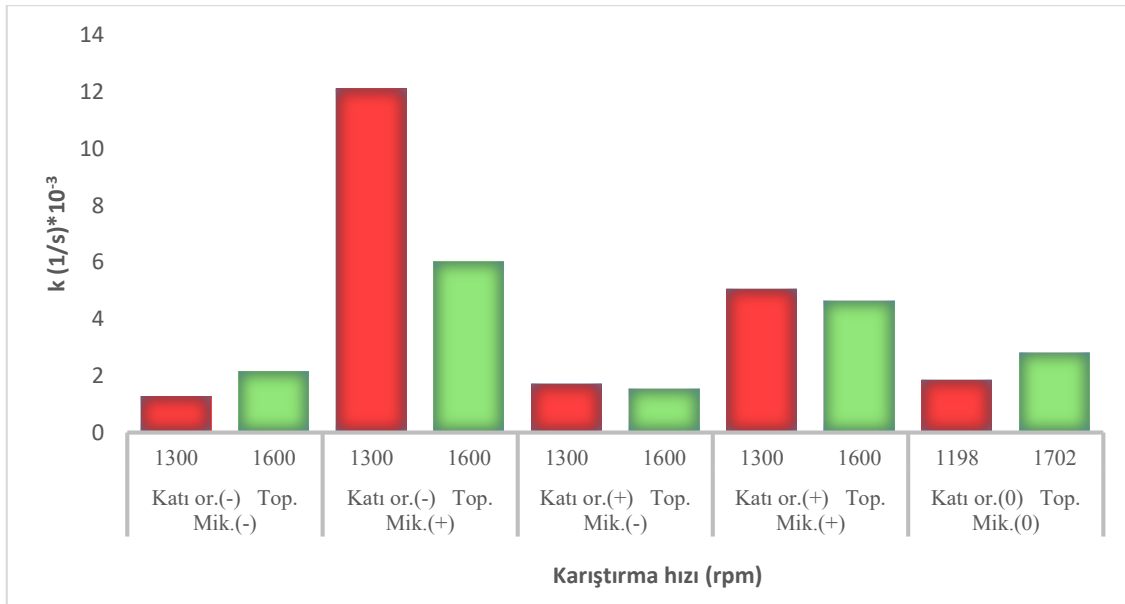


Şekil 4.9. Modifiye hücre çalışmalarında katı oranının flotasyon hızı üzerindeki etkisi

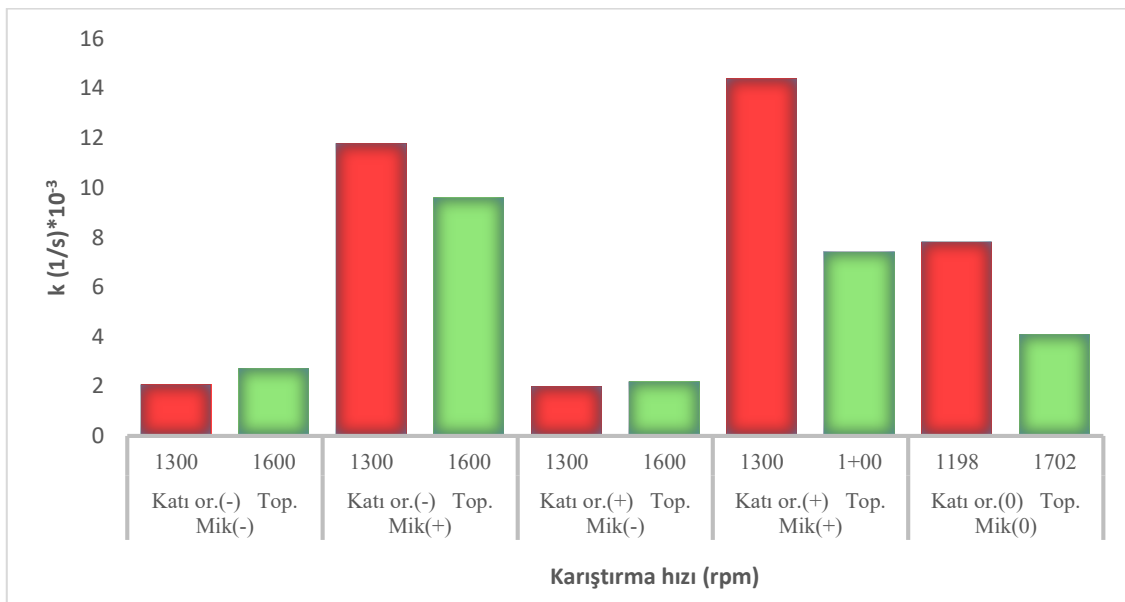
4.1.2.2 Karıştırma hızının etkisi

Karıştırma hızının etkisini gösteren veriler, klasik hücre için Şekil 4.10'da, modifiye hücre için ise Şekil 4.11'de grafik olarak verilmiştir.

Şekil 4.10 incelendiğinde; klasik hücre ile yapılan flotasyon çalışmalarında, karıştırma hızındaki artışın çoğu koşulda flotasyon hızında önemli bir değişime yol açmadığı görülmektedir. Ancak düşük katı ve yüksek toplayıcı miktarında karıştırma hızının artırılması flotasyon hızını önemli ölçüde düşürmüştür.



Şekil 4.10. Klasik hücre çalışmalarında karıştırma hızının flotasyon hızı üzerindeki etkisi



Şekil 4.11. Modifiye hücre çalışmalarında karıştırma hızının flotasyon hızı üzerindeki etkisi

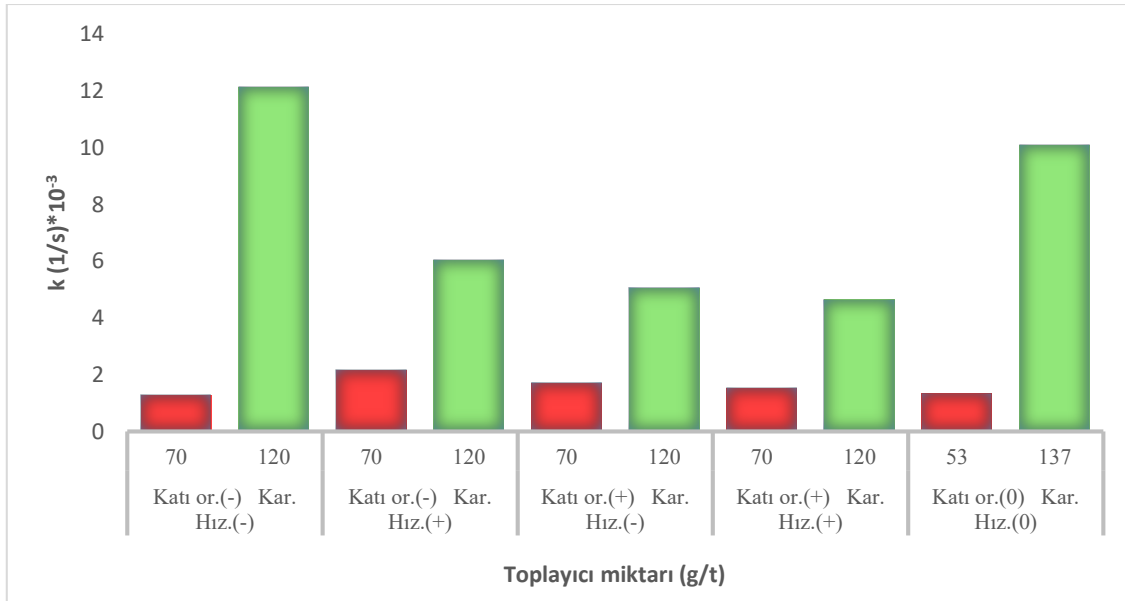
Şekil 4.11 incelendiğinde; modifiye hücre flotasyon çalışmalarında, karıştırma hızındaki artışın düşük toplayıcı miktarlarında flotasyon hızında yine önemli bir değişime yol açmadığı, yüksek toplayıcı miktarlarında ise verimi azalttığı görülmektedir.

İki farklı hücreden elde edilen bu sonuç, karıştırma hızının etkisinin özellikle toplayıcı miktarına göre değiştiğini göstermektedir.

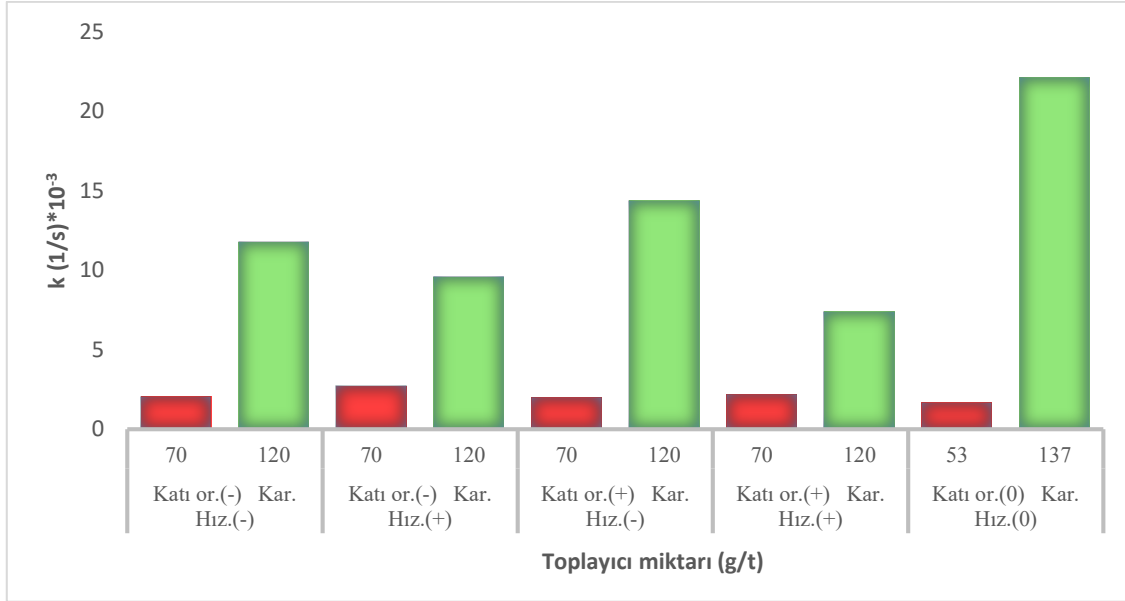
4.1.2.3 Toplayıcı miktarının etkisi

Toplayıcı miktarının etkisini gösteren veriler, klasik hücre için Şekil 4.12’de, modifiye hücre için ise Şekil 4.13’te grafik olarak verilmiştir.

Şekil 4.12 ve 4.13 incelendiğinde; toplayıcı miktarındaki artışın, hem klasik hücrede hem de modifiye hücrede flotasyon hızını artırdığı gözlemlenmektedir.



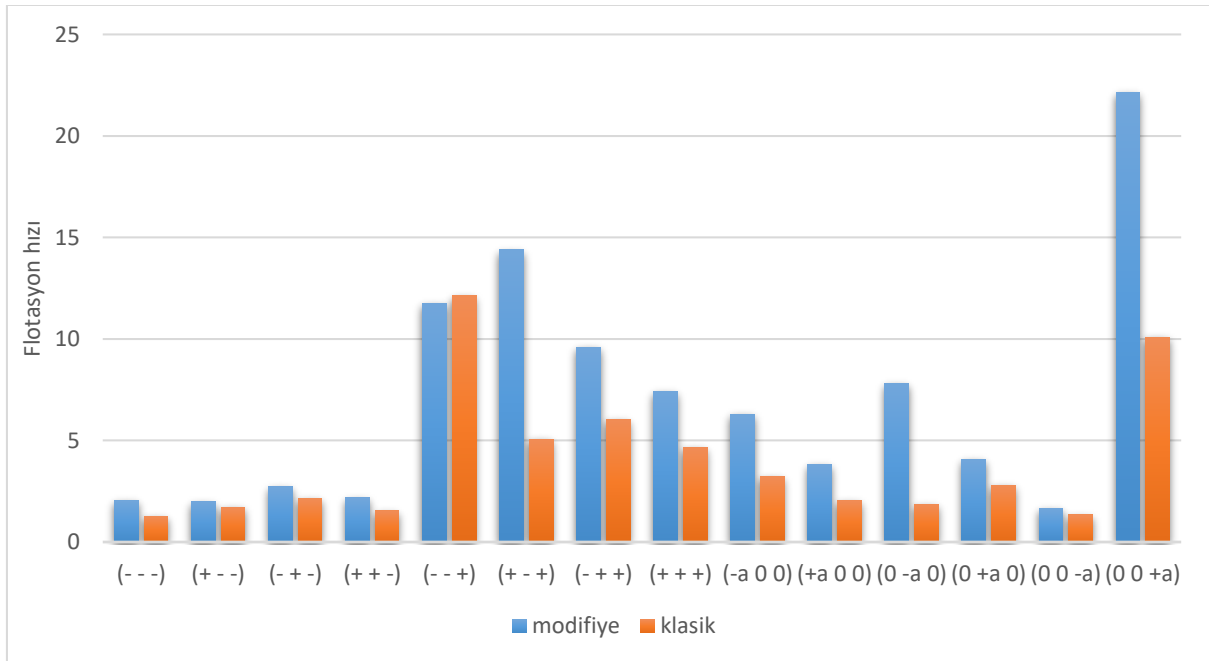
Şekil 4.12. Klasik hücre çalışmalarında toplayıcı miktarının flotasyon hızı üzerindeki etkisi



Şekil 4.13. Modifiye hücre çalışmalarında toplayıcı miktarının flotasyon hızı üzerindeki etkisi

4.1.2.4 Hücre tipinin etkisi

Hücre tipinin etkisini gösteren veriler Şekil 4.14'te toplu grafik olarak verilmiştir. Şekil 4.14 incelendiğinde; hemen hemen her koşulda modifiye hücrenin flotasyon hız değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu bulguya göre klasik hücreye mikrokabarcık ilavesinin flotasyon hızını artırdığı söylenebilir.



Şekil 4.14. Hücre tipinin flotasyon hızı üzerindeki etkisi

4.2 İstatiksel Analiz

Bu kısımda, deneysel çalışmalar sonucu edilen parametre etkilerinin istatistiksel anlamlılığını test edilmiştir. Test yöntemi olarak ANOVA analizi kullanılmıştır. R_{∞} ve k yanıt değişkenleri için ayrı ayrı model eşitlikleri oluşturulup, parametrelerin etkileri incelenmiştir. Varyans analizi için Çizelge 4.1'deki Deney sonuçları veri seti olarak kullanılmıştır.

4.2.1 R_{∞} değeri için sonuçların analizi ve modelleme

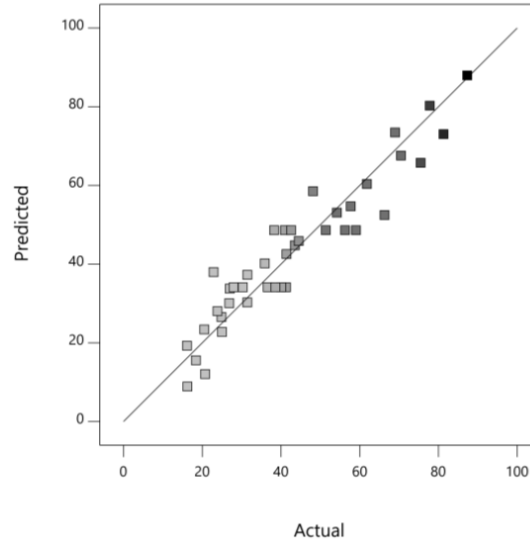
Sonuçlar, tahmin edilen R_{∞} değeri için %95 güven aralığında varyans analizine tabi tutulmuştur. Kullanılan yazılımın ilgili modülü quadratic (2. Derece) model önerisinde bulunmuştur. Anova analizine göre %95 güven aralığında etkisi istatistiksel açıdan anlamsız terimler modelden çıkartılarak “indirgenmiş ANOVA çizelgesi” oluşturulmuştur. Ancak; karıştırma hızının etkisi %95 güven aralığında anlamsız olmasına rağmen, etkisi incelenen ana parametre ve C^2 terimine ait p değerinin de 0.05'e çok yakın olduğu için, “C” ve “ C^2 ” terimlerinin her ikisi de modelde tutulmuştur.

Anova Çizelgesi ile birlikte modelin R^2 , PR^2 değerleri Çizelge 4.2 ve Model Eşitliği, *Klasik Hücre* için Eşitlik 4.1 ve *Modifiye Hücre* için Eşitlik 4.2'de verilmiştir. Model tahmin değerlerinin deneysel verilere uyum grafiği Şekil 4.15'te verilmiştir. Kullanılan yazılımda her parametrenin etkisinin grafiksel gösterimi, kategorik parametre olan D'yi de içerecek şekilde çizilememektedir; bunun yerine kategorik parametre olan hücre tiplerinin her birisi için ayrı ayrı çizdirilebilmektedir. Bu sebeple Şekil 4.16 a ve b'de klasik ve modifiye hücreler için nümerik parametrelerin etki grafikleri verilmektedir. Şekil 4.17'de ise kategorik faktör olan “hücre tipi”nin etkisini gösterir grafik verilmiştir. Varyans analizine göre karıştırma hızı ve toplayıcı miktarı arasında bir etkileşim söz konusudur. “4.1.1.2 Karıştırma hızının etkisi” başlığında yapılan grafiksel incelemeler de karıştırma hızının diğer parametre seviyelerine bağlı olarak değişebileceğini göstermişti. Buradaki varyans analizi sonucu da “karıştırma hızı”toplayıcı miktarı” arasındaki etkileşimin %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucunu vermiştir. Etkileşim grafiği de kategorik faktör olan modifiye ve klasik hücre flotasyonları için ayrı ayrı çizdirilebilmektedir. Etkileşim grafikleri klasik ve modifiye hücre için sırasıyla Şekil 4.18 a ve b'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. R_{∞} değeri için indirgenmiş ANOVA Çizelgesi

Kaynak	p-value	
Model	< 0.0001	significant
A-Katı oranı	0.0101	
B-Kar. hızı	0.0921	
C-Top. mik.	< 0.0001	
D-Hüc. tip	< 0.0001	
BC	0.0255	
C^2	0.0589	
Lack of Fit	0.6263	not significant
R^2	0,8927	
PR^2	0,8449	

Çizelge 4.2 incelendiğinde, karıştırma hızı dışındaki bütün parametrelerin %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Ayrıca Toplayıcı miktarının sadece doğrusal değil aynı zamanda parabolik etkiye sahip olması da ilgi çekicidir. Modelde karıştırma hızı ve toplayıcı miktarı etkileşimli etkiye sahiptir.

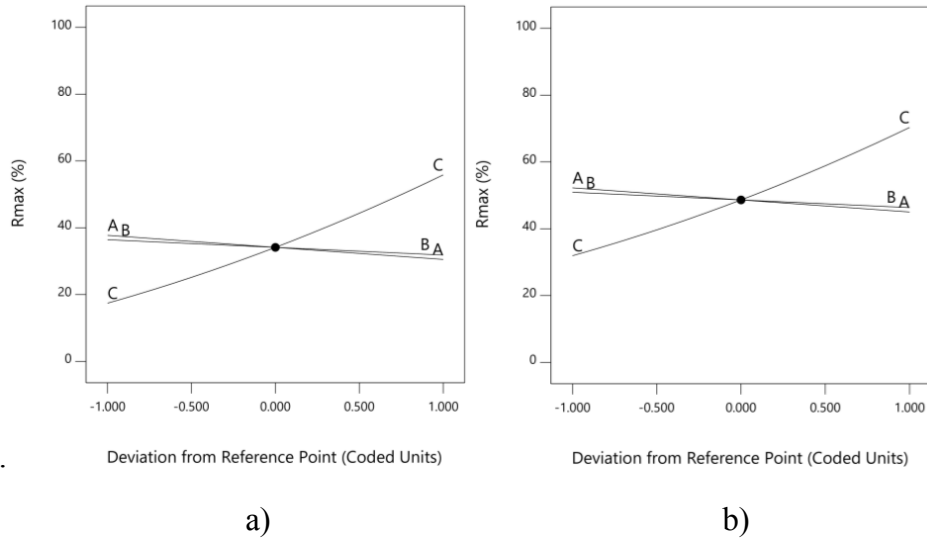


Şekil 4.15. R_{∞} değeri model tahmin değerleri-deneysel veriler uyum grafiği.

Şekil 4.15 incelendiğinde oluşturulan modelin tahmin değerlerin deneysel verilere uyduğu görülmektedir. Modelin p değerinin 0,0001'den küçük olması ve hem R^2 ve hem de PR^2 değerlerinin sırası ile 0,8927 ve 0,8449 ile hem 1'e hem de birbirine yakın olması, elde edilen modelin tahmin gücü yüksek kuvvetli bir model olduğunu göstermektedir

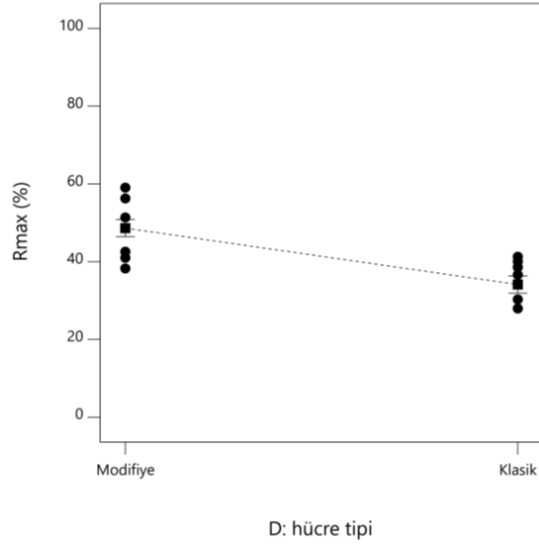
$$R_{max} = -107,46 - 0,72 * A + 0,087 * B + 1,572 * C - 0,001 * B * C + 0,003 * C^2 \quad 4.1$$

$$R_{max} = -92,95 - 0,72 * A + 0,087 * B + 1,572 * C - 0,001 * B * C + 0,003 * C^2 \quad 4.2$$

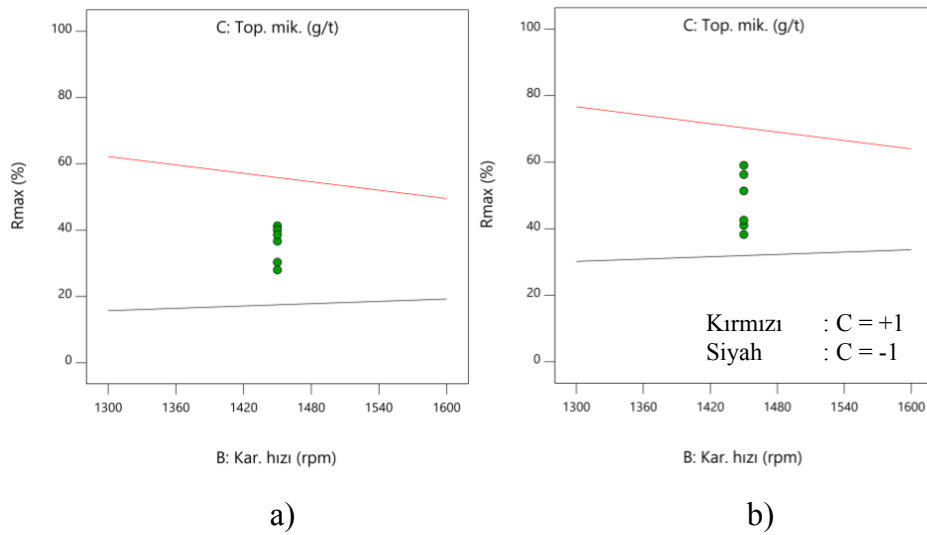


Şekil 4.16. R_{∞} değeri parametrelerin ana etki grafiği a) Klasik flotasyon hücresi b) Modifiye flotasyon hücresi

Şekil 4.16 incelendiğinde modifiye hücre flotasyonu (a) ile klasik hücre flotasyonu (b) için parametre etkilerinin çok benzer olduğu görülmektedir. Ancak R_{∞} değerleri aynı koşullarda modifiye hücrede net artış göstermiştir. Bu durum Şekil 4.17’de verilen “hücre tipinin ana etki grafiği”nden de açıkça görülmektedir. Ayrıca bu sonuç ilk aşamada “4.1.1.4 Hücre tipinin etkisi” başlığında yapılan deneysel verilerin klasik incelemesinde Şekil 4.7 ile de tam uyum içerisindedir.



Şekil 4.17. R_{∞} değerine hücre tipinin ana etki grafiği



Şekil 4.18. R_{∞} değeri Karıştırma hızı-toplayıcı miktarı etkileşim grafiği a) Klasik flotasyon hücresi b) Modifiye flotasyon hücresi

Şekil 4.18 a ve b incelendiğinde; hem klasik hücrede hem de modifiye hücrede, karıştırma hızını artırmanın toplayıcı miktarının yüksek seviyesinde, R_{∞} değerini azaltma eğiliminde olduğu, düşük toplayıcı miktarında ise yükseltme eğiliminde olduğu görülmektedir.

4.2.2 k değeri için sonuçların analizi ve modelleme

Sonuçlar, tahmin edilen k değeri için %95 güven aralığında varyans analizine tabi tutulmuştur. Kullanılan yazılımın ilgili modülü quadratic (2. Derece) model önerisinde bulunmuştur. Anova analizine göre %95 güven aralığında etkisi istatistiksel açıdan anlamsız terimler modelden çıkartılarak “indirgenmiş ANOVA çizelgesi” oluşturulmuştur. Ancak; katı oranının etkisi %95 güven aralığında p değeri 0.05 den çok az yüksek olmasına rağmen etkisi incelenen ana parametre olduğu için modelde tutulmuştur.

Anova Çizelgesi ile birlikte modelin R^2 , PR^2 değerleri Çizelge 4.3'te ve Model Eşitliği, *Klasik Hücre* için Eşitlik 4.3 ve *Modifiye Hücre* için Eşitlik 4.4'te verilmiştir. Model tahmin değerlerinin deneysel verilere uyum grafiği Şekil 4.19'da verilmiştir. Kullanılan yazılımda her parametrenin etkisinin grafiksel gösterimi, kategorik parametre olan D'yi de içerecek şekilde çizilememektedir; bunun yerine kategorik parametre olan hücre tiplerinin her birisi için ayrı ayrı çizdirilebilmektedir. Bu sebeple Şekil 4.20 a ve b'de klasik ve modifiye hücreler için nümerik parametrelerin etki grafikleri verilmektedir. Şekil 4.21'de ise kategorik faktör olan “hücre tipi”nin etkisini gösterir grafik verilmiştir. Varyans analizine göre hücre tipi-toplayıcı miktarı ve karıştırma hızı-toplayıcı miktarı arasında bir etkileşim söz konusudur. Etkileşim grafiği Şekil 4.22'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. k değeri için indirgenmiş ANOVA Çizelgesi

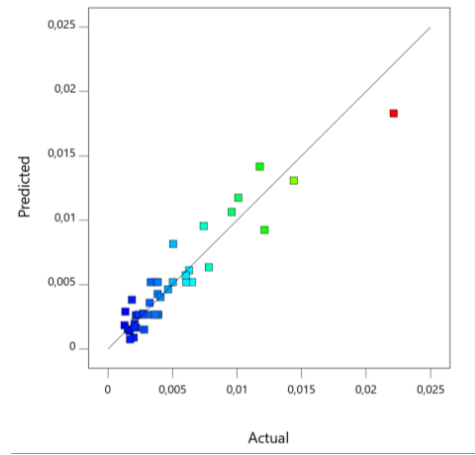
Kaynak	p-value	
Model	< 0.0001	significant
A-Katı oranı	0,0754	
B-Kar. hızı	0,027	
C-Top. mik.	< 0.0001	
D-Hüc. tip	< 0.0001	
BC	0,0092	
CD	0,0003	
C^2	< 0.0001	
Lack of Fit	0,0508	not significant
R^2	0,8898	
PR^2	0,7858	

Çizelge 4.3 incelendiğinde, katı oranı dışındaki bütün parametrelerin anlamlı olduğu görülmektedir. Ayrıca toplayıcı miktarı doğrusal etkisinin yanında parabolik etkiye de sahip

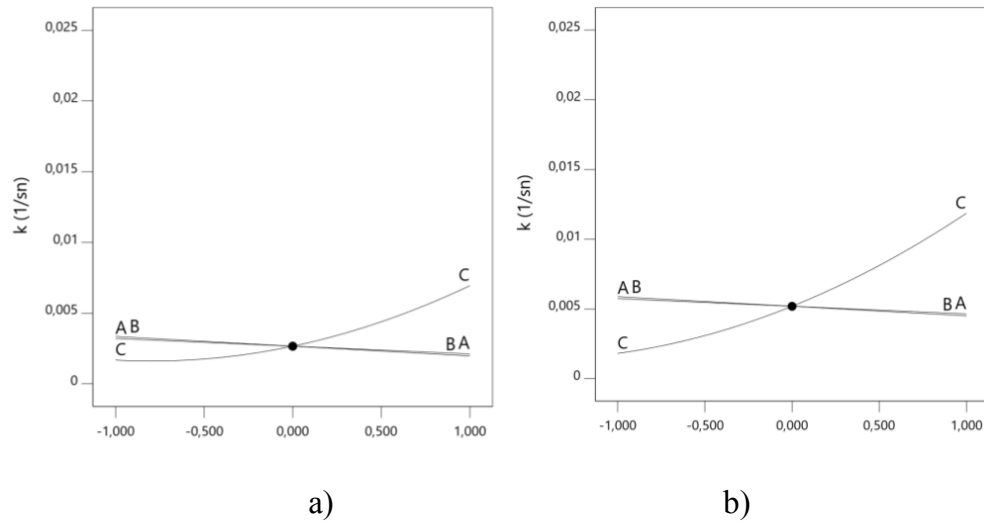
olduğu, toplayıcı miktarı – hücre tipi ve karıştırma hızı – toplayıcı miktarının flotasyon hızı üzerinde etkileşimli etkiye sahip olduğu görülmektedir.

$$k = -0,0196 - 0,00011 * A + 0,00002 * B + 0,00012 * C - 0,0000003 * B * C + 0,000003 * C^2 \quad 4.3$$

$$k = -0,0131 - 0,00011 * A + 0,00002 * B + 0,00012 * C - 0,0000003 * B * C + 0,000003 * C^2 \quad 4.4$$



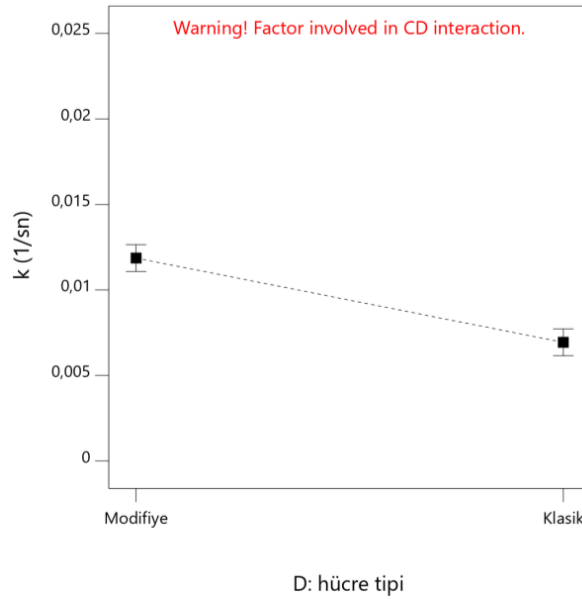
Şekil 4.19. k değeri model tahmin değerleri-deneysel veriler uyum grafiği.



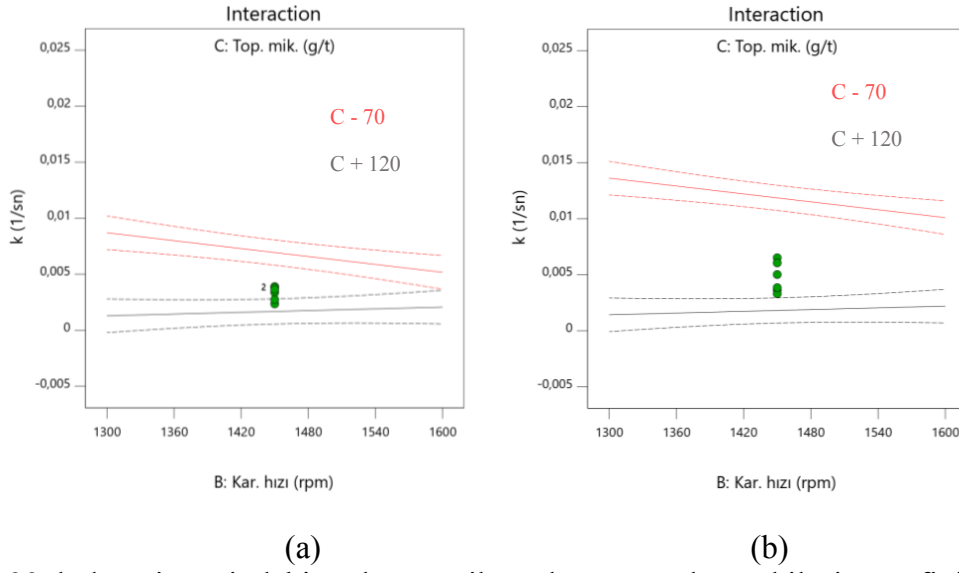
Şekil 4.20. k değeri parametrelerin ana etki grafiği
a) Klasik flotasyon hücresi b) Modifiye flotasyon hücresi

Şekil 4.19 incelendiğinde oluşturulan modelin tahmin değerlerin deneysel verilere uyduğu görülmektedir. Modelin p değerinin 0,0001'den küçük olması ve hem R2 ve hem de PR2 değerlerinin sırası ile 0,8898 ve 0,7858 ile hem 1'e hem de birbirine yakın olması, elde edilen modelin tahmin gücü yüksek kuvvetli bir model olduğunu göstermektedir.

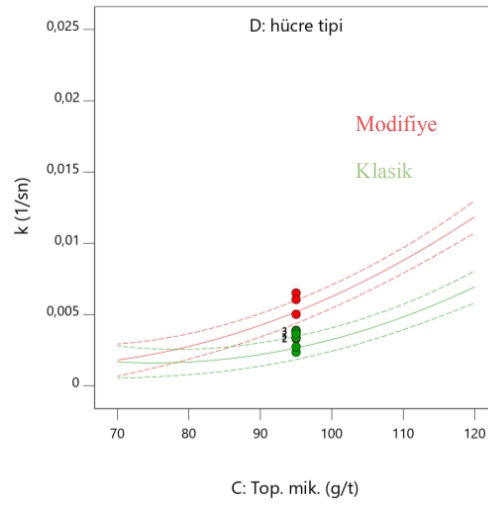
Modelimizdeki parametrelerin flotasyon hızı üzerindeki etkilerini gösteren Şekil 4.20 a ve b incelendiğinde, karıştırma hızı ve katı oranının k'yı çok az miktarda düşürdüğü buna karşın, toplayıcı miktarının k değerini ciddi oranda artırdığı görülmektedir. Hücre bazında bakıldığında etkilerin aynı pateni göstermesine rağmen modifiye hücrede k seviyesinin klasik sisteme göre daha yüksek olması dikkat çekicidir. Bu durum Şekil 4.21'de verilen "hücre tipinin ana etki grafiği"nden de açıkça görülmektedir. Ayrıca bu sonuç ilk aşamada "4.1.2.4 Hücre tipinin etkisi" başlığında yapılan deneysel verilerin klasik incelemesinde Şekil 4.14 ile de tam uyum içerisindeydi.



Şekil 4.21. k değerine hücre tipinin ana etki grafiği



Şekil 4.22. k değeri üzerindeki toplayıcı miktarı-karıştırma hızı etkileşim grafiği a) Klasik flotasyon hücresi b) Modifiye flotasyon hücresi



Şekil 4.23. k değeri üzerindeki hücre tipi-toplayıcı miktarı etkileşim grafiği

Şekil 4.22 a ve b incelendiğinde; her iki hücre tipinde de toplayıcı miktarı düşük seviyede (C: 70 g/t) iken karıştırma hızındaki artışın flotasyon hızını düşürdüğü, toplayıcı miktarı yüksek seviyede (C: 120 g/t) iken karıştırma hızındaki artışın flotasyon hızını az miktarda yükselttiği görülmektedir. Şekil 4.23 incelendiğinde ise, hücre tipine bakmaksızın toplayıcı miktarındaki artışın flotasyon hızını yükselttiği, ancak bu artışın modifiye hücrede daha fazla olduğu görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tüm deneysel sonuçlar incelendiğinde, klasik hücrede yapılan flotasyon deneylerinde, %25 katı oranı, 1300 rpm karıştırma hızı ve 120 g/t toplayıcı miktarı koşullarında %73,74 ile 150 sn sonunda maksimum verim elde edilmiştir. Bu koşullarda R_{∞} değeri %75,47 olmuştur. Toplayıcı miktarı 137 g/t olduğunda da 150 sn sonunda verim çok değişmemiştir (yaklaşık %68,64). Yine bu koşullarda R_{∞} %69'larda kalmıştır. Toplayıcı miktarındaki artışa rağmen verimdeki bu düşüş karıştırma hızı ve toplayıcı miktarı arasındaki etkileşimin verim üzerindeki olumsuz etkisi sebebiyle gerçekleşmiş olduğu düşünülmektedir (Şekil 4.18). Modifiye flotasyon hücre sonuçları aynı koşullar için (katı oranı, 1300 rpm karıştırma hızı ve 120 g/t toplayıcı miktarı) incelendiğinde ise 150 sn sonundaki toplam verim %74,59 ile klasik flotasyon hücre sonuçlarından daha yüksek çıkmıştır. Bu koşullarda R_{∞} değeri %77,79 ile yine klasik flotasyon hücre veriminin üzerindedir. Toplayıcı miktarı 137 g/t olduğunda da 150 sn sonunda verim %87'ye yükselmiştir. Yine bu koşullarda R_{∞} %87,32 olarak gerçekleşmiştir.

Verim üzerindeki etkisi incelenen parametreler yönünden bakıldığında ise, katı oranı ve karıştırma hızının verim üzerindeki etkisi çok düşük iken toplayıcı miktarı ve hücre tipi en büyük etkiye sahip parametrelerdir. Ayrıca, mikro-kabarcık ilave edilen hücrede toplayıcı miktarındaki artış, verimi klasik hücreye göre daha fazla ve hızlı artırmaktadır.

İstatiksel analiz sonucu elde edilen modelin p değerinin 0.05in altında olması (Çizelge 4.2), etkisi incelenen ana parametre "***hücre tipi***"nin p değerinin 0.05 in altında olması (Çizelge 4,2), verimdeki artışın istatiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Özet olarak, sonuçların hem grafiksel ve hem de istatistiksel incelenmesi, mikro-kabarcık ilavesi ile verimin artma eğiliminde olduğunu ispatlamaktadır.

Literatür bu açıdan incelendiğinde ise, kavitasyon ve mekanik sistemin birlikte çalıştığı durumda elde edilen flotasyon veriminin, yalnızca kavitasyon veya yalnızca mekanik yoldan hava kabarcığı elde edilen bir sistemle çalışıldığında elde edilen flotasyon veriminden daha yüksek olduğu belirtilmektedir (Krasowska ve Malysa, 2007; Maoming vd., 2010). Bu veri bu çalışmadan elde edilen sonuçlarla tam bir uyum içerisindedir.

Flotasyon hız sabiti karşılaştırmalarını yaptığımızda, klasik hücrede $12,13 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ olarak hesaplanan en yüksek flotasyon hızına %25 katı oranı, 1300 rpm karıştırma hızı, 120 g/t toplayıcı miktarı koşullarında ulaşılmıştır. Modifiye hücrede ise en yüksek flotasyon hızı $22,14 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ olarak hesaplanmış ve bu değere %30 katı oranı, 1450 rpm karıştırma hızı, 137,045 g/t toplayıcı miktarı koşullarından ulaşılmıştır. Elde edilen deneysel çalışma sonuçlarına göre klasik flotasyon hücresine mikro-kabarcık ilavesi flotasyon hızını artırmaktadır.

İstatiksel analiz sonucu elde edilen modelin p değerinin 0.05 in altında olması (Çizelge 4.3), etkisi incelenen ana parametre “*hücre tipi*”nin p değerinin 0.05’in altında olması (Çizelge 4.3) flotasyon hızındaki bu artışın istatiksel anlamlı olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında ortama kavitasyon yoluyla elde edilen 1 mm’nin altında hava kabarcığı ilave edilmiştir. Klasik ve modifiye hücre flotasyonların her ikisinde de hava hızı sabit tutulmuş, toplam hava hızı 7 l/d olacak şekilde havanın modifiye hücre flotasyonda 4 l/d’sı mekanik, 3 l/d’sı ise kavitasyon tüpünden verilmiştir. Kabarcıkların boyutlarının ölçülmesi (yaklaşık 0,6 mm) net olarak yapılamamıştır. Mikro-kabarcık boyutunun gerekli teçhizatla belirlenmesi ve kavitasyon tüpüne gelen ve mekanik yoldan verilen hava miktarlarındaki değişimin kabarcık boyutuna etkisinin araştırılması, sistemin çok daha net anlaşılmasına fayda sağlayacaktır. Mikro kabarcık üreticinin boyutunun ve hücredeki konumunun etkisinin de toplam verimi etkileme olasılığı vardır.

Diğer taraftan, mikro-kabarcık üreteçlerinin geliştirilmesindeki temel hedef ince tanelerin etkin flotasyonu idi (Calgaroto vd., 2015). Ancak yapılan araştırmalar, dar boyutlu ince veya iri tane boyutları ile karşılaştırıldığında, geniş tane boyutu aralığında mikro-kabarcık üreteçlerinin daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir (Fan ve Tao, 2008). İleriki çalışmalarda, mikro-kabarcık ve mekanik yoldan elde edilen kabarcıkların birlikte kullanıldığı mekanik flotasyonlarda mikro-kabarcıkların etkisi mineral tane boyutu veya boyut dağılımına bağlı olarak da incelenmelidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Agar, G. E., Chia, J., Requis-c, L. 1998. "Flotation rate measurements to optimize an operating circuit". *Minerals Engineering*, 11(4), 347–360.
- Ahmadi, R., Khodadadi, D. A., Abdollahy, M., Fan, M. 2014. "Nano-microbubble flotation of fine and ultrafine chalcopyrite particles". *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(4), 559–566.
- Ahmed, M. M. 2004. "Discrimination of different models in the flotation of Maghara coal". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 113(2), 103–110.
- Albijanac, B., Subasinghe, N., Park, C. H. 2015. "Flotation kinetic models for fixed and variable pulp chemical conditions". *Minerals Engineering*, 78, 66–68.
- Alva, G. 1933. "Ore concentrating machine". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 1910386.
- Amelunxen, R. L. 1993. "The contact cell-A future generation of flotation machines". *Engineering and Mining Journal*, 194(4), 36–37.
- Apling, A. C., Ersayin, S. 1986. "Reproducibility of semi-batch flotation testwork with the Leeds open-top cell and of derived kinetic parameters". *Transactions-Institution of mining and metallurgy. Section C. Mineral processing & extractive metallurgy*, 95(6), 83–88.
- Arbiter, N. 1951. "Flotation rates and flotation efficiency". *TRANSACTIONS OF THE AMERICAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGICAL ENGINEERS*, 190(9), 791–796.
- Bahr, A., Imhoff, R., Lüdke, H. 1985. "Application and sizing of a new pneumatic flotation cell". İçinde *Congrès international de minéralurgie*. 15 (ss. 314–325).
- Banisi, S., Laplante, A. R., Marois, J. 1991. "A study of the behaviour of gold in industrial and laboratory grinding". *CIM Bull*, 72–78.
- Barnaby, S. W. 1897. "On the formation of cavities in water by screw propellers at high speeds". *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 9(4), 678–683.
- Beloglazov, K. F. 1939. "The kinetics of the flotation process". *Tsvetn. Metall*, 9, 70–76.
- Bloom, F., Heindel, T. J. 1997. "Mathematical modelling of the flotation deinking process". *Mathematical and Computer Modelling*, 25(5), 13–58.
- Boutin, P., Tremblay, R. J. 1964. "Method and apparatus for the separation and recovery of ores". *Canadian Patent*, no:, 694547.
- Brake, I. R. 1998. "The development and commissioning of a new Microcell column flotation circuits for BHP Coal's peak Downs coal preparation plant". İçinde *Proceedings of the XIII International Coal Preparation Congress* (ss. 767–776).
- Brennen, C. E. 2014. *"Cavitation and bubble dynamics"*. Cambridge University Press.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Calgaroto, S., Azevedo, A., Rubio, J. 2015. "Flotation of quartz particles assisted by nanobubbles". *International Journal of Mineral Processing*, 137, 64–70.
- Casali, A., Gonzalez, G., Agosto, H., Vallebuona, G. 2002. "Dynamic simulator of a rougher flotation circuit for a copper sulphide ore". *Minerals Engineering*, 15(4), 253–262.
- Cattermole, A. E. 1904. "Classification of the metallic constituents of ores.". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 763259.
- Ciensi, T. 1981. "Column flotation operation at Mines Gaspé molybdenum circuit". *Canadian Mining Journal*, 102, 28–31.
- Clayton, R., Jameson, G. J., Manlapig, E. V. 1991. "The development and application of the Jameson cell". *Minerals Engineering*, 4(7), 925–933.
- Clift, R., Grace, J. R., Weber, M. E. 1978. "Particles". Academic Press, New York.
- Clift, R., Grace, J. R., Weber, M. E., Lynch, A. J., Johnson, N. W., Manlapig, E. V., ... Xu, Z. 2000. "Historical Development".
- Coetzer, G., Du Preez, H. S., Bredenhann, R. 2003. "Influence of water resources and metal ions on galena flotation of Rosh Pinah ore". *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 103(3), 193–207.
- Coleman, R., Dixon, A. 2010. "Tried, tested and proven - 300 m³ flotation cells in operation". XXV International Mineral Processing Congress 2010, IMPC 2010, 5, 3429–3440.
- Cowburn, J., Stone, R., Bourke, S., Hill, B. 2005. "Design developments of the Jameson Cell". *İçinde Centenary of Flotation Symposium, Brisbane* (ss. 193–199).
- Crozier, R. D., Klimpel, R. R. 1989. "Frothers: Plant Practice". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 5(1–4), 257–279.
- Cuttriss, R. H. 1977. "The Flotation Properties of Some Western Australian Nickel Sulphides and Associated Minerals". University of Melbourne.
- Danoucaras, A. N., Vianna, S. M., Nguyen, A. V. 2013. "A modeling approach using back-calculated induction times to predict recoveries in flotation". *International Journal of Mineral Processing*, 124, 102–108.
- Davis, W. J. N. 1969. "Method and apparatus for froth flotation". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 3446353, 1–22.
- Delprat, G. D. 1903. "Extraction of zinc, lead, and silver sulfids from their ores.". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 735071.
- Dickinson, J. E., Galvin, K. P. 2014. "Fluidized bed desliming in fine particle flotation – Part I". *Chemical Engineering Science*, 108, 283–298.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dobby, G. S., Finch, J. A. 1987. "Particle size dependence in flotation derived from a fundamental model of the capture process". *International Journal of Mineral Processing*, 21(3), 241–260.
- Dowling, E. C., Klimpel, R. R., Aplan, F. F. 1985. "Model discrimination in the flotation of a porphyry copper ore". *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2(2), 87–101.
- Elmore, F. E. 1898. "Process Of Separating Metallic From Rocky Constituents Of Ores". British Patent, Patent no, 21948.
- Elmore, F. E. 1906. "Process of separating finely-divided material.". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 826411.
- Everson, C. J. 1886. "Process of Concentrating Ores". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 348157.
- Fahrenwald, A. W. 1922. "Flotation apparatus". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 1417895.
- Fan, M., Tao, D. 2008. "A Study on Picobubble Enhanced Coarse Phosphate Froth Flotation". *Separation Science and Technology*, 43(1), 1–10.
- Feng, D., Aldrich, C. 1999. "Effect of particle size on flotation performance of complex sulphide ores". *Minerals Engineering*, 12(7), 721–731.
- Froment, A. 1902. "Improvements relating to the Concentration of Ores". British Patent, Patent no, 12778.
- Glembotskii, V. A., Klassen, V. I., Plaksin, I. N. 1972. "*Flotation*". Primary Sources.
- Gorain, B. K., Franzidis, J. P., Manlapig, E. V. 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., Oravainen, H., Allenius, H., Peaker, R., Weber, A., Tracyzk, F. 2007. "Mechanical froth flotation cells". *Froth Flotation: a century of innovation*, Editores, FUERSTENAU, MC; JAMESON, G.
- Graichen, K. 1977. "*Messung und Interpretation von Spektren turbulenter Geschwindigkeitsschwankungen am Beispiel einer turbulenten Rührwerkströmung*".
- Grainger-Allen, T. J. N. 1969. "*Bubble generation in froth flotation machines*". Warren Spring Laboratory.
- GULSOY, O. Y., Ersayin, S. 1996. "A new approach to kinetic characterization of semi batch flotation tests". *İçinde Proceedings of the 6th International Mineral Processing Symposium, Kusadasi, Turkey* (ss. 24–26).
- Harbort, G. J., Jackson, B. R., Manlapig, E. V. 1994. "Recent advances in jameson flotation cell technology". *Minerals Engineering*, 7(2), 319–332.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Harris, C. C. 1976. "Flotation machines". Flotation--A. M. Gaudin Memorial, 2, 753–815.
- Harris, C. C., Khandrika, S. M. 1985. "Breakage and attrition in laboratory flotation machines". Powder technology, 45(1), 95–97.
- Haynes, H. I. 1860. "Coupling for shafting". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 28474.
- Hebbard, J. 1913. "Apparatus for ore concentration.". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 1064209.
- Herbst, J. A., Harris, M. 2007. "Modeling and simulation of industrial flotation processes". Froth Flotation: A Century of Innovation (Edited by MC Fuerstenau, GJ Jameson, RH Yoon), Publisher: SME, 757–777.
- Hood, G. D., Jordan, C. E. 1993. "In-line static mixer rapid flotation system for improved flotation kinetics". Mining, Metallurgy & Exploration, 10(4), 182–187.
- Hoover, T. J. 1914. "Concentrating ores by flotation". Mining magazine.
- Huber-Panu, I., Ene-Danalache, E., Cojocariu, D. G. 1976. "Mathematical models of batch and continuous flotation". Flotation--A. M. Gaudin Memorial.
- Imaizumi, T. 1963. "Kinetic consideration of froth flotation". İçinde *Proceedings of the Sixth International Mineral Processing Congress, 1963* (ss. 581–593). Pergamon Press.
- Imhof, R. M., Battersby, M., Parra, F., Sanchez-Pino, S. 2005. "The successful application of pneumatic flotation technology for the removal of silica by reverse flotation at the iron ore pellet plant of Compania Minera Huasco, Chile". İçinde *Centenary of Flotation Symposium* (ss. 5–9).
- Jameson, G J, Nam, S., Young, M. M. 1977. "Physical factors affecting recovery rates in flotation". Miner. Sci. Eng, 9(3), 103–118.
- Jameson, Graeme J. 1990. "Column flotation method and apparatus". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 4938865.
- Jameson, Graeme J. 2010. "New directions in flotation machine design". Minerals Engineering, 23(11), 835–841.
- Jovanovic, I., Miljanovic, I. 2015. "Modelling of flotation processes by classical mathematical methods—a review". Archives of Mining Sciences, 60.
- Jowett, A. 1974. "Resolution Of Flotation Recovery Curves By A Difference Plat Method".
- Kantarci, N., Borak, F., Ulgen, K. O. 2005. "Bubble column reactors". Process Biochemistry, 40(7), 2263–2283.
- Kelsall, D. F. 1961. "Application of probability in the assessment of flotation systems".

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kelsall, D. F., Stewart, P. S. B. 1971. "A critical review of applications of models of grinding and flotation". İçinde *Proceedings of the Symposium on Automatic Control Systems in Mineral Processing Plant, Brisbane, Australia* (ss. 213–232). Citeseer.
- Kennedy, A. 1990. "Jameson flotation cell". *Mining Magazine*, 163(4), 281–285.
- King, R. P. 1976. "Use of Simulation in the Design and Modification of Flotation Plants". Flotation--A. M. Gaudin Memorial.
- Knapp, R. T., Daily, J. W., Hammit, F. G. 1970. "Cavitation McGraw-Hill". New York, 2.
- Krasowska, M., Malysa, K. 2007. "Kinetics of bubble collision and attachment to hydrophobic solids: I. Effect of surface roughness". *International Journal of Mineral Processing*, 81(4), 205–216.
- Kumar, P. S., Pandit, A. B. 1999. "Modeling hydrodynamic cavitation". *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, 22(12), 1017–1027.
- Lawrence, G. A., Prevett, M. J., Smith, E. L. 1984. "Flotation separation apparatus and method". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 4425232.
- Lelinski, D., Asa, W., Foreman, D., Camomile, A., Baker, T., Traczyk, F. 2013. "Development of the largest flotation machine: 600 series SuperCell™ from FLSmidth.". İçinde *Proceedings of 10th International Mineral Processing Conference* (ss. 223–233). Santiago, Chile.
- Leong, T., Ashokkumar, M., Kentish, S. 1989. "Young, FR Cavitation". London: McGraw-Hill.
- Li, S. C. 2000. "Cavitation damage in turbines". *Cavitation of Hydraulic Machinery (ICP, London, 2001)*.
- Lizama, H. M., Carrión, J., Estrella, D. 2008. "Improvements in column flotation through the use of Microcel spargers at Antamina". İçinde *Proceedings of the 40th Annual Canadian Mineral Processors Conference* (ss. 363–375).
- Luttrell, G. H., Westerfield, T. C., Kohmuench, J. N., Mankosa, M. J., Mikkola, K. A., Oswald, G. 2006. "Development of high-efficiency hydraulic separators". *Mining, Metallurgy & Exploration*, 23(1), 33–39.
- Lynch, A J, Johnson, N. W., Manlapig, E. V, Thorne, C. G. 1981. "Mathematical models of flotation". *Mineral and coal flotation circuits: their simulation and control*. Elsevier, Amsterdam, 3, 57–96.
- Lynch, A J, Watt, J. S., Finch, J. A., Harbort, G. E. 2007. "History of flotation technology". *Froth flotation: A century of innovation*, 65–91.
- Lynch, Alban J, Harbort, G. J., Nelson, M. G. 2010. "History of flotation". *Australasian Institute of Mining and Metallurgy*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lynch, Alban J, Johnson, N. W., Manlapig, E., Thorne, C. G. 1981. "*Mineral and coal flotation circuits: Their simulation and control*" (C. 65). Elsevier Amsterdam.
- Lynch, Alban J, Watt, J. S., Finch, J. A., Harbort, G. E. 2007. "History of flotation technology". Froth flotation: A century of innovation, 65–91.
- MacKinnon, S., Yan, D., Dunne, R. 2003. "The interaction of flash flotation with closed circuit grinding". Minerals Engineering, 16(11), 1149–1160.
- Maoming, F., Daniel, T., Honaker, R., Zhenfu, L. U. O. 2010. "Nanobubble generation and its applications in froth flotation (part II): fundamental study and theoretical analysis". Mining Science and Technology (China), 20(2), 159–177.
- Mavros, P. 1992. "Mixing and Hydrodynamics in Flotation Cells BT - Innovations in Flotation Technology". İçinde P. Mavros & K. A. Matis (Ed.) (ss. 211–234). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Mazumdar, M. 1994. "Statistical discrimination of flotation models based on batch flotation data". International journal of mineral processing, 42(1–2), 53–73.
- Mehrotra, S. P., Padmanabhan, N. P. H. 1990. "Analysis of flotation kinetics of Malanjkhanda copper ore, India, in terms of distributed flotation-rate constant". Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section C-Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 99, C32–C42.
- Mika, T. S., Fuerstenau, D. W. 1968. "A microscopic model of the flotation process". İçinde *Proceedings of the VIII International Mineral processing Congress, Leningrad* (C. 2, ss. 246–269).
- Miller, J. D. 1981. "Air-sparged hydrocyclone and method". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 4279743.
- Morris, T. M. 1952. "Measurement and evaluation of the rate of flotation as a function of particle size". Mining Engineering, 4(8), 794–798.
- Murphy, B. 2012. "Less float bank for your buck-Tank-Cell e500". Outotec SEAP eNewsletter, 1–3.
- Nelson, M. G., Lelinski, D., Gronstrand, S. 2009. "Design and operation of mechanical flotation machines". Recent advances in mineral processing plant design, 168–189.
- Nguyen, A. V, Schultze, H. J. 2004. "Colloidal science of flotation".
- Niemi, A. J., Ylinen, R., Hyötyniemi, H. 1997. "On characterization of pulp and froth in cells of flotation plant". International Journal of Mineral Processing, 51(1–4), 51–65.
- Niitti, T., Tarvanien, M. 1982. "Experiences with large Outokumpu flotation machines". İçinde *XIV International Mineral Processing Congress*.
- Outotec. 2014. "The first Outotec® TankCells e500 will be delivered to First Quantum Minerals in Finland.". Outotec Product News.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Parekh, B. K., Tao, D., Groppo, J. G. 1998. "*Poc-scale testing of an advanced fine coal dewatering equipment/technique*". Federal Energy Technology Center (FETC), Morgantown, WV, and Pittsburgh, PA.
- Phillips, D. I., Yoon, R., Lutrell, G. H., Fish, I., Toney, T. A. 1997. "Installation of 4-meter diameter Microcel flotation columns at LadyDunn preparation plant". İçinde *14th International Coal Preparation Congress* (ss. 115–132).
- 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.
- Potter, C. V. 1902. "Process of separating metals from sulfid ores.". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 776145.
- Radoev, B. P., Alexandrova, L. B., Tchaljovska, S. D. 1990. "On the kinetics of froth flotation". *International Journal of Mineral Processing*, 28(1–2), 127–138.
- Ralston, J. 1992. "The influence of particle size and contact angle in flotation". İçinde *Developments in mineral processing* (C. 12, ss. 203–224). Elsevier.
- Ross, D., Kuperman, W. A. 1989. "Mechanics of underwater noise". Acoustical Society of America.
- Saleh, A. M. 2010. "A study on the performance of second order models and two phase models in iron ore flotation". *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 44(1), 215.
- Sbarbaro, D., Maldonado, M., Cipriano, A. 2008. "A two level hierarchical control structure for optimizing a rougher flotation circuit". *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 11018–11022.
- Schubert, H. 2005. "Nanobubbles, hydrophobic effect, heterocoagulation and hydrodynamics in flotation". *International Journal of Mineral Processing*, 78(1), 11–21.
- Schubert, H., Bischofberger, C. 1998. "On the microprocesses air dispersion and particle-bubble attachment in flotation machines as well as consequences for the scale-up of macroprocesses". *International Journal of Mineral Processing*, 52(4), 245–259.
- Schulze, H. J. 1977. "New theoretical and experimental investigations on stability of bubble/particle aggregates in flotation: a theory on the upper particle size of floatability". *International Journal of Mineral Processing*, 4(3), 241–259.
- Schulze, H. J. 1992. "Interface actions in mineral processes-flotation and flocculation". *Aufbereitungstechnik*, 33, 434–443.
- 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.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sorensen, T. C. 1982. "Large Aitair Flotation Machines-Design And Operation". İçinde *Cim Bulletin* (C. 75, s. 83). Canadian Inst Mining Metallurgy Petroleum.
- Sosa-Blanco, C., Hodouin, D., Bazin, C., Lara-Valenzuela, C., Salazar, J. 1999. "Integrated simulation of grinding and flotation application to a lead-silver ore". *Minerals Engineering*, 12(8), 949–967.
- Souza Pinto, T. C., Braga, A. S., Leal Filho, L. S., Deglon, D. A. 2018. "Analysis of key mixing parameters in industrial Wemco mechanical flotation cells". *Minerals Engineering*, 123, 167–172.
- Sripriya, R., Rao, P. V. T., 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.
- Stachurski, J. 1970. "The Mathematical Model for the Ion-Extraction Flotation Process". *Archiwum Górnictwa*, 15, 219–229.
- Stanojlovic, R. D., Sokolovic, J. M. 2014. "A study of the optimal model of the flotation kinetics of copper slag from copper mine Bor". *Archives of Mining Sciences*, 59.
- Subrahmanyam, T. V, Forssberg, K. S. E. 1990. "Fine particles processing: shear-flocculation and carrier flotation — a review". *International Journal of Mineral Processing*, 30(3), 265–286.
- Sutherland, K. L. 1948. "Physical chemistry of flotation. XI. Kinetics of the flotation process". *The Journal of Physical Chemistry*, 52(2), 394–425.
- Tao, D. 2005. "Role of Bubble Size in Flotation of Coarse and Fine Particles—A Review". *Separation Science and Technology*, 39(4), 741–760.
- THORNYCROFT, J. I., Barnaby, S. W. 1895. "Torpedo-Boat Destroyers.(Including Appendix And Plate At Back Of Volume)". İçinde *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers* (C. 122, ss. 51–69). Thomas Telford-ICE Virtual Library.
- Uçurum, M. 2009. "Influences of Jameson flotation operation variables on the kinetics and recovery of unburned carbon". *Powder Technology*, 191(3), 240–246.
- Vanangamudi, M., Kumar, S. S., Rao, T. C. 1989. "Effect of fines content on the froth flotation of coal". *Powder technology*, 58(2), 99–105.
- Williams, J. J. E., Crane, R. I. 1983. "Particle collision rate in turbulent flow". *International Journal of Multiphase Flow*, 9(4), 421–435.
- Wills, B. A. 1988. "froth flotation". İçinde *Mineral Processing Technology* (Hopkins D., ss. 457–595). Oxford.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Woodburn, E. T., King, R. P., Colborn, R. P. 1971. "The effect of particle size distribution on the performance of a phosphate flotation process". *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2(11), 3163–3174.
- Woodward, O H. 1965. "A Review of the Broken Hill Lead-Zinc-Silver Industry". AusIMM, Parkville, VIC.(528 pp.).
- Woodward, Oliver Holmes. 1952. "*A Review of the Broken Hill Lead-Silver-Zinc Industry*". Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Wray, W. E., Littleford, J. W. 1926. "Flotation machine". U.S. Patent and Trademark Office, Patent no, 1585077.
- Wu, C., Nasset, K., Masliyah, J., Xu, Z. 2012. "Generation and characterization of submicron size bubbles". *Advances in colloid and interface science*, 179, 123–132.
- Xu, M, Quinn, P., Stratton-Crawley, R. 1994. "Graphite/chalcopyrite separation using a rapid column cell". *Innovations in Mineral Processing*, 181.
- Xu, Manqiu. 1998. "Modified flotation rate constant and selectivity index". *Minerals Engineering*, 11(3), 271–278.
- Yang, F. J. 1982. "Fused-silica narrow-bore microparticle-packed-column high-performance liquid chromatography". *Journal of Chromatography A*, 236(2), 265–277.
- Yoon, R. H., Luttrell, G. H., Adel, G. T., Mankosa, M. J. 1992. "The application of Microcell™ column flotation to fine coal cleaning". *Coal Preparation*, 10(1–4), 177–188.
- Yuan, X.-M., Palsson, B. I., Forssberg, K. S. E. 1996. "Statistical interpretation of flotation kinetics for a complex sulphide ore". *Minerals Engineering*, 9(4), 429–442.
- Zhang, J., Yang, X., Yang, L., Shen, Z. 2011. "Research on 320 m³ Air-forced Mechanical Flotation Cell through Commercial Test [J]". *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section) S*, 1.
- Zhou, Z. 1999. "Generation of small bubbles by hydrodynamic cavitation". *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section C. Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 108.
- Zhou, Z. A., Chow, R. S. 2006. "Effect of shear on bitumen–bubble attachment in model systems". Final report for CONRAD bitumen production technical group, Alberta Research Council.
- Zhou, Z. A., Chow, R. S., Su, N. 2005. "Spontaneous bubble nucleation on bitumen surfaces". Report for CONRAD Extraction Technology Group, Alberta Research Council.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zhou, Z. A., Xu, Z., Finch, J. A. 1995. "*Fundamental study of cavitation in flotation*". Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, CO (United
- Zhou, Z. A., Xu, Z., Finch, J. A., Hu, H., Rao, S. R. 1997. "Role of hydrodynamic cavitation in fine particle flotation". *International Journal of Mineral Processing*, 51(1-4), 139-149.
- Zuniga, H. G. 1935. "Flotation recovery is an exponential function of its rate". *Boletin de Minero, Sociedad Nacional de Minería, Santiago, Chile*, 47, 83-86.