

**KÖMÜR DIŞI UYGULAMALARDA KABARAN YATAKLI
SINIFLANDIRICILARIN PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**PERFORMANCE OF TEETERED
BED SEPARATORS FOR NON COAL APPLICATIONS**

ÖZGÜR ÖZCAN

Prof. Dr. Ş. LEVENT ERGÜN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

DOKTORA TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2015

ÖZGÜR ÖZCAN'ın hazırladığı “**Kömür Dışı Uygulamalarda Kabaran Yataklı Sınıflandırıcıların Performansının İncelenmesi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

(Prof. Dr., M. Ümit ATALAY)

Danışman

(Prof. Dr., Ş. Levent ERGÜN)

Üye

(Prof. Dr., Özcan Y. GÜLSOY)

Üye

(Doç. Dr., N. Emre ALTUN)

Üye

(Yrd. Doç. Dr., N. Metin CAN)

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

07 / 04 / 2015

imza

ÖZGÜR ÖZCAN

ÖZET

KÖMÜR DIŞI UYGULAMALARDA KABARAN YATAKLI SINIFLANDIRICILARIN PERFORMANSININ İNCELENMESİ

ÖZGÜR ÖZCAN

Doktora, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ş. LEVENT ERGÜN

Nisan 2015, 168 sayfa

Bu çalışmada, yeni nesil hidrolik sınıflandırma ekipmanlarından olan kabaran yataklı sınıflandırıcının/ayırıcının (KYA), tek yoğunluklu ve yapay karışım halindeki cevherler için sınıflandırma ve zenginleştirme davranımlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca literatürde yer alan engelli çökeltme eşitlikleri kullanılarak hesaplanan kesme boyu değerleri deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu amaçla, daha önce bölümümüz imkanları ile tasarlanan laboratuvar ölçekli kabaran yataklı sınıflandırıcı, besleme bunker ve titreşimli besleyiciden oluşan bir deney düzeneği kurulmuştur.

Deney numunesi olarak, kuvars kumu, manyetit konsantresi ve kuvars-manyetit yapay karışımı kullanılmıştır. Kuvars ve manyetit zenginleştirme tesisleri ürünlerinden alınan numuneler malzeme karakterize edildikten sonra kabaran yataklı sınıflandırıcı beslemesi olarak kullanılmışlardır. Hazırlanan yapay karışım ise, kütlece %50 kuvars kumu ile %50 manyetit konsantresinin karıştırılmasıyla elde edilmiştir.

Farklı su hızı ve basınç değerlerinde sınıflandırma ve zenginleştirme deneyleri yapılmıştır. Ekipmanın kararlı durumda çalışması sırasında ekipman ürünlerinden ve beslemesinden eşzamanlı numuneler alınmış ve tane boyu dağılımları, katı içerikleri ve palp yoğunlukları belirlenmiştir. Yapay karışım numunesinden alınan ürünlerin demir tenörleri belirlenmiştir.

Çalışmalar sonucunda, ekipmanın sınıflandırma performansı ve kesme boyunun birincil derecede su hızına, palp yoğunluğunun ise basınç değerine bağlı olduğu belirlenmiştir. Kesme boyunun irileşmesi için yukarı yönlü su hızı ve basınç değerinin artırılması gerekmektedir. Ayrıca kesme boyunun irileşmesi sonucu ekipmanın alt akım miktarının azaldığı, kaçak değerinin düştüğü ve sınıflandırma veriminin yükseldiği gözlenmiştir. Yapay karışımla yapılan deneylerde yüksek su hızı ve basınç değerlerinde ekipman alt akımından yüksek tenörlü demir konsantresi elde edilmiştir.

Engelli çökelme eşitlikleri kullanılarak hesaplanan kesme boyu değerleri ile ekipmanın deneysel çalışmalardan elde edilen düzeltilmiş kesme boyu değerlerinin birbirine çok yakın olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrolik sınıflandırma, kabaran yataklı sınıflandırıcı, yer çekimiyle ayırma, serbest ve engelli çökelme.

ABSTRACT

PERFORMANCE OF TEETERED BED SEPARATORS FOR NON COAL APPLICATIONS

ÖZGÜR ÖZCAN

Doctor of Philosophy, Department of Mining Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ş. LEVENT ERGÜN

April 2015, 168 pages

Aim of this study was to investigate the classification and concentration characteristic of single density and artificial mixture minerals on a teetered bed separator which is one of the new generation hydraulic classification device. In addition, cut size values which calculated with hindered settling equations appear in literature compared with experimental results.

For this purpose, an experimental apparatus set up, that includes a laboratory scale teetered bed separator, a feed bin and a vibratory feeder, was established.

Quartz sand, magnetite concentrate and quartz-magnetite artificial mixture were used as test samples. Samples which were taken from concentration plant product were used as a teetered bed separator feed after material characterization process. The artificial mixture, prepared by mixing 50% of quartz sand and 50% of magnetite concentrate by mass, was also used as teetered bed separator feed.

The classification and concentration tests were carried out in different teeter water flow rates and pressures. During steady state conditions the samples were taken simultaneously from the products and feed of the equipment and the particle size distributions, solid contents and pulp densities were measured. Iron analyses were performed for the artificial mixture products.

As a result of the study; it was observed that classification performance and cut size mainly depends on the teeter water flow rate, but pulp density mainly depends on pressure set point. In order to achieve coarser cut size teeter water flow rate and pressure set point must be increased. In addition it was observed that as the cut size getting coarser, the amount of underflow and bypass decreases and classification efficiency getting increase. High grade iron concentrate was taken from underflow under the high teeter water flow rate and high pressure set point conditions.

Cut size values which calculated with hindered settling equations were very close to experimental cut size results.

Keywords: Hydraulic classification, teetered bed separator, gravity concentration, free and hindered settling

TEŞEKKÜR

Bölüm imkanlarından yararlanmamı sağlayan Maden Mühendisliği Bölüm Başkanı Sn. Prof. Dr. A. Hakan BENZER'e,

Tez çalışmalarım ve öğrencilik hayatım sırasında bilgisi ve tecrübesiyle yol gösterici olan, akademik gelişimim için her türlü imkanı sağlayan ve manevi desteğini her zaman en yakından hissettiğim tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN'e,

Deneyisel çalışmalarda kullandığım ekipmanın tasarımını yapan Sn. Prof. Dr. Özcan Y. GÜLSOY'a,

Gerek deneyisel çalışmalarında göstermiş olduğu yardımlardan, gerekse tez yazım aşamasındaki manevi desteklerinden ve sabırlarından ötürü değerli arkadaşlarım Arş. Gör. N. Alper TOPRAK ve Arş. Gör. Fırat ATALAY'a,

Kimyasal analiz çalışmalarında yardımını ve tecrübesini esirgemeyen Uzm. Yasemin ÖZTÜRK ve Arş. Gör. Ergin GÜLCAN'a,

Tez yazımım süresince desteğini, anlayışını, hoşgörü ve sabrını esirgemeyen Eylem Ayşe ŞANLI'ya,

Hayatımda çok büyük yeri olan annem Emire ÖZCAN'a,

Yardım ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim tüm dostlarıma,

teşekkür ederim.

Bu çalışma Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: FDK-2015-5957.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. TANELERİN AKIŞKAN ORTAM İÇERİSİNDEKİ HAREKETLERİ	3
2.1. Serbest Çökelme	3
2.1.1. Laminer Akış (Stokes bölgesi).....	6
2.1.2. Türbülans Akış (Newton bölgesi).....	6
2.1.3. Transisyonel Akış (Geçiş) Bölgesi.....	8
2.1.3.1. Zigrang and Sylvester Eşitliği.....	9
2.1.3.2. Dietrich Eşitliği	9
2.1.3.3. Jimenes ve Madsen Eşitliği.....	10
2.1.3.4. Concha ve Almedra Eşitliği	11
2.1.3.5. Grace Eşitliği.....	11
2.1.3.6. Budryck Eşitliği	12
2.2. Engelli Çökelme	12
2.2.1. Steinour Eşitliği.....	17
2.2.2. Richardson ve Zaki Eşitliği	17
2.2.3. Lockett ve Al-Habbooby Eşitliği	19
2.2.4. Masliyah Eşitliği.....	20
2.2.5. Swanson Eşitliği	21
2.2.6. Concha ve Almendra Eşitliği	22
2.2.7. Lee Eşitliği	23

2.2.8. Asif Eşitliği	24
2.2.9. Galvin Eşitliği.....	25
2.2.10. Kohmuench Eşitliği	26
2.3. Kabaran Yataklı Sınıflandırıcılarda Kayma Hızı Hesaplaması	27
2.3.1. Ortalama Palp Yoğunluğu ve Yatak Boşluk Oranının Hesaplanması ..	29
2.3.3. Richardson ve Zaki İndeksinin Hesaplanması.....	32
2.3.4. Reynolds Sayısının Hesaplanması.....	32
3. YERÇEKİMİ İLE SINIFLANDIRMA	34
3.1. Hidrolik Sınıflandırma.....	35
3.1.1. Geleneksel Hidrolik Sınıflandırıcılar	38
3.2.2. Yüksek Verimli Yeni Nesil Hidrolik Sınıflandırıcılar.....	43
3.2.2.1. Floatex Sınıflandırıcı	43
3.2.2.2. Reflux Sınıflandırıcı (Geri Akışlı Sınıflandırıcı).....	47
3.2.2.3. Allflux Sınıflandırıcı	50
3.2.2.4. Hydrofloat Sınıflandırıcı	54
3.2.2.5. Manyetik Hidroseparatör.....	57
3.2.2.6. Crossflow Sınıflandırıcı (Çapraz Akışlı Sınıflandırıcı)	59
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI	63
4.1. Malzeme Karakterizasyon Çalışmaları.....	63
4.1.1. Tane Boyu Dağılımı Belirleme Çalışmaları.....	63
4.1.2. Yoğunluk Belirleme Çalışmaları	64
4.1.3. Kimyasal Analiz Çalışmaları	65
4.1.4. Mineralojik Analiz Çalışmaları	66
4.2. Kayma Hızı Hesaplamaları	67
4.2.1 Terminal Çökelme Hızının Hesaplanması	67
4.2.2 Ortalama Palp Yoğunluğunun Hesaplanması	74
4.2.3. Yatak Boşluk Oranının Belirlenmesi	76

4.2.4. Reynolds Sayısının Hesaplanması.....	77
4.2.5. Richardson ve Zaki İndeksinin Hesaplanması.....	79
4.2.6. Kayma Hızı Tahmini	81
4.3. Kabaran Yataklı Sınıflandırıcı ile Yapılan Çalışmalar	86
4.3.1. Kuvars Kumu ile Yapılan Çalışmalar	86
4.3.2. Manyetit Konsantresi ile yapılan Çalışmalar.....	91
4.3.3. Yapay Karışım Numenesi ile Yapılan Çalışmalar	95
4.3. Madde Denklığı ve Performans Değerlendirme Çalışmaları	103
5. MODELLEME VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	114
5.1. Kuvars Kumu Modelleme Çalışmaları.....	114
5.2. Manyetit Konsantresi Modelleme Çalışmaları	119
6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	125
7. YORUM VE ÖNERİLER.....	142
KAYNAKÇA.....	143
EK	152
ÖZGEÇMİŞ	156

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Fe	:	Demir
V	:	Hacim
W^*	:	Şekil Faktörü
D^*	:	Açı Faktörü
d^*	:	Tane Boyu Faktörü
U_{ts}^*	:	Terminal Çökelme Hızı Faktörü
Ar	:	Archimedes Sayısı
Re	:	Reynolds Sayısı
U_t	:	Terminal Çökelme Hızı
V_t	:	Engelli Çökelme Hızı
V_{slip}	:	Kayma Hızı
ρ_{susp}	:	Palp yoğunluğu

Kısaltmalar

KYA	:	Kabaran Yataklı Sınıflandırıcı/Ayırıcı
kPa	:	Kilo Pascal
CSF	:	Corey Şekil Faktörü

1. GİRİŞ

Cevher hazırlamada hidrolik sınıflandırıcılar, taneleri boyut dağılımına göre sınıflandırma ve tane boyu dağılımının uygun olması durumunda ise mineraller arasındaki yoğunluk farkına göre zenginleştirme amacıyla tarihsel süreç boyunca kullanılmıştır. Yıllar içerisinde tanelerin sıvı ortam içerisindeki çökme hızlarındaki farktan yararlanılarak birçok sınıflandırma ekipmanı geliştirilmesine rağmen, günümüzde kabaran yataklı sınıflandırıcılar (hindered bed classifier) hidrolik sınıflandırıcılar içerisinde daha yoğun şekilde kullanılmaktadır.

Günümüzde kabaran yataklı sınıflandırıcılar özellikle kömür yıkama işlemlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak literatürde yapılan çalışmalar, kromit tesisi atıklarından kromit kazanımı, kuvars kumu sınıflandırma, ince boydaki demir cevherlerinden alümina ve silis uzaklaştırılması, fosfat cevherinin sınıflandırılması şlam atılması ve zenginleştirilmesi, demir cevherlerinin zenginleştirilmesi, kromit cevherlerinin zenginleştirilmesi, ince boydaki manganez cevherlerinin zenginleştirilmesi gibi örneklerle kabaran yataklı sınıflandırıcıların özellikle tane boyuna göre sınıflandırma ve cevher zenginleştirme işlemlerinde de kullanılabileceğini göstermektedir [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17].

Ancak literatür çalışmalarında genel olarak tanelerin engelli çökme koşulları altındaki davranışları incelenmiş ve oluşturulan ampirik eşitlikler yardımıyla kabaran yataklı sınıflandırıcı performansı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Literatürdeki eşitlikler tanelerin yukarı yönlü su hızına bağlı olarak çökme hızı şeklinde tanımlanan kayma hızı kavramı üzerinde durmaktadır. Bu kavram literatürdeki çoğu eşitlikte işletim parametreleri ile ilişkilendirilememiştir. Bu nedenle ampirik eşitliklerle belirlenen kayma hızı tek başına kabaran yataklı sınıflandırıcı performansını belirlemede yetersiz kalmaktadır. Ekipmanın gerçek çalışma koşulları altındaki sınıflandırma ve zenginleştirme işlemlerinde verimli şekilde kullanılabilmesi için gerekli olan operasyonel parametreler ve ekipman performansı arasındaki ilişkiler günümüzde hala net olarak bilinmemektedir. Bu çalışmada homojen malzemeler ve yapay karışımlar kullanılarak ekipmanın sınıflandırma ve zenginleştirme işlemlerindeki davranışını incelenmiştir. Kabaran yataklı sınıflandırıcıda farklı işletme parametreleri altında deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin literatürdeki verilerle ilişkisinin görülebilmesi amacıyla ise

engelli çökelme eşitliklerinden faydalanılmış ve ekipmanın kesme boyu değerleri önceden tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Tez çalışmasının ilk aşamasında, kabaran yataklı sınıflandırıcının sınıflandırma performansının belirlenebilmesi amacıyla sabit yoğunluklu kuvars ve manyetit konsantreleri kullanılarak üç farklı su hızı ve üç farklı basınç set değerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında besleme hızı ve beslemenin % katı içeriği sabit tutularak, işletim değişkenleri olan yatak basıncı ve su hızı değiştirilerek her bir değişikliğin ardından ekipmanın tekrar kararlı duruma gelmesiyle birlikte besleme, alt akım ve üst akım numuneleri toplanmıştır. Toplanan numunelerin palp yoğunlukları, % katı içerikleri ve tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Belirlenen tane boyu dağılımları ve ölçülen besleme hızları kullanılarak madde denkliği oluşturulmuş ve ekipmanın her koşul için performans eğrisi çizilmiştir.

Çizilen performans eğrilerinden elde edilen veriler doğrultusunda farklı koşullar ve farklı malzemeler kullanılarak yapılan deneylerde, her bir koşul için alt akıma giden malzeme yüzdesi, alt akıma olan kaçak yüzdesi, ekipmanın gerçek ve düzeltilmiş kesme boyu, ayırımın keskinliği ve verimsizliği belirlenmiştir.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında kuvars-manyetit yapay karışımı ile sınıflandırma/zenginleştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen numunelere de benzer işlemler uygulanmış, ek olarak ise her bir koşulda alınan alt ve üst akım numunelerinin demir analizleri yapılarak tenör ve verim değerleri elde edilmiştir.

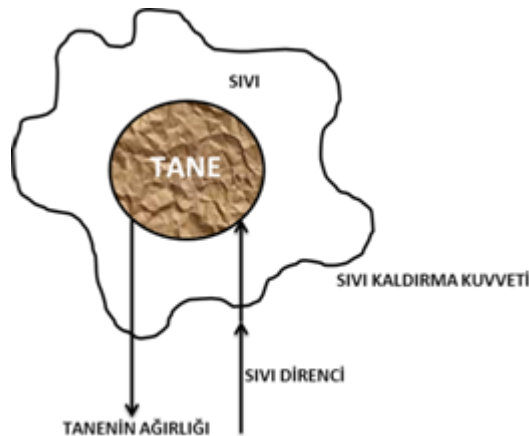
2. TANELERİN AKIŞKAN ORTAM İÇERİSİNDEKİ HAREKETLERİ

Kabaran yataklı sınıflandırıcılardaki sınıflandırma genellikle bir tanenin hareketinin bir diğer tane tarafından engellendiği yoğun bir palp içerisinde gerçekleşmektedir. Engelli çökme koşullarının hakim olduğu bu ortamda farklı tane boyu ve yoğunluktaki taneler ve akışkan ortam arasındaki bağıl hareketlerin sonucunda ayırım meydana gelmektedir. Kabaran yataklı sınıflandırıcılardaki ayırım tanelerin ortam içerisindeki çökme hızlarına bağlı olduğundan farklı tane boyu ve yoğunluktaki tanelerin çökme hızlarının hesaplanması gerekmektedir. Serbest çökme koşullarının hakim olduğu durumlarda bu hızlar tanelerin boyut aralığına ve Reynolds sayısına bağlı olarak Stokes, Newton ve geçiş yasaları ile kolayca hesaplanmaktadır. Ancak engelli çökme koşullarının hakim olduğu durumlarda ise taneler ve akışkan ortam arasındaki ilişki karmaşık bir hal almakta ve basit bir matematiksel çözümü engellemektedir.

2.1. Serbest Çökme

Akışkan ortam içerisinde bulunan tanelerin düşük katı oranlarında çökmeye maruz kaldığı, birbirleri ve çökeldikleri ortamın duvarları ile çarpışma olasılıklarının bulunmadığı çökme tipine serbest çökme adı verilmektedir. Homojen bir palp içerisinde %15 katı değerine kadar serbest çökme koşulları geçerlidir [18].

Şekil 2.1’de serbest çökme koşullarında çökmeye maruz kalan küresel bir tane üzerine etkiyen kuvvetler verilmektedir.



Şekil 2.1 Serbest çökme koşullarında tane üzerine etkiyen kuvvetler [18]

Şekil 2.1’de tane üzerine etkiyen kuvvetler sırasıyla Eşitlik 2.1, Eşitlik 2.2 ve Eşitlik 2.3’te verilmektedir.

$$\text{Aşağı yönlü yerçekimi kuvveti} : \rho_s g V = \rho_s g \frac{\pi}{6} d^3 \quad (2.1)$$

$$\text{Yukarı yönlü kaldırma kuvveti} : \rho_f g V = \rho_f g \frac{\pi}{6} d^3 \quad (2.2)$$

$$\text{Yukarı yönlü sürtünme kuvveti} : C_d \frac{\pi}{4} d^2 \rho_f \frac{\mu^2}{2} \quad (2.3)$$

şeklinde sıralanmaktadır.

Sıvı bir ortam içerisinde serbest çökelen tane yukarıda belirtilen üç dış kuvvetin etkisi altındadır. Çökme süresinin ilerlemesi sonucu tane üzerine etkiyen aşağı ve yukarı yönlü kuvvetlerin eşitlenmesi sonucunda ise tane azami sabit hızına ulaşmaktadır. Bu hıza “terminal çökme hızı” adı verilmektedir. Küresel bir tane için hesaplanan terminal çökme hızı Eşitlik 2.4’te verilmektedir

$$U_t = \left(\frac{4(\rho_s - \rho_f)dg}{3\rho_f C_D} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

Burada,

- U_t : Terminal çökme hızı,
- ρ_s : Tanenin yoğunluğu,
- ρ_f : Sıvının yoğunluğu,
- d : Tanenin çapı,
- g : Yerçekimi ivmesi,
- C_D : Sürtünme katsayısı,
- μ : Sıvı viskozitesi,

olarak verilmektedir [18].

Terminal çökme hızını etkileyen faktörler:

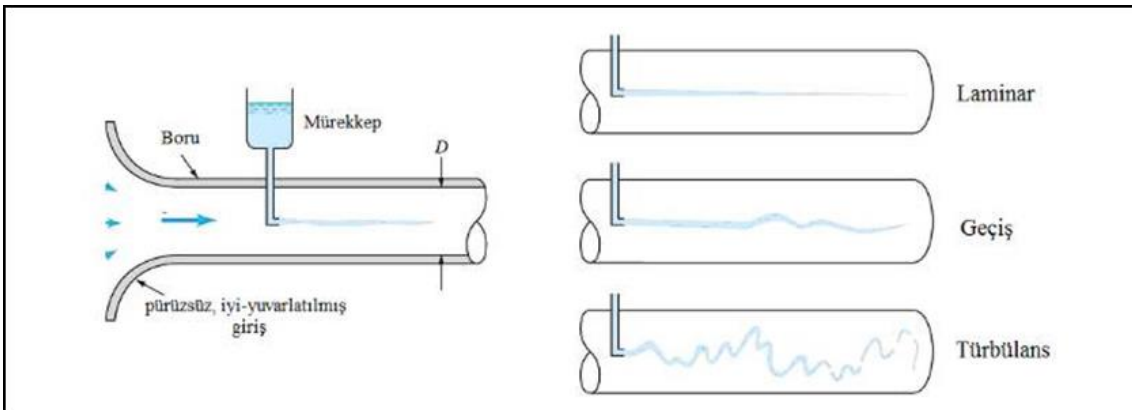
- Sıcaklık,
- Sıvı yoğunluğu,
- Tane yoğunluğu,
- Tane boyu,
- Tane şekli,

- Türbülans derecesi,
- Tanelerin hacimsel oranı,
- Tanelerin yüzey yükü ve palp kimyası,
- Manyetik ve elektrik alan Őiddetleri,
- Sıvının düŐey hızı,

Şeklinde sıralanabilmektedir.

Suyun viskozitesi sıcaklık ile değişmektedir. 10°C sıcaklık referans alındığında, sıcaklığın 0°C olması viskoziteyi %27 artırırken, sıcaklığın 20°C olması ise viskoziteyi %30 azaltmaktadır. Viskozite aynı zamanda Reynolds sayısını da etkilediğinden laminar akış koşullarındaki terminal çökelme hızıda viskoziteden etkilenmektedir. Türbülanslı akış koşullarında ise sürtünme kuvveti önemsiz olduğundan bu akış koşullarında terminal çökelme hızları viskoziteden etkilenmemektedir [19].

Osborne Reynolds (1842 - 1912) yaptığı deneysel çalışmalarda, akıŐın farklı biçimlerde aktığını gözlemlemiŐtir. Deneylerinde boru içi akışa, Şekil 2.2'deki gibi mürekkep enjekte etmiştir. Enjekte ettiği mürekkebin düşük akış hızlarında düzenli bir yol izleyerek akışa karıŐmaması ile oluşturduğu akış biçimine laminar akış, akış hızının belli bir kritik değeri geçmesiyle mürekkebin düzenli bir yol izlememesi ve boru kesitindeki tüm akışa karıŐmasıyla oluşturduğu akış biçimine ise türbülanslı akış adını vermiŐtir. Laminar ve türbülans akıŐlar arasında gidip-gelen akış türüne de transisyonel (geçiş) akışı adını vermiŐtir.



Şekil 2.2 Osbone Reynolds (1842-1912)'ın yaptığı deneysel boru akıŐında oluşan akış durumları [18]

2.1.1. Laminer Akış (Stokes bölgesi)

Bu tür akışlardaki katı hareketleri ilk kez Stokes tarafından incelendiğinden Stokes bölgesi de denilmektedir. Bu akış koşulunda sıvının viskozitesi belirleyicidir. Bu bölgedeki dirence Stokes direnci veya viskoz direnç adı verilmektedir.

Reynold sayısının 1'den küçük olduğu laminer akış koşullarında çapı 50 µm'den küçük taneler için Stokes yasası geçerlidir. Stokes yasası ile çökme hızı hesaplanabilecek en iri tane boyu Reynolds sayısı ile belirlenmektedir. Çökme hızının %5 hata ile hesaplanabilmesi için Reynolds sayısının 0.2'yi geçmemesi gerekmektedir [20]. Laminer akış bölgesindeki terminal çökme hızı ve sürtünme katsayısı sırasıyla Eşitlik 2.5 ve Eşitlik 2.6 ile hesaplanmaktadır.

$$U_t = \frac{gd^2(\rho_s - \rho_f)}{18\mu} \quad (2.5)$$

$$C_D = 24/Re \quad (2.6)$$

Stokes bölgesinin (Laminer akış) genel özellikleri

- Geçerli tane boyutu ortalama 0.05 mm'nin altındadır.
- Viskoz direnç yüksektir,
- Basınç direnci yoktur,
- Tanelerin hareket hızı düşüktür.

şeklinde sıralanmaktadır.

2.1.2. Türbülans Akış (Newton bölgesi)

Küresel tanelerin bu akış bölgesindeki hareketleri ilk kez Newton tarafından incelendiği için, Newton bölgesi de denilmektedir.

Newton yasası Reynolds sayısının 1000'den büyük olduğu durumlarda çapı 2 cm'den iri taneler için kullanılmaktadır. Bu koşullarda sürtünme katsayısı genellikle sabit olup 0.44 değerini almaktadır. Türbülans akış bölgesindeki terminal çökme hızı Eşitlik 2.7 ile hesaplanmaktadır.

$$U_t = \left(\frac{3.33 (\rho_s - \rho_f) dg}{\rho_f} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

Newton bölgesinin (Türbülans akış) genel özellikleri,

- Newton bölgesi için geçerli tane boyutu 2 mm'nin üstündedir,
- Basınç direnci yüksektir,
- Viskoz direnç ihmal edilecek kadar küçüktür.
- Tanelerin hareket hızı ise yüksektir.

şeklinde sıralanmaktadır.

Laminerden türbülans akışa geçiş nedenleri; geometri, yüzey pürüzlülüğü, akış hızı, akışkan türü, yüzey sıcaklığı ve pek çok nedene bağlı kalmaktadır. Osborne Reynolds 'ın yaptığı deneyler sonucunda akış türlerini belirlemede kullanılan “Reynolds” boyutsuz sayısı ortaya çıkmıştır. Reynolds sayısı (Re) akışkandaki atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlere bir oranı olarak tanımlanmaktadır. Reynolds sayısı Eşitlik 2.8 ile ifade edilmektedir.

$$Re = \frac{U_t d \rho_f}{\mu} \quad (2.8)$$

Reynold sayısına göre akış türleri ise Çizelge 2.1’de verilmektedir.

Çizelge 2.1 Reynold sayısına göre akış türleri

Laminer akış bölgesi	$Re < 1$
Transisyonel akış bölgesi	$1 < Re < 1000$
Türbülans akış bölgesi	$1000 < Re < 2.5 \cdot 10^5$
Süperkritik akış bölgesi	$Re > 2.5 \cdot 10^5$

Yoğunlukları ρ_a ve ρ_b , çapları ise d_a ve d_b olan ve yoğunluğu ρ_f olan sıvıda aynı çökme hızında hareket eden iki tane ele alındığında, bu tanelerin terminal çökme hızları da aynı olacaktır. Stokes yasasına göre,

$$d_a^2(\rho_a - \rho_f) = d_b^2(\rho_b - \rho_f)$$

ya da

$$\frac{d_a}{d_b} = \left(\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f} \right)^{1/2}$$

olmaktadır. Bu eşitlik serbest çökme oranı olarak adlandırılmaktadır. Serbest çökme oranı eşit hızda çökmesi istenen iki tanenin gerekli tane boyu oranını vermektedir. Serbest çökme oranı benzer şekilde Newton yasasına göre hesaplandığında,

$$\frac{d_a}{d_b} = \frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f}$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Serbest çökme oranı Newton yasasının geçerli olduğu iri tane boylarında Stokes yasasının geçerli olduğu ince tane boylarına göre daha yüksek bir değer almaktadır. Sonuç olarak, taneler arasındaki yoğunluk farkı iri tanelerin ayırımında daha etkili bir parametredir ve özellikle yerçekimi ile zenginleştirme yapıldığı durumlarda bu fark önem arz etmektedir. Aralarında yoğunluk farkı bulunan iki cevherin verimli şekilde ayrılabilmesi için cevherin aşırı öğünmesinin önüne geçilmeli ve yoğunluk farkına göre ayırımın gerçekleşmesini sağlamak amacıyla sınıflandırıcıya mümkün olduğunca iri besleme yapılmalıdır. Serbest çökme oranının genelleştirilmiş hali Eşitlik 2.9'da verilmektedir.

$$\frac{d_a}{d_b} = \left(\frac{D_b - D_f}{D_a - D_f} \right)^n \quad (2.9)$$

Burada n Stokes yasasına tabi ince taneler için 0.5 değerini alırken, Newton yasasına tabi iri taneler için 1 değerini almaktadır. 50 µm ile 2 cm aralığındaki tane boyu dağılımı içinse n değeri 0.5-1 arasında değişmektedir.

2.1.3. Transisyonel Akış (Geçiş) Bölgesi

Stokes ve Newton bölgeleri dışında kalan 0.05-2 mm arasındaki tanelerin çökmesinde geçerli olan akış bölgesidir. Bu bölgedeki sürtünme katsayısı Reynolds sayısının bir fonksiyonu olarak değişmektedir.

Reynolds sayısının 1 ve 1000 arasında olduğu ve her iki eşitliğinde kullanılamadığı geçiş durumlarında genellikle deneme yanılma yöntemi kullanılmaktadır. Bu koşullar için yararlı olan ve literatürde kabul görmüş bazı eşitlikler ise Zigrang ve Sylvester, Dietrich, Jimenes ve Madsen, Concha ve Almedra, Grace ve özellikle kuvars kumu taneleri için geçerli olan Budryck eşitliğidir [21].

2.1.3.1. Zigrang and Sylvester Eşitliği

Farklı boyut ve yoğunluğa sahip tanelerin terminal çökme hızlarını hesaplamak için 1981 yılında Zigrang ve Sylvester tarafından geliştirilmiştir. Tanelere ait Reynold sayısı ise Eşitlik 2.10 ile hesaplanmaktadır [26].

$$Re_t = \left[\left(14.51 + (g(\rho_i - \rho)\rho)^{0.5} 1.83d_p^{1.5} / \mu \right)^{0.5} - 3.81 \right]^2 \quad (2.10)$$

Reynold sayısı kullanılarak hesaplanan engelli çökme hızı ise Eşitlik 2.11'de verilmektedir.

$$U_t = \frac{Re\mu}{d_p\rho} \quad (2.11)$$

2.1.3.2. Dietrich Eşitliği

Dietrich (1982), W, D, şekil ve açı faktörleri gibi boyutsuz parametreler kullanarak 252 verilik data setinden oluşan bir korelasyon türetmiştir. Dietrich eşitliğine ait boyutsuz parametreler sırasıyla Eşitlik 2.12 ve Eşitlik 2.13'te verilmektedir.

$$W^* = \frac{V_t^3 \rho_f^2}{(\rho_s - \rho_f)g\mu} \quad (2.12)$$

$$D^* = \frac{(\rho_s - \rho_f)gd_N^3\rho_f}{\mu^2} \quad (2.13)$$

Burada,

d_N : en geniş öngörülen alanın nominal çapıdır

Dietrich yaptığı çalışmalar sonucunda boyutsuz parametrelerini Eşitlik 2.14 ile ilişkilendirmiştir.

$$W^* = R_3 10^{R_1 + R_2} \quad (2.14)$$

Burada,

R_1 : Tane yoğunluğunun etkisini açıklayan bir katsayı,

R_2 : Tane şeklinin etkisini açıklayan bir katsayı,

$$R_1 = -3.76715 + 1.92944(\log D^*) - 0.09815(\log D^*)^2 - 0.00575(\log D^*)^3 + 0.00056(\log D^*)^4$$

$$R_2 = \log \left(1 - \frac{1 - CSF}{0.85} \right)$$

$$R_3 = \left(0.65 - \left(\frac{CSF}{2.83} \tanh(\log D^* - 4.6) \right) \right)^{\left(1 + \frac{(3.5-P)}{2.5} \right)}$$

$$CSF = \frac{d_{min}}{\sqrt{d_{max} d_{mid}}}$$

şeklinde verilmektedir. Katsayılar da yer alan d_{min} , d_{max} , d_{mid} parametreleri sırasıyla minimum, maksimum ve orta boyutlu tanelerin çapını, P ise dairesellik faktörünü ifade etmektedir. Dairesellik faktörü mükemmel dairesel taneler için 6, köşeli taneler içinse 2-3 arasında değişmektedir.

2.1.3.3. Jimenes ve Madsen Eşitliği

Jimenes ve Madsen (2003), Dietrich'in yaklaşımını boyutsuz parametreleri açıklayarak sadeleştirmişlerdir. Jimenes ve Madsen'e ait eşitlikler sırasıyla Eşitlik 2.15 ve Eşitlik 2.16'da verilmektedir.

$$V^* = \frac{V_t}{\frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} gd} \quad (2.15)$$

$$S^* = \frac{d\rho_f}{4\mu} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} gd} \quad (2.16)$$

$(1/V^*)$ ve $(1/S)$ arasındaki doğrusal regresyon ise Eşitlik 2.17'de vermektedir.

$$\frac{1}{V^*} = A + \frac{B}{S^*} \quad (2.17)$$

A ve B katsayıları ise direnç katsayısı için bir çözüm sağlamaktadır (Eşitlik 2.18).

$$C_D = \frac{1}{3} \left(A + \sqrt{A^2 + \frac{16B}{Re}} \right)^2 \quad (2.18)$$

Jimenez ve Madsen A ve B katsayılarını Dietrich'in kuvars kumu ile yaptığı çalışmadan elde etmişlerdir. Bu değerler -1 mm için $0.2 < Re < 127$ koşulunda ~ 0.06 'dır. Reynold sayısının 0.2'den küçük olduğu durumlarda C_D değeri $24.5/Re$ değerini alarak Stokes yasasındaki değer ile uyuşmaktadır. Reynolds sayısının 1000'den büyük olduğu durumlarda ise C_D değeri 0.83 olarak kabul edilmektedir. Bu

değer Newton yasasında ise 0.44'tür. Farklı şekildeki taneler için Jimenez ve Madsen tarafından verilen A ve B değerleri Çizelge 2.2'de verilmektedir.

Çizelge 2.2 Jimenez ve Madsen tarafından verilen A ve B değerleri (CSF 0.7)

Parametre (P)	A	B
2.0 (kırılmış)	0.995	5.211
3.5 (doğal)	0.954	5.121
6.0 (iyi yuvarlanmış)	0.890	4.974
Küre	0.794	4.606

2.1.3.4. Concha ve Almedra Eşitliği

Concha ve Almendra ise sınır-tabaka teorisi kullanarak tek bir küresel tane için serbest çökme hızını belirlemişlerdir. Sınır tabakasını ise katının yüzeyi çevresindeki viskoz akış bölgesi olarak tanımlamışlardır. Bu eşitlik dar tane boyu ve yoğunluk değerlerinde iyi sonuçlar verirken daha geniş dağılımlarda kısıtlamaları olduğu görülmüştür [22]. Concha ve Almedra tarafından oluşturulan engeli çökme eşitlikleri ise küresel taneler için en kapsamlı olanıdır [22]. Bu eşitlik tüm akış koşullarında ve tüm Reynolds sayılarında uygulanabilmektedir.

Concha ve Almedra eşitliği Eşitlik 2.19'da verilmektedir.

$$U_{\infty} = \frac{20.52\mu}{d\rho_f} \left\{ \left[1 + 0.0921 \left(\frac{d^3(\rho_s - \rho_f)\rho_f g}{0.75\mu^2} \right)^{1/2} \right]^{1/2} - 1 \right\}^2 \quad (2.19)$$

2.1.3.5. Grace Eşitliği

Grace metodu iki farklı boyutsuz parametre içermektedir. Bu parametrelerden birincisi tane boyutu, ikincisi ise terminal çökme hızı ile ilişkilendirilmiştir. Bu eşitlikler sırasıyla Eşitlik 2.20 ve Eşitlik 2.21'de verilmektedir.

$$d^* = d^3 \sqrt{\frac{q_f(\rho_s - \rho_f)g}{\mu^2}} \quad (2.20)$$

$$U_{ts}^* = U_{ts}^3 \sqrt{\frac{\rho_f^2}{\mu(\rho_s - \rho_f)g}} \quad (2.21)$$

d^* ve U_{ts}^* arasındaki korelasyon ise Çizelge 2.3'te verilmektedir. Bu eşitlikler sayesinde terminal çökme hızı herhangi bir iterasyon kullanmadan tane boyuna bağlı şekilde hesaplanmaktadır [23].

Çizelge 2.3 d^* ve U_{ts}^* arasındaki korelasyon

Aralık (μm)	Korelasyon
$d^* \leq 3.8$	$U_{ts}^* = (d^*)^2 / 18 - 3.123 \times 10^{-4} (d^*)^5 + 1.6415 \times 10^{-6} (d^*)^8$
$3.8 < d^* \leq 7.58$	$\log U_{ts}^* = -1.5446 + 2.9162 (\log d^*) - 1.0432 (\log d^*)^2$
$7.58 < d^* \leq 227$	$\log U_{ts}^* = -1.64758 + 2.94786 (\log d^*) - 1.0907 (\log d^*)^2 + 0.17129 (\log d^*)^3$
$227 < d^* \leq 3500$	$\log U_{ts}^* = 5.1837 - 4.51034 (\log d^*) + 1.687 (\log d^*)^2 - 0.189135 (\log d^*)^3$

2.1.3.6. Budryck Eşitliği

Stokes, Budryck ve Rittinger sürüklenme katsayısını (C_D) kullanarak kuvars kumu ve çakıl tanelerinin laminar, türbülans ve transisyonel akış koşullarındaki terminal çökme hızlarını hesaplamışlardır. $d > 0.1$ mm ve $d < 1$ mm boyut aralığında geçerli olan Budryck eşitliği Eşitlik 2.22'de verilmektedir.

$$V_t = \frac{8.925}{d} \left[\sqrt{1 + 95 \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} d^3} - 1 \right] \quad (2.22)$$

Eşitlikte kum ve çakıl taneleri için sabit bir şekil faktörü kullanılmıştır. Şekil faktörü eşitliğe sürtünme katsayısının şekil katsayısına bölünmesi yoluyla dahil edilmiştir. Kum ve çakıl taneleri için kullanılan şekil faktörü 0.7'dir.

2.2. Engelli Çökme

Stokes ve Newton yasaları tanelerin çok düşük katı derişimlerinde serbest çökmeye maruz kaldığı durumlarda geçerlidir. Ancak katı derişimlerinin arttığı durumlarda palp içerisindeki taneler çökerken içerisinde bulundukları sütun duvarlarından ve komşu tanelerden etkilenmeye başlamaktadır. Bir palpın içerisindeki katı oranı arttıkça, tanelerin engelleme özelliği daha belirgin hale gelmekte ve çökme hızı düşmeye başlamaktadır. Sistem, yoğunluğu palpın yoğunluğuna eşit olan bir ağır sıvı gibi davranmaya başlamakta ve böylelikle engelli çökme koşulları sağlanmış olmaktadır [9].

Palpın yüksek yoğunluğu ve viskozitesinden dolayı, düşüş halindeki taneler düşme sırasında dirençle karşılaşır. Birbirine yakın iki tane çökme durumundayken, daha büyük bir tanenin yarattığı türbülans etkilenen ufak tane kendi çökme

hareketine karşı bir dirençle karşılaşmış olur. Böylelikle, serbest çökelmeden engelli çökelmeye geçiş başlar. Littler'e göre (1986), engelli çökeltme en az %20 katı içeriğinde başlamaktadır [9].

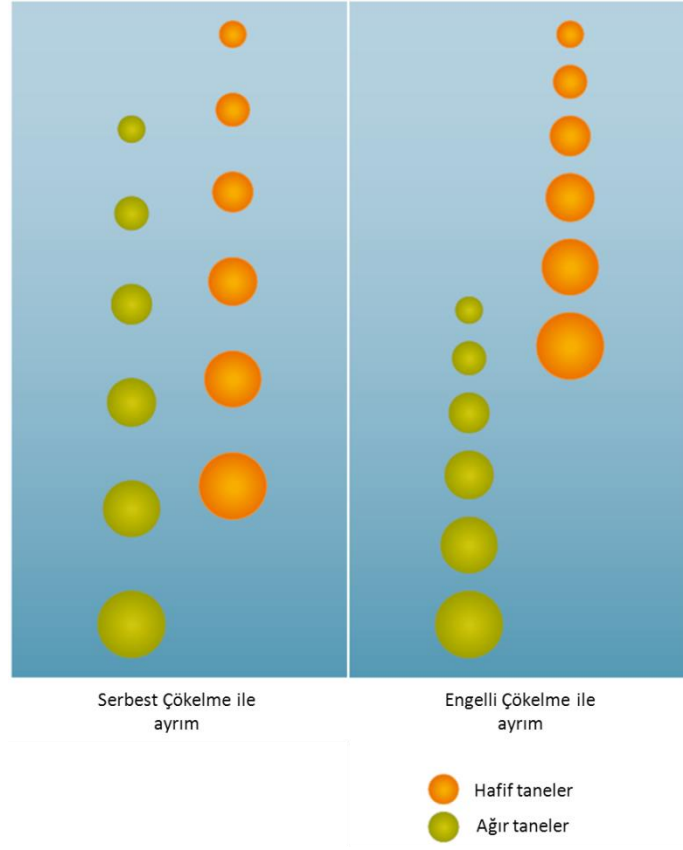
Serbest çökelmeden engelli çökelmeye geçiş, palpın içindeki katı oranının artmasıyla orantılıdır. Katı oranındaki artış, palp içerisinde bulunan taneler arasındaki mesafenin azalmasına ve dolayısıyla çökelen taneler arasında sürükleyici bir kuvvetin doğmasına yol açar. Ancak, palp içindeki katı miktarının çok fazla olması, taneler arasında sıkışmalar başlamasına, ince tanelerin iri taneler ile beraber çökmesine de sebep olur. Bu da tane boyu ve yoğunluktan bağımsız olarak kitle halinde çökmenin meydana gelmesi dolayısıyla ayırım veriminin azalması anlamına gelmektedir.

Engelli çökeltme koşullarında iri tanelerin çökeltme hızlarındaki düşüş ince taneleri alt akıma sürüklemelerini önemli ölçüde engellemektedir. Ancak serbest çökeltme koşullarında iri taneler çok hızlı şekilde çökmekte ve ince tanelerinde alt akıma sürüklenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle engelli çökeltme ince tanelerin alt akıma gelme oranını düşürdüğü için serbest çökelmeye oranla daha verimli bir ayırım gerçekleşmesine imkan vermektedir [24].

Engelli çökeltme oranı ve serbest çökeltme oranı aynı şekilde hesaplanmaktadır (Eşitlik 2.23). Bu eşitlikte sıvı yoğunluğunun yerini palp yoğunluğu almaktadır

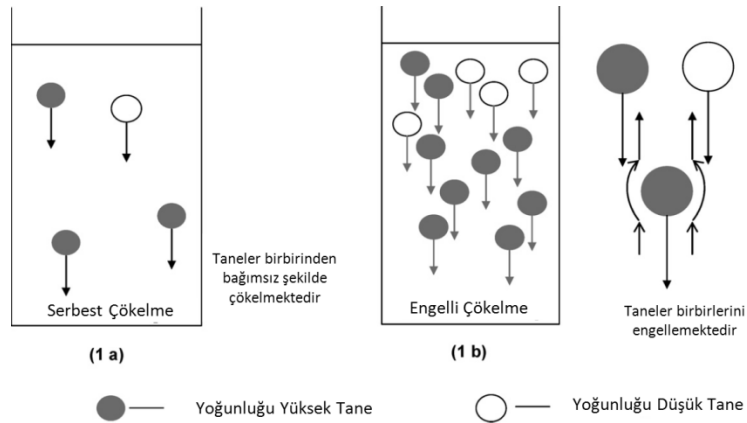
$$\frac{d_a}{d_b} = \left(\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f} \right)^n \quad (2.23)$$

Aynı malzemeler için hesaplanan engelli çökeltme oranı serbest çökeltme oranından daha büyük bir değer almaktadır. Sistem içerisindeki palp yoğunluğunun artması aynı hızda çökelebilecek tane boyu oranının da artması anlamına gelmektedir. Bu nedenle engelli çökeltme prensibi ile ayırım yapan sınıflandırıcılar ayırimda yoğunluğun etkisini arttırırken, serbest çökeltme prensibine göre ayırım yapan sınıflandırıcılar palpın yoğunluğunu düşürerek tane boyu etkisini arttırmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Serbest ve engelli çökme durumlarında tanelerin boyut ve yoğunluğa göre hareketi [25]

Serbest ve engelli çökme koşullarına ait şematik gösterim ise Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4 Serbest (1a) ve engelli (1b) çökme mekanizmalarının şematik görünümü

Tüm hidrolik sınıflandırıcılar ayırım için engelli çökme prensibinden faydalanmaktadır. Bu nedenle hidrolik sınıflandırıcılardaki engelli çökme koşullarının belirlenmesi için literatürde birçok araştırma yapılmıştır.

Zimmel (1983, 1990)'e göre palp içerisindeki katı tanelerin hacimsel oranının (ϕ) artması sonucu beş etki ortaya çıkmaktadır. Bunlar,

- Yıkama suyu için uygun kesit alanının daralması sonucu net su hızının artması,
- Palp viskozitesinde artış görülmesi,
- Tanelerin yoğunlukları karşısında artan ortam yoğunluğu nedeniyle taneler üzerine etkiyen yerçekimi kuvvetinin azalması,
- Duvar engellemesinin artması ve
- Hidrodinamik difüzyonun ortaya çıkmasıdır.

Palp viskozitesi tanelerin engelli çökme hızlarını hesaplamada önem arz etmektedir. Cevher hazırlama ve sınıflandırma işlemlerinde kullanılan, içerisinde belirli tane boyu aralıklarında taneler içeren palplar ele alındığında ise çeşitli faktörlerde dikkate alınmaktadır. En önemli faktörler ise katının hacimsel oranı, tane boyu ve şekli olarak sıralanmaktadır [24].

Literatürde palp viskozitesinin hesaplanmasına yönelik birçok ifade yer almaktadır. Einstein palp viskozitesini (∂) Eşitlik 2.24 ile ifade etmektedir.

$$\partial = 1 + 2.5\phi \quad (2.24)$$

Burada,

ϕ : Katının hacimsel oranını ifade etmektedir.

Heiskanen ve Laapas (1979) ve Laapas (1983) daha sonra bu formülü ampirik bir düzeltme ile Eşitlik 2.25 şeklinde değiştirmişlerdir [24], [26].

$$\partial = 1 + 2.5\phi + 14.1\phi^2 + 0.00273 e^{16.6\phi} \quad (2.25)$$

Rutgers (1962) Arrhenius eşitliğinden yola çıkarak palp viskozitesi için Eşitlik 2.26'yı türetmiştir.

$$\partial = \partial_w \exp(k\phi) \quad (2.26)$$

Burada,

∂_w : Su ya da diğer bir akışkan ortamın viskozitesini ifade etmektedir.

k değeri ise değişken bir parametre olmakla beraber literatürdeki farklı çalışmalarda 5, ve 14 değerlerini almaktadır [27], [28]. Bu eşitlik k değeri 5 olduğunda eşitlik 2.25 ile benzer sonuçlar elde etmektedir.

1989 yılında Swanson tarafından önerilen ampirik model Eşitlik 2.27’de verilmektedir.

$$\partial = \partial_w \frac{2\phi_{max} + \phi}{2(\phi_{max} - \phi)} \quad (2.27)$$

Burada ϕ_{max} engelli çökelme ortamında meydana gelen kabaran yatak içerisindeki herhangi bir malzeme için elde edilebilecek en yüksek katı içeriğini ifade etmektedir. Literatürde ϕ_{max} değişkeninin hesaplanabilmesi için çok sayıda çalışma yürütülmüştür. Ancak sonuçların birçoğu tabiatı gereği ampirik eşitliklerdir.

Sudduth (1993)’a göre malzemelerin yataklanabilmesi için en uygun tane boyu dağılımının belirlenmesi konusunda birçok çalışma yapılmasına rağmen ulaşılabilir maksimum katı içeriği değerinin belirlenmesi için çok az sayıda çalışma tamamlanmıştır [29]. 1930’larda tane bileşenlerinin boyut oranlarının tanelerin maksimum yataklanmasını hesaplayabilmek için büyük önem taşıdığı belirtilmiştir [30], [31]. Ancak bu konudaki en detaylı çalışma McGeary (1961) tarafından tamamlanmıştır. Yaklaşım her ne kadar ampirik olarak değerlendirilse de direk ölçümlere gerek duyulmaktadır. Sonuçlar sadece ideal küresel tane sistemlerine uygulanabilmektedir. Bunula birlikte yaptığı çalışmalar sonucunda aynı tane boyut aralığındaki tanelerin yataklanması sonucunda kristal yoğunluğunun % 62.5’i elde edilmiştir [32].

Low and Bhattachary (1984) göre, ϕ_{max} direk ölçümler ve hatta grafiksel kestirim ile hesaplanmaktadır. Bu değer kestirim yöntemi ile hesaplanmasına ilişkin çalışmalar Lewis and Nielsen (1969) tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda maksimum katı içeriğinin hava içerisinde suya göre daha doğru hesaplanabileceği belirtilmiştir. Bir diğer açıklamada ise tane agregasyonunun artması sonucunda katının maksimum sıkışma miktarının düşeceği belirtilmiştir [33].

Tanelerin yatak içerisindeki en yüksek katı içeriğinin belirlenmesine yönelik diğer çalışmalar çökme testleri yardımıyla doğrudan ölçüm şeklinde ve deneysel verilerin en küçük kareler yöntemiyle kestirimi şeklinde yapılmıştır [34].

Yu ve Standish (1993) malzeme yatak yoğunluğunun tane boyu dağılımı kadar katının hacminden de etkilendiğini belirtmiştir. Yu ve Standish (1988, 1991) ise lineer modellerin tüm tane boyu dağılımlarında yataklanmayı tahmin edebileceğini açıklamışlardır. Engelli çökme üzerine yapılan en son çalışmalarda ise maksimum katı içeriğinin yatağın tam çökme ve tam akışkanlık arasındaki geçişi sırasında genişlemesinin doğrudan ölçümü yoluyla hesaplanabileceği savunulmaktadır [35].

Engelli çökme ile ayrımın modellenebilmesi için birçok eşitlik geliştirilmiş ve tanelerin engelli çökme hızının (V_t) hesaplanmasında kullanılmıştır.

2.2.1. Steinour Eşitliği

Steinour (1944) Stokes yasasını düzenleyerek yeni bir eşitlik geliştirmiştir. Yapılan çökme testleri sonucunda elde edilen serbest çökme hızlarının engelli çökme hızlarına dönüştürülebilmesi içinse ampirik bir düzeltme katsayısı geliştirilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar ($Re < 0.0025$) olduğu durumlarda geçerli olmaktadır. Steinour'a ait engelli çökme eşitliği Eşitlik 2.28'de verilmektedir.

$$V_t = \frac{2gd^2(\rho_s - \rho_f)\varepsilon\phi(\varepsilon)}{9\mu} \quad (2.28)$$

Burada,

ε : Homojen bir palp içerisindeki sıvının hacimsel oranı (boşluk oranı)

V_t : Küresel tane ve sıvı arasındaki bağıl hız

şeklinde verilmektedir.

2.2.2. Richardson ve Zaki Eşitliği

Laminar akış koşulları için başka bir engelli çökme modeli Richardson ve Zaki tarafından 1954 yılında geliştirilmiştir. Model, aynı yoğunlukta farklı boyutlarda taneler içeren bir palptaki tanelerin kayma hızlarını hesaplamıştır. Modele göre, sınırsız bir sıvı içerisinde U_t çökme hızı ile çökelen tek bir tane (i) bulunmaktadır. Tanelerin sıvı içerisindeki hacimsel oranının artması sonucu tanelerin kayma hızı (V_t) düşmektedir. Tanelerin hacimsel oranı (f_i) ile karmaşık bir ilişkisi bulunan kayma

hızı sınırını ($Re < 0.0025$) değerinden Re (0.2-489) aralığına kadar genişletmişlerdir. Richardson ve Zaki eşitliği Eşitlik 2.29'da verilmektedir [36].

$$V_t = U_t(1 - \phi)^n \quad (2.29)$$

Burada,

- V_t : Engelli çökme hızı
- U_t : Terminal çökme hızı
- ϕ : Tanelerin palp içerisindeki hacimsel derişimi
- n : Tane boyutu ve şekline bağlı Richardson ve Zaki indeksi

şeklinde verilmektedir.

n değeri, 0.1 gibi düşük Reynold sayısı değerlerinde küresel taneler için genellikle 4-5 olan bir sabittir. Reynold sayısına bağlı olarak değişen n değerleri ise Çizelge 2.4'te verilmektedir.

Çizelge 2.4 Reynold sayısı ve Richardson ve Zaki indeksi korelasyonu [36]

Reynold Sayısı	n
$Re \leq 0.2$	4.6
$0.2 < d^* < 1$	$4.4 Re^{-0.03}$
$1 < d^* < 500$	$4.4 Re^{-0.1}$
$500 \leq Re$	2.4

Richardson ve Zaki indeksinin tüm Reynold sayılarında geçerli olacak şekilde genişletilmesi için literatürde birçok çalışma yapılmıştır [37]. Yapılan bu çalışmalar sonucunda elde edilen değerler Çizelge 2.5'te verilmektedir.

Çizelge 2.5 Richardson ve Zaki indeksinin hesaplanmasında kullanılan korelasyonlar [37]

Yayıncı ve tarihi	Korelasyon
Wallis (1969)	$n = \frac{4.7(1 + 0.15Re_p^{0.687})}{1 + 0.253Re_p^{0.687}}$
Khan ve Richardson (1989)	$\frac{4.8 - n}{n - 2.4} = 0.043Ar^{0.57}$
Rowe (1987)	$\frac{4.7 - n}{n - 2.35} = 0.175Re_T^{0.75}$
Graside ve Al-Dibouni (1979)	$\frac{5.1 - n}{n - 2.7} = 0.1Re_T^{0.9}$

Teorik olarak Richardson ve Zaki eşitliğinin geçerli olduğu akış koşulları, tanelerin iri parçalı bir bulut halinde çökebileceği katı içeriği değerine denk gelmektedir. Bu katı değeri ise azami olarak ($\phi = 0,57$) koşuludur. Yapılan deneysel çalışmalarda ise eşitliğin geçerli olduğu azami katı değeri ise 0.30 olarak belirlenmiştir [36].

2.2.3. Lockett ve Al-Habbooby Eşitliği

Farklı tane boyu ve yoğunluktaki tanelerin çökme ve akışkan yatak içerisindeki davranımlarının belirlenebilmesi için de literatürde çalışmalar yapılmıştır. Aynı tanelerden oluşan palp davranışlarının gözlenmesi farklı tane boyu ve yoğunluktaki tanelerden oluşan palp davranışlarını açıklamak için uygun bir başlangıç noktası olarak kabul edilmiştir. Bu yaklaşım ilk kez Lockett ve Al-Habbooby tarafından kullanılmıştır [38].

Lockett ve Al-Habbooby (1974) farklı boyuttaki tanelerin oluşturduğu ortamda ortam yoğunluğunun etkisini ihmal ederek bir eşitlik düzenlemişlerdir. Eşitliğin temelini Richardson ve Zaki eşitliği oluşturmaktadır. Üç farklı tane boyu fraksiyonu için oluşturulan eşitlik, Eşitlik 2.30'da verilmektedir.

$$V_{ti} = U_{ti}(1 - \phi_i - \phi_j - \phi_k)^{n-1} \quad (2.30)$$

Burada,

- V_{ti} : i fraksiyonundaki taneye ait engelli çökme hızı
- U_{ti} : i fraksiyonundaki taneye ait terminal çökme hızı
- ϕ_i, ϕ_j, ϕ_k : Tanelerin palp içerisindeki hacimsel derişimi
- n : Richardson ve Zaki indeksi

şeklinde verilmektedir.

Locket ve Al-Habbooby yaptığı çalışmalarda tek dağılımlı sistemler için geliştirilen Richardson ve Zaki korelasyonunun çoklu sistemlerdeki her bir tane boyu fraksiyonuna uygulanabileceğini göstermiştir [39].

2.2.4. Masliyah Eşitliği

Masliyah (1979) çoklu sistemlerdeki düşük Reynold sayısına sahip tanelerin engelli çökme hızlarını Eşitlik 2.31 ile hesaplamıştır.

$$V_t = gd^2 \frac{(\rho_s - \rho_f)}{18\mu} \alpha_f F(\alpha) \quad (2.31)$$

Burada,

α_f : Palp boşluk oranı (1- $\emptyset$)

$F(\alpha)$: Tanelerin hacimsel oranı ile ilgili bir değişken

şeklinde verilmektedir.

Laminar akış koşulları için geliştirilen yukarıdaki eşitlik daha sonra Stokes dışı akış koşullarına Eşitlik 2.32 ile uyarlanmıştır.

$$V_t = gd^2 \frac{(\rho_s - \rho_{susp})}{18\mu (1 + 0.15 Re^{0.687})} \alpha_f F(\alpha) \quad (2.32)$$

Eşitlik 2.32'de yer alan Reynolds sayısı ise Eşitlik 2.33 ile hesaplanmaktadır.

$$Re = \frac{V_t d \rho_f \alpha_f}{\mu_{susp}} \quad (2.33)$$

Burada,

μ_{susp} : Palp viskozitesi

şeklinde verilmektedir. Bu modelin önceki modellere göre en belirgin üstünlüğü ise farklı tane boylarının yanı sıra farklı yoğunluktaki tanelerde uygulanabilmesidir.

Masliyah çok değişkenli sistemlerdeki engelli çökme hızının belirlenebilmesi için Eşitlik 2.34'ü geliştirmiştir.

$$\left[(u_i - u_f) = \frac{gd^2 F(\alpha)}{18\mu} (\rho_i - \rho_{susp}) \right] \quad (2.34)$$

Eşitlik 2.34'e göre bir i tanesinin engelli çökme hızı tane ve palp arasındaki yoğunluk farkı, tane çapı, sıvının hacimsel oranı ve sıvı hızı tarafından belirlenmektedir [40].

Law (1987) ikili karışımli bir palp ile yaptığı çalışmada benzer 5 farklı engelli çökme eşitliği kullanarak ağır ve hafif tanelerin farklı fraksiyonlarının çökme hızlarını hesaplamıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda ise bu koşul için en iyi eşitliğin Masliyah'a ait olan eşitlik olduğunu bildirmişlerdir [10]. Al-Naafa ve Selim (1989) tarafından yapılan benzer bir çalışmada ise eşitlikler ile hesaplanan engelli çökme hızları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda ise Selim (1983)'e ait eşitliğin en iyi sonucu verdiğini açıklamışlardır [41].

2.2.5. Swanson Eşitliği

Swanson (1989) transisyonel akış koşullarında sebest ve engelli çökme hızlarının hesaplanması için bir eşitlik geliştirmiştir. Bu eşitliğin geliştirilmesinde ise DeVaney ve Shelton (1939) tarafından ağır ortam ile ayırmada geçerli olan ve engelli çökme hızının hesaplandığı modeli temel almıştır. Model 1961 yılında Oliver tarafından kullanılan ve ters akım etkisini açıklayan genel modele dayanmaktadır. Swanson'a göre bir tanenin çökme hızı sıvının sınır tabakası, katının hacimsel oranı, palp viskozitesi ve geri akım ve yan akım etkilerine bağlıdır. Oliver'a ait model Eşitlik 2.35 'de verilmektedir.

$$M = 0.5 \left(1 - \left(\frac{CV}{CVM} \right)^9 \right) \quad (2.35)$$

Burada,

- CV : Katının tüm hacim içerisindeki hacimsel oranı,
- CVM : Katının bulunabileceği en yüksek hacimsel oranı,
- M : f (cm³/gr) değerini değiştiren üssel bir değer

şeklinde verilmektedir.

Swanson eşitliği Eşitlik 2.36'da verilmektedir.

$$V_t = \frac{u_N}{\alpha \left(\tanh(N_s \sqrt{48}) + \frac{1}{N_s} \right)} \quad (2.36)$$

Burada,

- u_N : Tanenin türbülans (Newton) akış hızı,
 N_s : Swanson sayısı,
 α : sınır tabakasına ait sürtünme katsayısı

şeklinde verilmektedir. M engelli çökme modelinde 0.5 değerini almaktadır. Swanson sayısı ise Eşitlik 2.37'de verilmektedir.

$$N_s = \frac{N_R \sqrt{f_d}}{\beta \sqrt{48}} \quad (2.37)$$

Burada,

- N_R : Reynold sayısı,
 f_d : Sürtünme faktörü,
 β : Sınır tabakası kalınlık katsayısı

şeklinde verilmektedir. β küresel taneler için 3.2312 değerine eşittir.

2.2.6. Concha ve Almendra Eşitliği

Concha ve Almendra daha önce sundukları serbest çökme eşitliğini temel alarak yeni bir engelli çökme eşitliği geliştirmişlerdir. Palp içerisindeki taneler Reynolds sayılarına bağlı olarak farklı akış koşullarına maruz kalmaktadır. Bu nedenle engelli çökme eşitliğine geçişte asimptotik düzeltme katsayıları kullanılmıştır.

Bu düzeltme katsayıları ise momentum transferi ve duvar etkisi olarak belirtilmektedir [42]. Momentum transferi bir tanenin etrafında bulunan diğer taneler nedeniyle taneler ve sıvı arasındaki momentum transferindeki değişimi ifade etmektedir. Bu değer neredeyse görünür palp viskozitesi artışına eşittir. Duvar etkisi ise, hem hareket eden sıvı ve tane duvarı arasındaki enerji kaybı nedeniyle hem de tane etrafındaki akış alanının daralmasından meydana gelmektedir. Her iki etkinin de katı içeriği yönünden düzeltme katsayılarına ihtiyacı bulunmaktadır. Concha ve Almendra'ya ait engelli çökme eşitliği Eşitlik 2.38'de verilmektedir.

$$V_t = \frac{20.52\mu}{d\rho_p} f_1(\phi) \left\{ \left[1 + 0.0921 \left(\frac{d^3(\rho_s - \rho_f)\rho_f g}{0.75\mu^2} \right)^{1/2} f_2(\phi) \right]^{1/2} - 1 \right\}^2$$

$$f_1(\phi) = \frac{(1 - \phi)^2 (1 + 0.75\phi^{1/3})}{(1 - \phi + 1.2\phi^{2/3})^{3/2} (1 - 1.45\phi)^{1.83}} \quad (2.38)$$

$$f_2(\phi) = \frac{(1 - \phi + 1.2\phi^{2/3})^{3/4} (1 - 1.45\phi)^{1.83}}{(1 - \phi) (1 + 0.75\phi^{1/3})}$$

Burada,

$f_1(\phi)$ ve $f_2(\phi)$: Katı içeriğine bağlı fonksiyonlar

şeklinde verilmektedir [43].

2.2.7. Lee Eşitliği

Concha ve Almendra'ya ait Eşitlik 2.38 farklı tane boyu ve yoğunluk dağılımına sahip sistemlere uygulanabilmektedir. Ancak bu eşitlikte önemli bir eksiklik görülmüştür. Örneğin su ve katı kullanılarak hazırlanan ve yoğunluğu 1.5 g/cm^3 olan bir palp içerisinde yoğunluğu 1.5 g/cm^3 'ten düşük olan tanelerin yüzmesi, yoğunluğu 1.5 g/cm^3 'ten yüksek olan tanelerin ise batması beklenmektedir. Ancak Eşitlik 2.38'e göre tane yoğunluğu sıvı yoğunluğundan yüksek olduğu sürece tüm taneler batacaktır. Bu da yoğunluğu 1.3 g/cm^3 olan bir tanenin bile bu palp yoğunluğunda batması anlamına gelmektedir.

Lee Eşitlik 2.38'i modifiye ederek bu eksikliği giderdiğini bildirmiştir. Lee'ye ait modifikasyonun en temel noktası ise sıvı viskozitesi (μ_f) ve sıvı yoğunluğu (ρ_f) kavramlarının efektif palp viskozitesi (μ_p) ve efektif palp yoğunluğu kavramları ile değiştirilmesidir [22]. Bu yaklaşım diğer araştırmacılar tarafından da kabul görerek denenmiştir [44], [42].

Barnea ve Mizrahi yaptığı denemelerin ardından yapılan değişiklikleri psedohidrostatik etki olarak işaret etmişler ve palp içerisindeki hidrostatik basınç dağılımının yalnızca sıvı içerisindeki dağılımdan daha büyük bir değer aldığını ayrıca kaldırma kuvvetinde daha büyük olduğunu bildirmişlerdir [42].

Lee'ye ait engelli çökelme eşitliği Eşitlik 2.39'da verilmektedir.

$$V_t = \frac{20.52\mu}{d\rho_p} f_1(\phi) \left\{ \left[1 + 0.0921 \left(\frac{d^3 |\rho_s - \rho_p| \rho_p g}{0.75\mu^2} \right)^{1/2} f_2(\phi) \right]^{1/2} - 1 \right\}^2$$

$$f_1(\phi) = \frac{(1 + 0.75\phi^{1/3}) (1 - \phi) (1 - 1.47\phi + 2.67\phi^2)^2}{(1 - 1.45\phi)^{1.83} (1 + 2.25\phi^{3.7})} \quad (2.39)$$

$$f_2(\phi) = \frac{(1 + 2.25\phi^{3.7})(1 - 1.45\phi)^{1.83}}{(1 + 0.75\phi^{1/3})(1 - \phi)(1 - 1.47\phi + 2.67\phi^2)}$$

$$\rho_p = \rho_f(1 - \phi) + \sum_{k=1}^M \rho_{s_k} C_k$$

Burada,

- $f_1(\phi)$ ve $f_2(\phi)$: Katı içeriğine bağlı fonksiyonlar
 k : Bir boyut ve yoğunluğa sahip tane
 M : Katı bileşenlerin sayısı
 C_k : k tanesine ait farklı boyut ve yoğunluk değerlerindeki hacimsel katı oranı

şeklinde verilmektedir [22].

2.2.8. Asif Eşitliği

Asif (1997) iki ya da daha fazla boyut ve yoğunluk içeren akışkan yataklar için dinamik bir model geliştirmiştir. Model taşınım ve dağılım gibi kütle transferi ve taşınım mekanizmalarını birleştirmiştir. Modelde yatak genişlemesi, herhangi bir tane grubunun içerik profili, yığın yoğunluğu profili ve tabaka geri dönmesinin oluşumu açıklanmaktadır. Tane bağıl hızı olarak tanımlanan kayma hızı Eşitlik 2.40'ta verilmektedir [45].

$$V_{ti} = U_{ti} \frac{(\rho_i - \rho_p)^{n-1}}{(\rho_i - \rho_f)} \quad (2.40)$$

Terminal Reynolds sayısını ve n indeksini hesaplamak içinse Eşitlik 2.41'de verilen Khan ve Richardson (1990) korelasyonunu kullanmıştır [45].

$$Re_t = (2.33 Ar^{0.018} - 1.53 Ar^{-0.016})^{13.3} \quad (2.41)$$

$$Ar = \left(\frac{(\rho_s - \rho_f)\rho_f d_p^3 g}{\mu^2} \right)$$

Eşitlik 2.40'ta yer alan n indeksi ise Eşitlik 2.42 ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{4.8 - n}{n - 2.4} = 0.043 Ar^{0.57} \quad (2.42)$$

2.2.9. Galvin Eşitliği

Galvin ve arkadaşları kabaran yataklı ayırma teknolojisine birçok katkı sağlamıştır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda palp yoğunluğu ile çökme hızını ilişkilendirilmişlerdir. Bu durum kayma hızının hidrodinamik kuvvetlere ne şekilde bağlı olduğunu açıklamaktadır. Galvin'e göre tanelerin palp içerisindeki hacimsel oranının artması kayma hızını düşürmektedir. Bu açıklamadan yola çıkılarak Richardson ve Zaki eşitliği modifiye edilmiş ve bir kayma hızı eşitliği geliştirilmiştir. Eşitlik engelli çökme hızı ve basınç farkını ilişkilendirmektedir Galvin'e ait eşitlik Eşitlik 2.43'te verilmektedir.

$$V_{tij} = U_{tij} \left(\frac{\frac{dP}{dH}}{(\rho_i - \rho_f)g} \right)^{n-1} \quad (2.43)$$

Burada,

dP/dH : Basınç değişim miktarı

şeklinde verilmektedir.

Modelde her bir numune için tek bileşenli akışkanlık verilerinin yeterli olduğu bildirilmiştir. Basınç değişim miktarı tüm numuneler için ortak olup tüm tane fraksiyonlarının ağırlığını taşımak için sıvı tarafından üretilen sürtünme kuvveti tarafından oluşturulmaktadır. Araştırmacılar Richardson ve Zaki eşitliğinin tüm palplarda, tane boylarında ve yoğunluklarda kullanılabilecek genel bir şeklini geliştirmişlerdir. Bu eşitlik engelli çökmeyi açıklamada boyutsuz bir yoğunluk parametresi kullanmaktadır [11].

Yoğunluğu ρ_m olan homojen bir karışımdaki herhangi bir i boyut j yoğunluk aralığındaki tanenin kayma hızı Eşitlik 2.44'te verilmektedir.

$$V_{ti} = U_{ti} \left(\frac{\rho_i - \rho_p}{\rho_i - \rho_f} \right)^{n_i-1} \quad (2.44)$$

Burada,

V_{tij} : Engelli çökme hızı,

U_{tij} : Terminal çökme hızı,

ρ_i : Tane yoğunluğu,

- ρ_p : Palp yoğunluğu,
 ρ_f : Sıvı yoğunluğu
 n_i : Richardson ve Zaki indeksi

şeklinde verilmektedir.

Galvin ve arkadaşları tarafından geliştirilen eşitlik Asif tarafından geliştirilen eşitliğe benzerlik göstermektedir. Galvin bu benzerliği kabaran yataklı sınıflandırıcı ile yaptığı çalışmalarda karşılaştırma yapmak amacıyla da kullanmıştır. Ayrıca eşitlik aynı malzemeler için Richardson ve Zaki eşitliği ile Lockett ve Al-Habbooby eşitliğine de dönüştürülerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda eşitliklerin yalnızca aynı yoğunluktaki malzemelerin farklı boyut aralıklarında uygulanabilir olduğu belirtilmiştir [11], [46].

2.2.10. Kohmuench Eşitliği

Kohmuench (2000) tarafından Masliyah eşitliği temel alınarak yeni bir eşitlik geliştirilmiştir. Kohmuench'e ait eşitlik Eşitlik 2.45'te verilmektedir.

$$V_t = \frac{gd^2 (1 - \phi)^\beta (\rho_i - \rho_{susp})}{18\mu (1 + 0.15 Re^{0.687})} \quad (2.45)$$

Burada,

- V_t : Engelli çökelme hızı,
 d : Tane çapı,
 ρ_i : Tane yoğunluğu,
 ρ_{susp} : Palp yoğunluğu,
 μ : Sıvı viskozitesi
 Richardson ve Zaki indeksi
 β : $\begin{matrix} \text{For } Re < 1 & \beta = 4.36 Re^{-0.03} \\ \text{For } Re \geq 1 & \beta = 4.4 / Re^{0.1} \end{matrix}$

şeklinde verilmektedir.

Eşitlik 2.45 için gerekli olan Reynolds sayısı ve palp viskozitesi ise sırasıyla Eşitlik 2.46 ve Eşitlik 2.47'de verilmektedir.

$$Re_s = \frac{d_i \rho_f |U_p| (1 - \phi)}{\mu_{susp}} \quad (2.46)$$

$$\mu_{susp} = \mu_{water} \frac{2\phi_{max} + \phi}{2(\phi_{max} - \phi)} \quad (2.47)$$

2.3. Kabaran Yataklı Sınıflandırıcılarda Kayma Hızı Hesaplaması

Homojen bir palp içeriğinde askıda kalan tanelerin hızları kayma hızı kavramı ile açıklanmaktadır. Kayma hızı, tanenin çökme hızı (U_t) ile palp içerisinden geçen suyun hızı (U_f) arasındaki ilişkiye bağlıdır. Bu ilişki Eşitlik 2.48'de verilmektedir.

$$U_{slip} = U_t - U_f \quad (2.48)$$

Burada,

U_{slip} : Kayma (engelli çökme) hızı,

U_t : Terminal çökme hızı,

U_f : Yukarı yönlü su hızı,

şeklinde verilmektedir.

Palp içerisindeki tane, ortamın yüksek yoğunluğu nedeniyle hareketine karşılık bir direnç kuvveti ile karşılaşmaktadır. Reynolds sayısının düşük olduğu durumlarda tane üzerine etkiyen sürtünme kuvveti doğrudan kayma hızı ile orantılıdır. Bu orantı Eşitlik 2.49'da verilmektedir.

$$F_d = \frac{3\pi\mu d U_{slip}}{F} \quad (2.49)$$

Burada,

F : Engelli çökme oranı,

şeklinde verilmektedir.

Engelli çökme oranı, tane üzerine uygulanan sürtünme ve hareket kuvvetleri ile ilişkilidir. Tane üzerindeki sürtünme kuvvetlerinin tanenin net ağırlığına eşitlenmesi durumunda kayma hızına ulaşılmaktadır. Bu durum, tane üzerine etkiyen aşağı ve yukarı yönlü kuvvetlerin birbirine eşitlendiği anlamına gelmektedir. Engelli çökme oranı ise palp içerisindeki tanenin kayma hızının tanenin terminal çökme hızına oranıdır [20].

Kabaran yataklı sınıflandırıcı tane dinamiklerine bağlı şekilde ayırım yapmaktadır. Taneler yatak içerisine doğru aşağı yönlü hareket etmeye çalışırken yukarı yönlü su taneleri ters yönde taşımaya çalışmaktadır. Yeterli kütleyle sahip taneler su direncini yenerek alt akıma gitmeyi başarmaktadırlar. Su direncini yenemeyen taneler ise su ile birlikte yükselerek üst akıma gitmektedir. Aynı zamanda engelli çökme koşullarının varlığı da tanelerin çökmesine karşı direnç meydana getirmektedir. Sıvının kaldırma kuvveti ve sürtünme kuvveti dışındaki akış sürtünmesi de taneler arası mesafe ile açıklanabilmektedir. Kabaran yataklı sınıflandırıcı içerisindeki bir tane üzerine uygulanan toplam direnç kuvvetleri Eşitlik 2.50'de verilmektedir [8].

$$R = f(\mu, \rho_f, d, V, \varepsilon) \quad (2.50)$$

Burada,

- R : Toplam direnç kuvvetleri,
- μ : Dinamik viskozite,
- ρ_f : sıvı yoğunluğu,
- d : Tane çapı,
- V : Tane hızı,
- ε : Yatak boşluğu,

şeklinde verilmektedir.

Toplam direnç kuvvetleri göz önüne alındığında sıvı ile bağlı tane hızı olarak adlandırılan kayma hızı, katının hacimsel oranı ve terminal çökme hızının bir fonksiyonudur [36].

Malzemelerin birikerek bir yatak oluşturması ve ağır bir sıvı gibi davranmaları kabaran yataklı sınıflandırıcıların kendine has özelliğidir. Yatak arasındaki boşluklara gelen su hızlanma eğilimi gösterdiğinden aynı koşullarda ekipmana beslenen su hızı ile yatak arasından geçen su hızı birbirinden farklılık göstermektedir. Yatak içerisindeki palp yoğunluğu ise basınç ayarlaması yoluyla kontrol edilmektedir. Yatak içerisindeki su hızı da beslenen su hızına bağlıdır. Palp yoğunluğu ve yatak boşluğu kabaran yataklı sınıflandırıcıların eksen boyunca değişiklik göstermektedir. Palp yoğunluğu tabanda en yüksek değerini alırken eksen boyunca tabandan uzaklaştıkça düşmektedir. Dolayısıyla yatak boşluğu tabanda en düşük değerini almakta ve eksek boyunca yükseldikçe artmaktadır.

Kabaran yataklı sınıflandırıcı içerisindeki yatak yoğunluğu yatak basıncının ayarlanması ile kontrol edilmektedir. Yatak yoğunluğu palp bileşenleri açısından Eşitlik 2.51 ile açıklanmaktadır [8].

$$P/H = \left\{ \sum \phi_{ij} \rho_{ij} + \left(1 - \sum \phi_{ij} \right) \rho_f \right\} g \quad (2.51)$$

Burada,

P/H : Basınç değişim miktarı,

ϕ_{ij} : i boyut aralığı ve j yoğunluğundaki tanenin hacimsel miktarı,

ρ_{ij} : tane yoğunluğu,

ρ_f : Sıvı yoğunluğu,

g : Yerçekimi ivmesi,

şeklinde verilmektedir.

2.3.1. Ortalama Palp Yoğunluğu ve Yatak Boşluk Oranının Hesaplanması

Bir taneye ait kayma hızı kendisini oluşturan üç bileşene ayrılabilir. Bunlardan ilki tanenin terminal çökme hızı, ikincisi taneler arası mesafe ve üçüncüsü de palp yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır [47]. Taneler arası mesafe ve palp yoğunluğu kavramları birbirinden bağımsız değişimlerdir. Patwardhan ve Tien tarafından oluşturulan model farklı tane boyu ve yoğunlukta taneler içeren bir sistemdeki tanelerin kayma hızını hesaplamak için kullanılmaktadır (Eşitlik 2.52).

$$V_{slip,ij} = U_{ter,ij} F(\varepsilon) G(\rho) \quad (2.52)$$

Burada,

$V_{slip,ij}$: i boyutunda, j yoğunluğundaki taneye ait kayma hızı,

$U_{ter,ij}$: i boyutunda, j yoğunluğundaki taneye terminal çökme hızı,

$F(\varepsilon)$: Taneler arası mesafeyi ifade eden parametre,

$G(\rho)$: Palp yoğunluğunu ifade eden parametre,

şeklinde verilmektedir

Engelli çökme koşullarına sahip bir sistemde tanelerin kayma hızlarının hesaplanabilmesi için yukarıda ifade edilen parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Genel olarak kabaran yataklı sınıflandırıcıların performansı doğrudan kontrol edilemeyen yatak yoğunluğu ve yüksekliğine bağlıdır. Bu iki

parametre bağımsız parametreler olup kontrol edilebilir parametreler olan yıkama suyu hızı ve basınç set noktasının birer fonksiyonudur. Yatak yoğunluğunun besleme malzemesine göre değişim gösterdiği bilinmektedir. Örneğin kömür düşük su hızlarında demir ya da kromit gibi minerallere oranla daha yüksek yatak yoğunluğu/yüksekliği oluşturmaktadır [7].

Masliyah (1979) içerisinde farklı tane boyu ve yoğunluk fraksiyonlarının bulunduğu sistemler için $F(\varepsilon)$ ve $G(\rho)$ parametrelerini sırasıyla Eşitlik 2.53 ve Eşitlik 2.54'te vermektedir.

$$F(\varepsilon) = \varepsilon^{n_{ij}-2} \quad (2.53)$$

$$G(\rho) = \left(\frac{\rho_{ij} - \rho_{susp}}{\rho_{ij} - \rho_f} \right) \quad (2.54)$$

Burada,

n_{ij} : Richardson ve Zaki indeksi

şeklinde verilmektedir [40].

Happel (1958) ve Kuwabara (1959) taneler arası ilişkinin açıklanabilmesi amacıyla bir hücre modeli önermişlerdir. Pawardhan ve Tien (1985)'de benzer hatlarda bir hücre modeli yayınlayarak palp içerisindeki tane-tane etkileşimlerinin iki komşu tane arasındaki mesafe ile temsil edilebileceğini bildirmişlerdir [48]. Pawardhan ve Tien'e göre bir palp belirli bir kalınlıkta sıvı ile sarmalanmış tane şeklinde tanımlanmaktadır. Bu tanımdan yola çıkarak yatak boşluğu ya da tek bir tane için gerekli sıvı hacmi miktarını Eşitlik 2.55 ile tanımlamışlardır.

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{d_\epsilon}{d}\right)^3} \quad (2.55)$$

Burada,

ε : Yatak boşluğu,

d_ϵ : Sıvı katman kalınlığı,

d : Tane çapı,

şeklinde verilmektedir [48].

Palp içerisindeki bir tanenin kayma hızını en iyi şekilde tahmin edebilmek için taneler arası ilişkiler tüm boyut ve yoğunluk aralıkları için karakterize edilmelidir.

Van Der Wielen (1996) taneler arası ilişki ve palp yoğunluğu parametrelerini Eşitlik 2.56 ve Eşitlik 2.57'yi kullanarak tahmin etmiştir.

$$F(\varepsilon) = \varepsilon^{0.79n_{ij}-1} \quad (2.56)$$

$$G(\rho) = \left(\frac{\rho_{ij} - \rho_{susp}}{\rho_{ij} - \rho_f} \right)^{n_{ij}/4.8} \quad (2.57)$$

Burada,

n_{ij} : Richardson ve Zaki indeksi

şeklinde verilmektedir.

Galvin (1999) ise kayma hızının tahmin edilebilmesi için Richardson ve Zaki eşitliğinin bir korelasyonunu kullanmıştır. Taneler arası ilişki ve palp yoğunluğu parametrelerini ise basınç değişiminin bir fonksiyonu olarak hesaplamıştır. Bu eşitliğe ait detaylı bilgi ikinci bölümde verilmiştir (Eşitlik 2.44)

Das (2009) yaptığı çalışmalarda yatak içi su hızının bazı tane özelliklerinin ortalaması olan yatak boşluk oranının kestirimi ile hesaplandığını bildirmiştir [8]. Kabaran yataklı sınıflandırıcı içerisindeki boşluk oranı (1- ϕ) Eşitlik 2.58'de verilmektedir.

$$\varepsilon_{avg} = \frac{\rho_{avg,particle} - \rho_{susp}}{\rho_{avg,particle} - \rho_{water}} \quad (2.58)$$

Burada,

ε_{avg} : Ortalama yatak boşluğu,

$\rho_{avg,particle}$: Ortalama tane yoğunluğu,

ρ_{susp} : Ortalama palp yoğunluğu,

ρ_{water} : Suyun yoğunluğu,

şeklinde verilmektedir. Yatak içi su hızı besleme su hızının boşluk oranına bölünmesi ile hesaplanmaktadır [8].

Tanelerin ekipman içerisindeki oranı ve palp yoğunluğu ekipmanın tabanından tavanına doğru artan yükseklikle azalmaktadır. Bu nedenle ortalama bir yoğunluk değerinin hesaplanması gerekmektedir. Efektif palp yoğunluğu, ekipman içerisindeki ortalama palp yoğunluğu olarak adlandırılmakta ve Eşitlik 2.59 ile ifade edilmektedir.

$$\rho_{sus} = \sum \phi_{ij} \rho_{ij} + \left(1 - \sum \phi_{ij}\right) \rho_f \quad (2.59)$$

Eşitlik 2.58 ve Eşitlik 2.59 kullanılarak ortalama palp yoğunluğu ve yatak basıncı Eşitlik 2.60 kullanılarak ilişkilendirilmektedir.

$$\rho_{sus} = \frac{P/H}{g} \quad (2.60)$$

Ortalama palp yoğunluğu ise Eşitlik 2.61 ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_{susp} = \frac{P}{P_{waterbed}} \rho_{water} \quad (2.61)$$

Burada,

- ρ_{susp} : Ortalama palp yoğunluğu,
- P : Anlık basınç değeri (kPa),
- $P_{waterbed}$: Ekipman yalnızca su ile doldurulduğunda okunan basınç değeri (kPa),
- ρ_{water} : Suyun yoğunluğu,

şeklinde verilmektedir [8].

2.3.3. Richardson ve Zaki İndeksinin Hesaplanması

Richardson ve Zaki indeksinin tüm Reynolds sayılarında geçerli olacak şekilde genişletilmesi için literatürde birçok çalışma yapılmıştır [37]. Yapılan bu çalışmalar sonucunda elde edilen değerler Çizelge 2.5'te verilmiştir. Hesaplamalar için gerekli kesin korelasyon ise Rowe'a ait olan korelasyondur [8].

2.3.4. Reynolds Sayısının Hesaplanması

Reynolds sayısı (Re) akışkandaki atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlere bir oranı olarak tanımlanmaktadır. Reynolds sayısı Eşitlik 2.8 ile ifade edilmiştir. Yerçekimi ya da merkezkaç kuvvetleri etkisi altında çökelen bir tanenin terminal çökme hızı

basit bir kuvvet denkliği ile hesaplanabilmektedir. Ancak kabaran yataklı sınıflandırıcılardaki akış koşulları nedeniyle bu durum karmaşık bir hal almaktadır. Akış türüne bağlı olarak değişkenlik gösteren sürtünme katsayısının daha net bir şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir.

Galvin tanelerin terminal çökme hızlarındaki Reynolds sayılarını Zigrang ve Sylvester tarafından önerilen korelasyon yardımıyla hesaplamıştır [46]. Bu korelasyon Eşitlik 2.10'da verilmiştir. Ancak bu korelasyonun akış rejiminden bağımsız oluşu hesaplamalarda hatalara neden olmuştur. Hartman yaptığı çalışmalarda Reynolds sayısını Archimedes sayısının bir fonksiyonu olarak hesaplamıştır. Hartman korelasyonu ile elde edilen Reynolds sayısı kullanılarak yapılan hesaplamalarda tanelerin terminal çökme hızlarının $\pm \%1$ hata oranında hesaplandığı bildirilmiştir [49]. Hartman'a ait korelasyon Eşitlik 2.62'de verilmektedir.

$$\log_{10} Re_t = [(c_1 A - c_2)A + c_3]A - c_4 + \log_{10}(c_5 + c_6 \sin(c_7 A - c_8)) \quad (2.62)$$

Burada,

$$A : \log_{10} Ar,$$

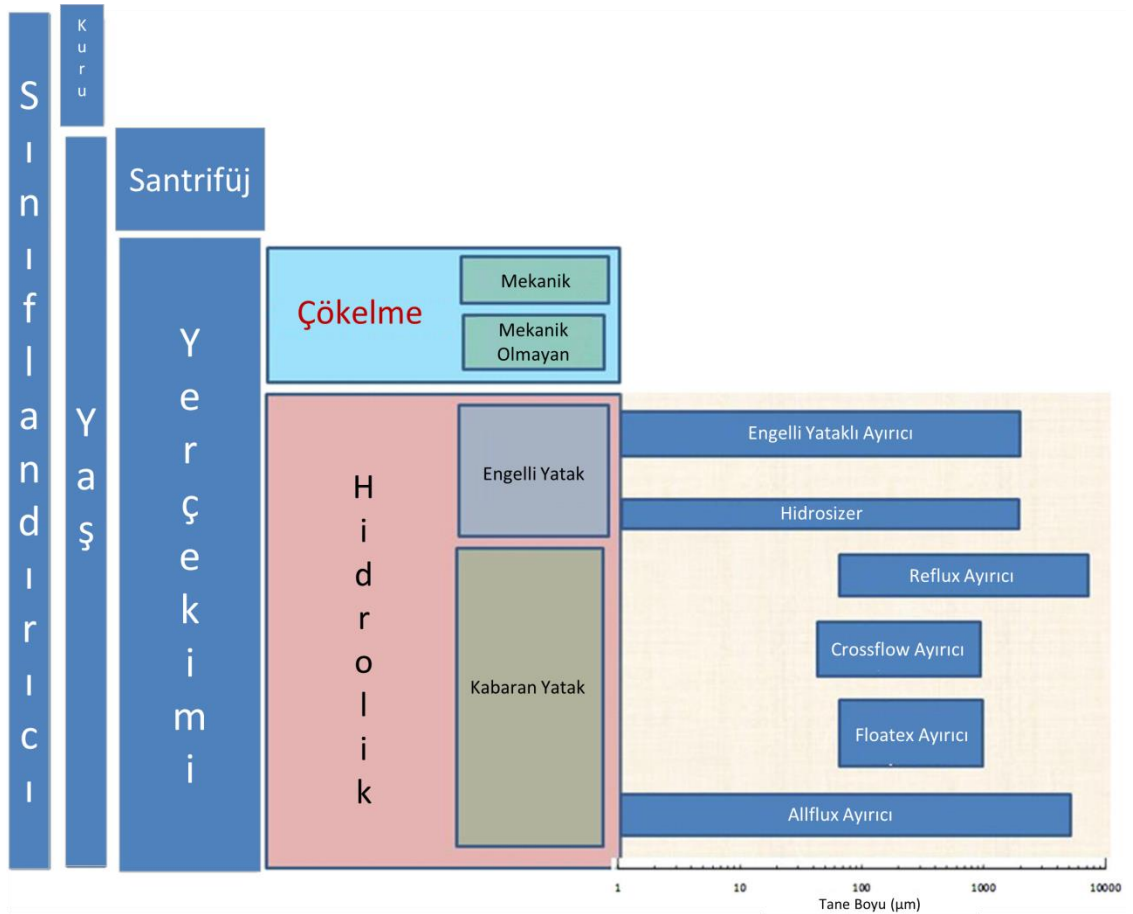
$$Ar : Ar = \frac{d^3 g \rho_f (\rho_{ij} - \rho_f)}{\mu^2}, \text{ birimsiz Archimedes sayısı,}$$

şeklinde verilmektedir [8].

3. YERÇEKİMİ İLE SINIFLANDIRMA

Yerçekimi ile sınıflandırma taneleri yoğunluk, boyut ve şekil gibi fiziksel özelliklerindeki farklılıklardan yararlanarak yerçekimi, merkezkaç kuvvetlerinin etkisi altında viskozite ve kaldırma kuvvetleri tarafından tetiklenerek ayırmaktadır. Ayrım farklı tanelerin bağıl çökme hızlarına göre gerçekleşmektedir. Bu yöntem endüstriyel minerallerin işlenmesi, gıda sektörü, değerli metallerin zenginleştirilmesi, atık su temizlemesi gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Yerçekimi ile sınıflandırma kolay ve düşük maliyetli olması açısından günümüzde de önemini korumaktadır [50].

Yerçekimi ile sınıflandırma yapan ekipmanlar işletim ve tasarım özelliklerine göre iki temel gruba ayrılmaktadır. Yerçekimi ile sınıflandırma yapan ekipmanların çalışma prensipleri ve çalışma boyut aralıklarına göre detaylı şekilde sınıflandırılması Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1 Yerçekimi ile sınıflandırma yapan ekipmanların çalışma prensipleri ve çalışma boyut aralıklarına göre sınıflandırılması [12]

3.1. Hidrolik Sınıflandırma

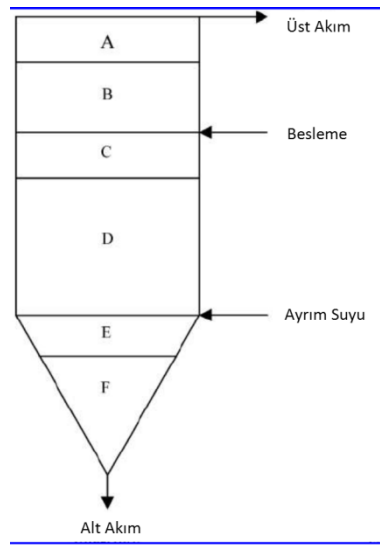
Hidrolik sınıflandırıcılar 1934 yılından bu yana tanelerin yoğunluk ve boyut gibi fiziksel özelliklerindeki farklardan yararlanarak ayrılması amacıyla kullanılmaktadır. Hidrolik sınıflandırıcılar grubunda yer alan kabaran yataklı sınıflandırıcılar temel olarak yukarı yönlü su akışına karşılık besleme malzemesinin yerçekimi etkisi altında çökmeye maruz bırakıldığı ekipmanlardır. Genellikle boyuta göre sınıflandırma amacı ile kullanılan bu ekipmanlar uygun tane boyu dağılımlarında ise yoğunluğa göre ayırım yapabilmektedir. Bu koşulda, yoğunluğu yüksek iri taneler yukarı yönlü su hızını yenerek tabanda bir katı tabakası oluşturmaktadır. Yüksek yoğunluklu katılardan oluşan bu yatak ayırım suyundan daha yüksek bir yoğunluk değerine sahiptir. Tanelerin çökme hızı katı ve sıvı arasındaki yoğunluk farkına bağlı olduğundan tane yatağının yoğunluğunun artmasıyla, tanelerin çökme hızları da düşmektedir. Bu yapay yoğunluk kuvveti yoğunluğu düşük tanelerin üst akıma, yoğunluğu yüksek tanelerin ise alt akıma taşınmasına neden olmaktadır.

Yukarı yönlü su ekipmana konik kısmın hemen üzerine yerleştirilmiş olan dağıtım plakaları ile verilmektedir. Yukarı yönlü su hızı yıkama suyu miktarının ve kolon kesit alanının bir fonksiyonudur. Yukarı yönlü su akışı ekipman içerisindeki katı tanelerin aşağı yönlü çökme hızına karşıdır. Kolon içerisine giren tanelerin çökme hızları yukarı yönlü su hızından düşük ise taneler su ile taşınarak üst akıma giderler. Dolayısıyla yukarı yönlü yıkama suyu hızı ekipmanın kesme boyunu belirleyen önemli bir parametredir [37]. Kolon içerisinde kalan diğer taneler ise istenilen yükseklik ya da yatak kalınlığı oluşana kadar yüksek yoğunluklu akışkan bir yatak oluştururlar. Yatak yüksekliği ise bir basınç sensörü tarafından ölçülmektedir. İstenilen yatak yüksekliğine ulaşıldığında otomatik bir PID denetleyicisi yardımıyla alt akım ucunda bulunan hava kontrollü pinç vana açılıp kapatılarak fazla katı alt akımdan sistemi terk eder ve bu sayede yatak yüksekliği sabit kalır. Alt akımdan alınan malzeme yüksek katı içeriğine sahiptir.

PID (Proportional,Integral,Derivative) oransal-integral-türevsel denetleyici PID kontrol döngüsü yöntemi , yaygın endüstriyel kontrol sistemlerinde kullanılan genel bir kontrol döngüsü geribildirim mekanizmasıdır. Bir PID denetleyici ölçülü bir süreç içinde değişen ve istenilen ayar noktası ile arasındaki farkı alarak bir "hata" değerini hesaplar. Kontrolör proses kontrol girişini ayarlayarak hatayı en aza indirerek istenilen ayar değerine ulaşmak için çalışır.

Kontrol sisteminin en önemli görevi oluşan malzeme yatağının yüksekliğini sabit tutarak besleme ve ürünler arasındaki dengeyi sağlamaktır. Yalnızca yeterli kütleye sahip olan taneler yatağı geçerek alt akıma gidebilmektedir. Böylelikle akışkan yatak sayesinde otojen bir ortam oluşturulur ve taneler boyut ve yoğunluk farkına göre sınıflandırılabilir. Kabaran yataklı sınıflandırıcıların verimli şekilde çalışabilmesi sabit bir akışkan yatak oluşturulmasına bağlıdır [51].

Kabaran yataklı sınıflandırıcı içerisinde kararlı durumun oluşmasının ardından tane dağılımı üç farklı bölgede gösterilebilmektedir [14], [52]. Bu bölgeler sırasıyla, ekipmanın üst akım bölgesinde ince ve düşük yoğunluk değerine sahip tanelerden oluşan üst bölge, ayırmanın büyük ölçüde gerçekleştiği benzer yoğunluk ve boyutlara sahip tanelerin oluşturduğu geçiş bölgesi ve ekipmanın alt akım bölgesinde toplanan iri ve yüksek yoğunluk değerine sahip tanelerin oluşturduğu alt bölge şeklinde sıralanabilmektedir. Günümüzde ise kabaran yataklı sınıflandırıcılar altı ana bölgeye ayrılmaktadır [53], (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Kabaran yataklı sınıflandırıcı üzerindeki farklı bölgeler [53]

Bu bölgeler sırasıyla, üst akım toplanma bölgesi (A), üst orta bölge (B), besleme bölgesi (C), alt orta bölge (D), çökme bölgesi (E) ve alt akım toplanma bölgesidir (F). Besleme bölgesinde türbülans kaynaklı bir karışma mevcuttur. Alt orta bölümde ise akışkan yatak oluşumu gözlenmektedir. Bu bölgede tanelerin özgül ağırlık farkına göre ayrılmasını sağlayan bir ağır ortam kendiliğinden oluşmaktadır. Alt orta bölümün hemen altından sisteme verilen yıkama suyu yukarı yönlü hareket etmektedir. İnce ve yoğunluğu düşük taneler oluşan ağır ortamı

geçemeyerek üst akıma yönelirler. İri ve yoğunluğu yüksek taneler ise ağır ortam içerisinde çökelerek alt konik kısımda yoğun bir yatak oluştururlar. Oluşan bu yoğun yatağın içerisine uygulanan yıkama suyu sayesinde yatak kısmi olarak açılır ve hafif taneler üst akıma doğru yıkanır.

Kabaran yataklı sınıflandırıcılardaki bazı önemli işletme parametreleri, yıkama suyu miktarı, katı besleme miktarı ve basınç set değeridir. Daha öncede açıklandığı gibi yıkama suyu miktarı aşağı yönlü çökelmeye maruz kalan tanelerin aksi yönünde yukarı yönlü su hızını belirlemektedir. Beslemenin sabit hızla yapılması da önemli bir noktadır. Ekipman içerisinde çok az miktarda katı olması durumunda uygun yatak derinliği ve kalınlığı sağlanamamaktadır. Ekipman içerisinde fazla katı olması durumunda ise yatağın aşırı sıkışması ve aşırı basınç nedeniyle akışkan yatak özelliği yitilmektedir. Bu durum ince tanelerin iri taneler arasında sıkışarak alt akıma kaçak yapmasına neden olmaktadır.

Basınç set değeri yatak kalınlığının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Set değerinin aşıldığı durumlarda kararlı durumun bozulmaması için alt akım vanası otomatik olarak açılarak iri ve yüksek yoğunluklu taneler alt akımdan alınmaktadır. Set değerinin arttırılması ekipman içerisindeki katı miktarının artmasına ve dolayısıyla yatağın kalınlığı ve yüksekliğinin kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır.

Kabaran yataklı sınıflandırıcıların tasarım parametreleri kolon yüksekliği ve besleme noktası olarak verilmektedir. Malzeme yatağının yüksekliği daha uzun kolonlar kullanılarak arttırılabilmektedir. Literatürdeki genel yargı yüksek kolonların ayırım veriminin daha yüksek olduğu yönündedir. Çünkü teorik olarak kolon içerisinde çökelen ya da yükselen taneler boyut ve yoğunluklarına göre ayırma maruz kalmak için daha fazla kalma süresine sahip olmaktadır. Artan kalma süresi ise kaçak miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır [14].

Besleme noktası ekipmanın tabanından besleme girişine kadar olan mesafeyi ifade etmektedir. Besleme borusunun konumu değiştirilerek beslemenin ekipman içerisine yapılacağı derinlikte değiştirilebilmektedir. Besleme geleneksel ekipmanlarda genellikle ekipmanın içine yüksekliğinin üçte biri mesafeden yapılmaktadır.

Kabaran yataklı sınıflandırıcılar genel olarak 800 μm ile 75 μm boyut aralığında ayırım yapmaktadır [9]. 800 μm 'den daha iri boylarda ise ayırım verimi düşmekte ve

ekipman bir elütratör gibi davranmaya başlamaktadır [24]. 100 µm'den ince boylarda ayırım yapılması durumunda ise düşük kapasite değerleri sorun yaratmaktadır. Katı kapasiteleri genellikle kesme boyuna bağlı olarak 10-40 tph/m² değerleri arasında değişmektedir. Ayırım boyu irileştikçe kapasite artmakta inceldikçe azalmaktadır [24].

Malzeme yatağı arasında dolaşan suyun sahip olduğu yüksek hız neticesinde alt akıma kaçak miktarları oldukça düşük değerlerde kalmaktadır. Bu tip sınıflandırıcıların genel özelliği çok temiz alt akım ürünü vermeleridir [54].

Hidrolik sınıflandırıcıların tasarımında bakım da önemli bir konudur. Klasik bir kabaran yataklı sınıflandırıcıda ayırma bölgesine yatay olarak yerleştirilmiş su besleme boruları mevcuttur. Belli aralıklarla yerleştirilen bu borular üzerinde çok küçük çapta delikler bulunmaktadır. Yıkama suyu separatöre bu deliklerden verilmektedir. Küçük deliklerden verilen yüksek miktar su içerisinde yer alan kirleticiler ise bu deliklerin tıkanmasına yol açabilir. Bazı bölgelerin tıkanması sonucu ise oluşan ölü bölgelerde ekipman performansı düşer. Bu nedenle klasik kabaran yataklı sınıflandırıcıların özünde kapasite ve performans açısından bir limit değer bulunmaktadır.

Kabaran yataklı sınıflandırıcılar günümüzde en çok kum ve çakıl sınıflandırılmasında kullanılmaktadır. Ancak düşük işletme maliyetlerinin yanı sıra düşük yatırım, kurulum ve bakım maliyetleri bu ekipmanın kullanım alanlarının genişlemesine olanak vermektedir [51]. Sülfür minerallerinin kapalı devre öğütme sistemlerinde hidrosiklonlar yerine kullanım olanakları araştırılmıştır [14]. Hidrosiklonlar yerine kabaran yataklı sınıflandırıcıların kullanılması sonucu ayırım veriminin arttığı çelik ve su tüketiminde azalmalar olduğu belirlenmiştir.

3.1.1. Geleneksel Hidrolik Sınıflandırıcılar

Geleneksel hidrolik sınıflandırıcıların tasarımı üstü açık bir tekne şeklindedir. Yıkama suyu ekipmanın tabanına yerleştirilen borular sayesinde sisteme verilmektedir. Çalışma esnasında besleme katısı su ile birlikte ekipmanın üst bölgesinden beslenmekte ve taneler çökelmeye başlamaktadır. Yukarı yönlü yıkama suyu ekipman içerisinde askıda kalan akışkan bir malzeme yatağı oluşturmakta, yatak arasındaki küçük boşluklar ise yukarı yönlü su hızının artmasına ve çökme hızı düşük olan tanelerin hareketinin engellenmesine neden olmaktadır.

Sonuç olarak, ince taneler ekipmanının üst kısmında toplanarak sistemi terk ederken, yukarı yönlü su hızından daha yüksek çökme hızına sahip taneler ise akışkan yatağı geçerek ekipmanının alt kısmından sistemi terk etmektedir.

Akışkan yataklı ayırma prensibine dayalı ilk hidrolik sınıflandırıcı olan Stokes sınıflandırıcısı (hidrosizer) yerçekimi ile zenginleştirme yapan tesislerin beslemesinin hazırlanmasında kullanılmıştır. Ekipmanda her bir ayırma odasına oluşan akışkan yatak ile tanelerin ayırma suyuna karşı hareketlerini sağlamak amacıyla su ile beslenmektedir. Ekipman gövdesi trapezoid biçimde bir tanktır [55].

Bu sistemde her bir oda kendi basınç sensörüne sahiptir. Sensör sayesinde istenilen basınç değerinde alt akım vanası açılmakta ve akışkan yatak sayesinde oluşan basınç değeri sabit tutulmaktadır. Her bir gözün altında bulunan vana hidrolik ya da elektrikle çalışarak yatak yüksekliğini sabit tutmaktadır. Yatak yüksekliğinin artmasıyla basınç değeri de artmakta ve vana açılmaktadır. Aynı şekilde yükseklik azaldığında basınç değeri düşmekte ve vana da kapanmaktadır. Bu hareket yatak seviyesinin ve dolayısıyla ayırma yoğunluğunun sabit kalmasını sağlamaktadır.

Hukki konik sınıflandırıcısı 1967 yılında R.T. Hukki tarafından üretilen mekanik bir sınıflandırıcıdır. Besleme hafif bir merkezkaç kuvveti oluşmasını sağlayan dönen dağıtım diski üzerinden konik yapıdaki tanka beslenir. Tankın altındaki spreylere ile sisteme verilen su konik bölgede ayırma oluşmasını sağlar. İri taneler alt akımdan alınır. Konik kısım ekipmanının en önemli bölgesini oluşturmaktadır. Bu bölgedeki dairesel vanalar palpa laminar akış koşullarında yükselmesine olanak sağlamaktadır. Düşük kaliteli kumların zenginleştirilmesi için tasarlanan ekipmanının günümüzde kullanımı bulunmamaktadır.

Diğer bir mekanik sınıflandırıcı olan Sogreah Lavodune Sınıflandırıcı, silindirik bir tank ve bir koniden oluşmaktadır. Ekipmanda laminar akış koşullarında akışa ters yönde zenginleştirme gerçekleşmektedir. Besleme ekipmanının içine yüksekliğinin üçte biri mesafeden beslenmektedir. Ekipman hacmi yüksek yoğunlukta sınıflandırmanın gerçekleştiği konik kısım ile sınırlandırılmıştır. İnce malzeme sistemi üst akımdan terk ederken iri malzeme ise ekipmanı alt akımdan terk eder. Bu ekipman da Hukki konik sınıflandırıcı gibi günümüzde kullanılmamaktadır.

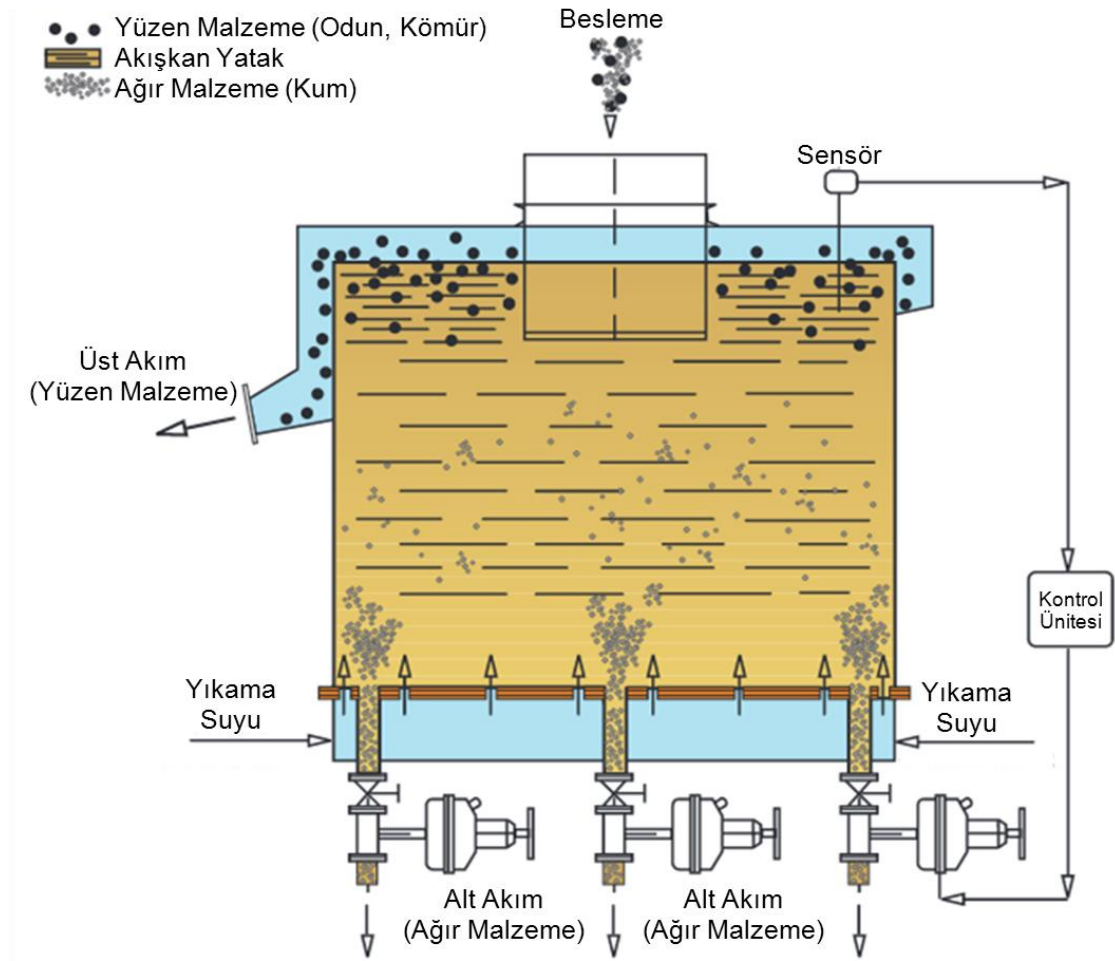
Linatex hidrosizer endüstrideki birçok uygulamada uzun yıllar kullanılmıştır. Ekipmana yapılan besleme bir boru yardımıyla dağıtma plakasına verilir ve dairesel

olarak dışa ve yukarıya doğru yayılması sağlanır. Besleme ve alt akım arasındaki su oranı yukarı yönlü ayırım suyu miktarını kontrol ederek ayırım boyutunu (d_{50}) belirler [24]. 1990'lı yıllarda pilot ölçekli bir Linatex sınıflandırıcı ile Amerika, Kuzey Karolina eyaletinde fosfat cevherinin dağıtılması ve flotasyon beslemesinden şlam atılması amacıyla kapsamlı çalışmalar yürütülmüştür. Linatex sınıflandırıcı 700-150 μm boyut aralığında sınıflandırma amacıyla da kullanılmıştır [56]. Keskin ayırım ihtiyacı olan durumlarda son derece verimsiz olan bu ekipman şlam atma işlemlerinde ise verimli şekilde kullanılmaktadır. Çalışma sonunda sunulan raporda Linatex hidrosizerın şlam atma konusundaki potansiyel avantajları anlatılmıştır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 Linatex Hidrosizer'a ait potansiyel avantajlar [56]

Karakteristik Özelliği	Potansiyel Avantajı
Yüksek katı içerikli, şlamsız flotasyon beslemesi hazırlanabilir,	Kimyasal tüketiminde düşüş,
+75 μm boyutunda minimum kaçak,	Verim artışı,
Çok düşük kaçak oranlarında tek kademede şlam atılabilir,	Malzeme taşıma ve pompalama giderlerinde azalma,
Yüksek basınçlı pompalama gerekmez,	Düşük enerji ve aşınma
Otomasyonla kontrolü kolaydır,	Yüksek verim, Hassas kontrol,
Yüksek kapasitede çalışır,	Kapasite arttırımına olanak sağlar.

Hydrosort, Phoenix firması tarafından tasarlanan bir diğer kabaran yataklı hidrolik sınıflandırıcıdır. Bu separatör ve sınıflandırıcı çoğunlukla agrega üretiminde kullanılmaktadır. Kullanım alanları arasında, yoğunluğu kumdan düşük olan ve ürün kalitesini olumsuz yönde etkileyen kirleticileri temizlemek ve kum ürününü farklı boyut aralıklarında hazırlamak bulunmaktadır [57]. Hydrosort sınıflandırıcı tıpkı Linatex hidrosizerda olduğu gibi taneleri sınıflandırmak için yukarı yönlü su akışı ve malzeme yatağını kullanmaktadır. Bu ekipmanın en önemli özelliği ise tıkanmaya neden olmayan sınıflandırıcı tabanı ile suyu tüm ekipman alanına eşit şekilde dağıtabilmesidir. Hydrosort ve Linatex sınıflandırıcıları Crossflow sınıflandırıcıdan ayıran en önemli özellik ise beslemenin bir boru yardımıyla doğrudan ayırım bölgesine yapılmasıdır. Hydrosort sınıflandırıcıya ait şematik görünüm Şekil 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.3 Hydrosort sınıflandırıcıya ait şematik görünüm [58]

Krebs C-H Whirlsizer mekanik olmayan bir hidrolik sınıflandırıcıdır. Ekipmanda kontrollü su beslemesi ve palp içerisinde oluşturulan düşük türbülans ile iri ve ince taneler birbirinden ayrılmaktadır [24]. Ekipmanın üst kısmı silindirik alt kısmı ise konik şekilde tasarlanmıştır. Silindirin en alt kısmı içerisinde bulunan konik kısım iri taneleri duvar ve konik kısım arasındaki dar açıklığa gitmeye zorlar. Bu kısmın altındaki ince deliklerden verilen ayırım suyu tanelerin yuvarlanma hareketi yapmasına neden olmaktadır. Ekipman içerisinde herhangi bir akışkan yatak oluşmamasına rağmen ayırimda engelli çökeltme prensipleri geçerlidir. Ekipman kum sınıflandırma amacıyla üretilmiş olup asıl amacı vermikülit, mika ve kyanit gibi küresel olmayan malzemelerin sınıflandırılmasıdır [24].

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı üzere ekipmanın verimli çalışması için akış koşullarının durgun olması gerekmektedir. Akış koşullarındaki aşırı türbülans yada değişimler tanelerin istenmeyen bölgelere gitmesine neden olmaktadır. Ne yazık ki günümüzde kullanılan hidrolik sınıflandırıcılar besleme palpını doğrudan

ayırım bölgesine beslemektedirler. Bu basit besleme sistemi sınıflandırıcı boyunun üçte biri uzunlukta dikey bir borudan oluşmaktadır.

Borunun çıkış ucunda ise beslemeyi yatay ekseninde dağıtmak için kullanılan dağıtma plakaları mevcuttur. Ancak bu besleme yöntemi türbülansa neden olduğu için ayırım verimini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu duruma ek olarak, besleme palpı içerisindeki su da üst akıma gitme eğilimindedir. Sonuç olarak, yukarı yönlü su hızı besleme bölgesinde oldukça yüksektir. Besleme bölgesinin yukarısında ise su hızı yıkama suyu ve besleme suyunun toplamı olmaktadır. Bu düzensiz durum yoğunlukla sınıflandırıcı içerisinde ikinci bir akışkan yatağın oluşumuna sebebiyet vermektedir. Yüksek kapasitelerde çalışıldığında, besleme palpından gelen suyun hacmi, yıkama suyunun hacminden daha büyük olmaktadır. Bu durum sınıflandırıcı performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Tesis uygulamalarında, düşük yoğunluklu iri tanelerin ayırım bölgesinin hemen yüzeyinde toplandıkları ve ayırım suyunun bu taneleri üst akıma taşıyamadığı görülmektedir. Bu iri taneler kütleleri belli bir değere ulaşana kadar yüzeyde birikmeye devam etmekte ve nihayetinde yatağın arasına karışmaktadırlar. Bu sorun yalnızca ayırım suyunun bu taneleri üst akıma taşıyacak şiddetle yatağa verilmesiyle çözülebilmektedir. Ayırım suyunun şiddetinin artması ise yoğunluğu yüksek ince tanelerin üst akıma kaçmasına neden olmaktadır. Bu nedenle geleneksel kabaran yataklı sınıflandırıcı akım şemaları birkaç kademe olarak tasarlanmaktadır. Geleneksel kabaran yataklı sınıflandırıcılar ile yapılan çalışmalar bu ekipmanların geniş tane boyu ve dar yoğunluk dağılımına sahip minerallerin zenginleştirilmesinde verimsiz olduğunu göstermiştir [59].

Pilot ölçekli bir hidrolik sınıflandırıcı ile ağır mineral zenginleştirme amacıyla yapılan çalışmada zirkon tenörü yüksek bir atıktan kuvars uzaklaştırılmıştır. Atık % 3-8 zirkon, %18-22 Al_2O_3 ve % 1 TiO_2 içermektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda %80'in üzerinde kuvars, %90 zirkon verimi elde edilecek şekilde atılmıştır. Bu uygulamada önemli olan bir nokta zirkon (4.7 g/cm^3) ve kuvars (2.65 g/cm^3) arasındaki yoğunluk farkının yüksek olmasıdır. Yoğunluk farkının düşük olduğu durumlarda ise ayırım verimi düşmektedir [15].

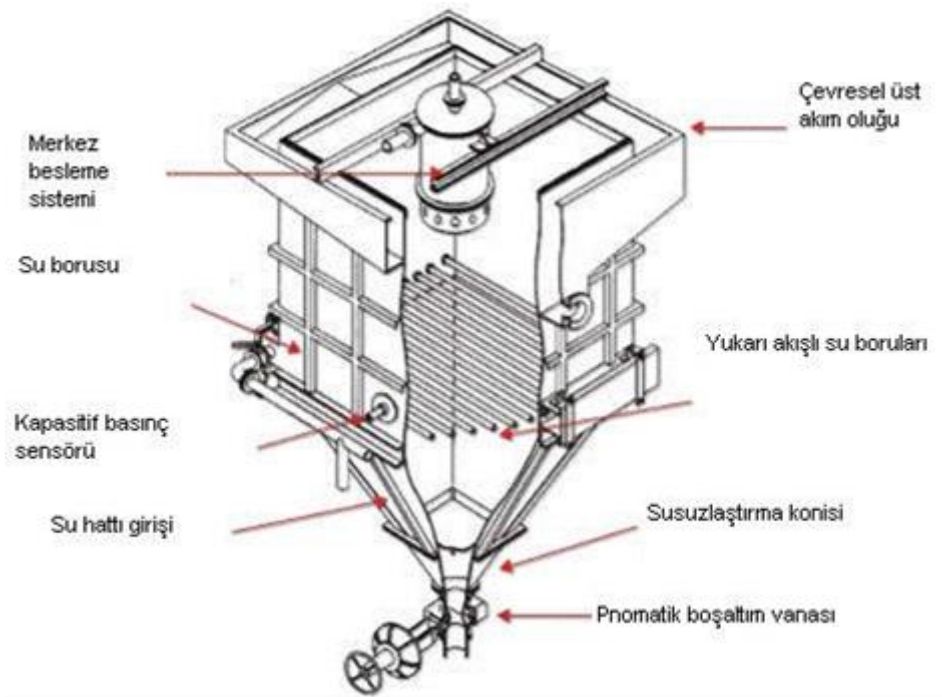
Bu nedenle konvansiyonel hidrolik sınıflandırıcıların kapasiteleri beslemeden gelen suyun zararlı etkisinden dolayı sınırlandırılmaktadır.

3.2.2. Yüksek Verimli Yeni Nesil Hidrolik Sınıflandırıcılar

Klasik hidrolik sınıflandırıcıların verimsizliklerini azaltmak ve ihtiyaçlara cevap vermek amacıyla yüksek verimli hidrolik sınıflandırıcılar tasarlanmıştır. Bu sınıflandırıcılardan başlıcaları, Floatex, Reflux, Allflux, Hyrdofloat, Manyetik Hidroseparatör ve Crossflow sınıflandırıcılardır. Bu yeni yüksek verimli hidrolik sınıflandırıcılarda performans artışı ve maliyet düşüşü bir arada sunulmaktadır.

3.2.2.1. Floatex Sınıflandırıcı

Floatex kabaran yataklı sınıflandırıcı (Floatex Yoğunluk Sınıflandırıcısı) en yeni hidrolik sınıflandırıcı tasarımlarındandır. Diğer tüm sınıflandırıcılar gibi sistemde tanelerden oluşan bir ayırım yatağı ve yukarı yönlü su hareketi mevcuttur. Yatak seviyesi basınç sensörleri ve otomatik vanalar yardımıyla kontrol edilmektedir. Crossflow sınıflandırıcıların üretilmesinden önce Floatex sınıflandırıcı hidrolik sınıflandırıcılar arasında en gelişmiş sınıflandırıcı olarak gösterilmekteydi. Floatex sınıflandırıcı 1946 yılından bu yana kullanılan yüksek kapasiteli bir ekipmandır. Ekipman kapasitesi 1-600 t/s aralığında değişmektedir. Floatex hidrolik sınıflandırıcının basitleştirilmiş şematik gösterimi Şekil 3.4'te verilmektedir.



Şekil 3.4 Floatex hidrolik sınıflandırıcıya ait şematik görünüm [60]

Floatex sınıflandırıcıda su, ayırıcının altından tanka verilerek malzemeyi kaynama bölgesine doğru yaymayı sağlar. Belli bir süre geçtikten sonra kaynama noktasında,

birbirine yakın duran iri taneler, aralarından geçen su hızının yüksek olması nedeniyle alt akımda toplanırken, daha ince taneler aralarından geçen su hızının düşük olması nedeniyle tank içinde süspansiyon halinde kalırlar veya üst akımdan alınırlar. Gerek ayırmanın kontrol altında tutulabilmesi gerekse kaynama noktasına temiz su girişi düşünüldüğünde, floatex sınıflandırıcılar hidrosiklonlara göre çok daha verimli ayırım yapabilmektedirler.

Floatex sınıflandırıcının akım şemalarına dahil olmasından sonra geleneksel yerçekimi ile zenginleştirme devrelerinin performanslarında artış, birim maliyetlerinde ise azalmalar görülmüştür. Akışkan yatak ve basitleştirilmiş yukarı yönlü su dağıtım mekanizmasının birleşimi ile yoğunluğu yüksek tanelerin üst akıma kaçak yapması asgari düzeye indirilmiş ve ayırım verimi yükselmiştir [60].

Spiral ayırıcıların kullanıldığı bir zenginleştirme tesisinde yapılan çalışmada mevcut akım şeması, floatex-spiral sınıflandırıcıların birlikte kullanıldığı bir akım şeması ile karşılaştırılmıştır [61]. Çalışma sonucunda, yeni devrenin ayırım verimini artırdığı, işletme, bakım ve kurulum masraflarının düştüğü, operatör müdahalesinin daha kolay olabildiği gibi sonuçlar elde edilmiştir. Besleme tenörü oldukça düşük olan bir cevherde yapılan bu çalışmaya ait deneysel sonuçlar Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.2 Spiral devresi ve Floatex/Spiral devresine ait performanslarının karşılaştırılması [61]

	Floatex/Spiral Devresi	Spiral Devresi
Besleme Tenörü (%)	3	3
Konsantre Tenörü (%)	94.6	92
Verim (%)	75.4	69.5
TiO₂ Verimi (%)	88.0	-
Spiral Sayısı*	1050	1200
Floatex Sayısı*	2	1
Toplam Ekipman Maliyeti (tahmini)*	2.7 M\$	3.3 M\$

* Kapasite 1500 tph

Günümüzde Floatex sınıflandırıcılar endüstriyel minerallerin yanı sıra demir, krom ve titanyum cevherlerinde yüksek verim değerlerinde basit akım şemaları ve düşük maliyetlerle kullanılmaktadır. Cam kumu üretiminde ise ürün boyu inceliğinin ve kalite değerlerinin istenilen şekilde değiştirilmesine olanak sağlamaktadır. Ekipman

hem laboratuvar ölçekli hem de endüstriyel ölçekli olarak üretilmektedir. Floatex sınıflandırıcısının en önemli uygulamaları,

- İyi sınıflandırılmış kum üretimi,
- Kumlardan kömür, linyit, turba gibi düşük yoğunluklu malzemelerin ayrılması,
- Ağır minerallerin zenginleştirilmesi
- Farklı özgül ağırlıktaki minerallerin ayrılması,
- Kömür şist ayrımı,

şeklinde sıralanmaktadır [62].

Floatex bir sınıflandırıcı olarak kullanıldığında tek yoğunluklu bir malzemede 1 mm'den 0.075 mm'ye kadar kesme boyu değerlerinde verimli olarak çalışmaktadır. Sınıflandırma uygulamalarındaki en önemli özelliği ise değişen besleme koşullarının ayırım performansı üzerinde etkisinin bulunmamasıdır. Engelli çökeltme koşulları ve ufak bir karıştırmanın birleştirildiği durumlarda ise Floatex sınıflandırıcı serbest şist ve şlamların uzaklaştırılması, kimyasal işlemlere tabi tutulan kumların ve filtrasyon kumlarının temizlenmesi amacı ile bir yıkama ekipmanı olarak kullanılmaktadır. Zenginleştirme ekipmanı olarak kullanıldığı durumlarda ise geleneksel sınıflandırıcıların kapasitesi ve performansının çok üzerinde çalıştığı bilinmektedir. Ekipman alt akımının %75-80 katı içeriğine sahip olması doğrudan olarak stoklanabilmesine imkan sağlamaktadır. Çoğu uygulamada malzemenin taşınması için gerekli olan pompa ve susuzlandırma ünitelerinin kullanılmaması ise maliyet açısından önemli bir katkı sağlamaktadır. Ürün olarak istenen malzemelerin içerisinde kömür gibi düşük yoğunluklu kirleticilerin olması durumunda ise bu malzemeler ekipmanın üst akımından rahatlıkla alınabilmektedir. Üst akımdan alınan kirletici malzemeler daha sonra bir susuzlandırma eleğine beslenerek su ve malzemenin birbirinden kolayca ayrılması sağlanmaktadır. Susuzlandırma elekleri ekipmanın üst akım bölgesine rahatlıkla kurulabilmektedir. Kömür yıkama uygulamalarında ise ara yoğunluklu malzeme kullanımı ile bir ağır ortam yaratılması sonucu boyut sınırlaması olmadan ara yoğunluklu malzemedan hafif tüm tanelerin ekipmanın üst akımına (yüzen ürün) gitmesi sağlanmaktadır. Floatex sınıflandırıcısı 40 mm'ye kadar şist tanelerinden kömür ayrımı için uygun şekilde tasarlanmıştır.

Floatex sınıflandırıcının kullanım amacına bakılmaksızın performansını belirleyen faktörler,

- Malzemenin kabaran yatak içerisindeki kalma süresi,
- Yukarı yönlü yıkama suyunun üst akım çıkışındaki hızı,
- Su besleme boruları üzerindeki bölgede oluşan yatak yoğunluğu ya da yoğunluk değişimi,
- Sisteme beslenen katı miktarı,

şeklinde sıralanmaktadır [12].

Yukarıda verilen faktörlerin kontrol edildiği ve ekipmanın optimizasyonu açısından hayati öneme sahip işletim parametreleri ise,

- Yıkama suyu hızı,
- Basınç set değeri/yatak basıncı/yatak yüksekliği,
- Besleme palp yoğunluğu/katı içeriği,
- Besleme tane boyu dağılımı,
- Besleme yoğunluk dağılımı,
- Tane şekli,

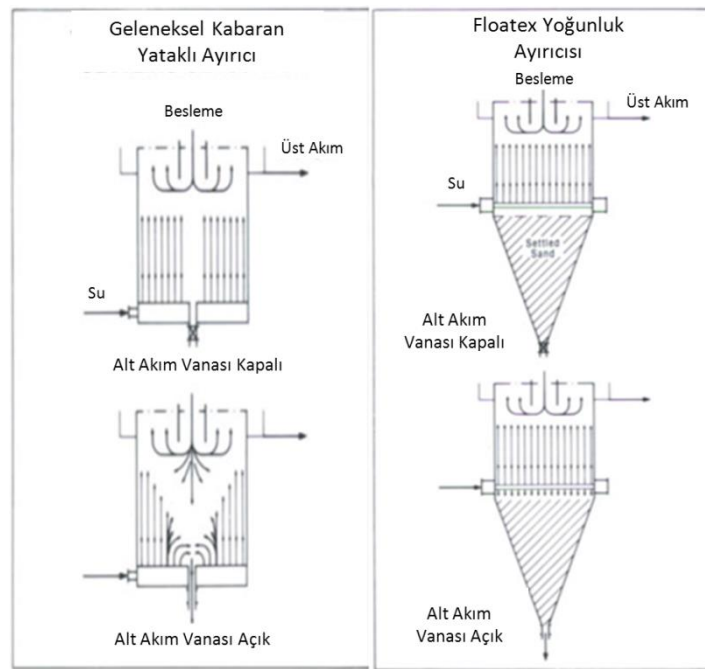
şeklinde sıralanmaktadır [12]. Bu parametrelerden su hızı ve basınç sınıflandırma ve zenginleştirme işlemlerinde birinci derece öneme sahip olup yatak yüksekliği ve yoğunluğu ise bu parametrelere bağlı parametrelerdir.

Floatex sınıflandırıcılar 0.2 m²'den 24 m²'ye kadar değişik ölçülerde üretilmektedir [62]. Ekipmanın boyutlandırılmasında dikkat edilen en önemli parametreler ise;

- Cevher tipi,
- Besleme tonajı,
- Besleme tane boyu dağılımı,
- İstenilen ürün özellikleri,
- Besleme % katı içeriği

şeklinde sıralanmaktadır.

Yeni nesil hidrolik sınıflandırıcıları geleneksel sınıflandırıcılardan ayıran en önemli özelliklerden bir tanesi de alt akım çıkış vanasının yeridir (Şekil 3.5). Geleneksel sınıflandırıcılarda alt akım çıkış vanası kabaran yatağın hemen altında bulunmaktadır. Basınç istenilen değere gelip vana açıldığında ise iri malzeme ile birlikte büyük miktarda suda alt akımdan ekipmanı terk etmektedir. Su miktarındaki bu ani değişim ise ekipman performansını olumsuz yönde etkileyerek ayırım boyunun değişmesine neden olmaktadır. Yeni nesil yüksek verimli sınıflandırıcılarda ise alt akım bir susuzlandırma konisine alınmakta ve bu sayede alt akım vanasının açılıp kapanması ekipman performansını etkilememektedir (Şekil 3.5).

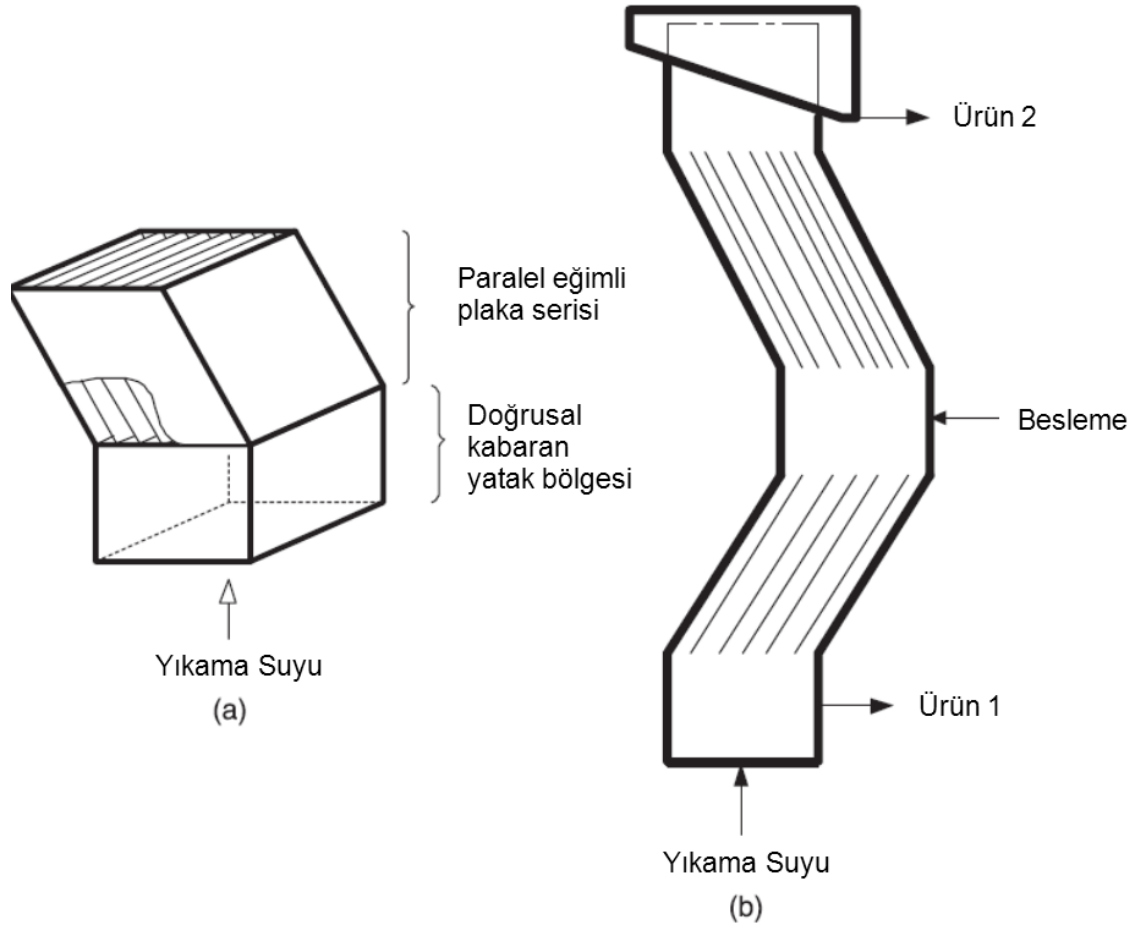


Şekil 3.5 Geleneksel ve yeni nesil hidrolik sınıflandırıcıların alt akım malzeme çıkışlarının karşılaştırılması [24]

3.2.2.2. Reflux Sınıflandırıcı (Geri Akışlı Sınıflandırıcı)

Tane boyu sınıflandırma ve yoğunluk farkına göre ayırmalarda yenilikçi ve daha avantajlı bir yaklaşım sunan Reflux sınıflandırıcılar Nuyentranlam ve Galvin (2001) tarafından tasarlanmıştır. Ekipman farklı yükseklikteki birkaç akışkan yatak ve birbirine paralel eğimli plaka setlerinden oluşmaktadır. Ekipmanı geleneksel hidrolik sınıflandırıcılardan ayıran en önemli özellik ise hızlı ve yavaş çökme hızına sahip taneleri daha verimli ayırdığı belirtilen eğimli paralel plakalardır [63]. Çökme hızı yüksek olan iri ve yoğunluğu yüksek tanelerin plakaların arasında yer alan eğimli kanallarda kısa mesafelerde çökmesi sonucu kanalların içerisinde bir tabaka

oluşturarak çabuk şekilde aşağı kaydıkları belirtilmektedir [11]. Ayrıca eğimli kanalların çökeltme için gerekli efektif alanı arttırdığı da bilinmektedir [64]. Sınıflandırıcının basitleştirilmiş şematik görünümü Şekil 3.6'da verilmektedir.



Şekil 3.6 Reflux sınıflandırıcısının birim (a) ve genel görünümü (b) [65]

Besleme palpi kabaran yatak bölgesinde homojen şekilde akışkanlaştırılır. Palp eğimli paralel plakalar arasındaki kanallara girdiğinde bazı taneler yukarı doğru bakan yüzey üzerine çökerek bir tabaka oluşturur. Çökelen bu tabaka ise hızlı şekilde aşağı yönde kayarak tekrar kaynama noktasına döner. Palp içerisinde kalan diğer taneler ise kanal boyunca yukarı yönde taşınırlar. Tabakaların aşağı yönde bakan kısmında ise çökelen taneler nedeniyle ince bir berrak su tabakası oluşur. Acrivos ve Herbolzheimer (1979) ve Davis ve ark. (1989), Reflux sınıflandırıcıda üç farklı tabaka oluştuğunu bildirmişlerdir. Bu tabakalar plakanın aşağıya bakan

The diagram illustrates the movement of solid particles (tane) through a fluidized bed reactor. The reactor is shown as a vertical vessel with a conical bottom. A large upward arrow at the bottom is labeled "Yıkama Suyu" (Washing Water). The reactor is divided into several layers:

- İnce berrak su tabakası** (Thin clear water layer) at the top.
- Palp Tabakası** (Palp layer) below the clear water layer.
- Çökelti Tabakası** (Settling layer) below the palp layer.

The diagram shows the following sequence of events for a solid particle (tane):

- a) Yıkama suyu ile akışkan hale gelen tane yatağı kanala girer,** (The solid particle enters the channel from the settling layer as the washing water flows.)
- b) Taneler kanaldan geçerek üst bölgeye doğru hareket eder,** (The particles move from the channel towards the upper region.)
- c) Taneler alt plaka üzerine çökerek palptan ayrılır ve çökelti bir tabaka oluşturur,** (The particles settle on the bottom plate, separating from the palp and forming a settling layer.)
- d) Çökelti tabakasındaki taneler hızlı şekilde tekrar kaynama bölgesine kayar,** (The particles in the settling layer move quickly back to the boiling region.)
- e) Kaynama noktasına geri dönen taneler yıkama suyunun yardımıyla tekrar kanala yönlendirilir.** (The particles returning to the boiling region are redirected back into the channel with the help of the washing water.)

Other labels in the diagram include: (a) for the channel, (b) for the upper region, (c) for the settling layer, (d) for the bottom plate, and (e) for the boiling region. The angle of the bottom plate is labeled θ , and the width of the channel is labeled w .

Çökelti tabakasının tekrar kaynama noktasına dönmesi ve yıkama suyu ile tekrar kanala yönlendirilmesi döngüsü geri akış olayı ile ifade edilmektedir. Geri akış eğimli plakalar ve palp arasındaki ilişki olarak açıklanmaktadır [65]. Kabaran yatak bölgesi Reflux sınıflandırıcının karışma bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgenin yapısı geleneksel hidrolik sınıflandırıcılardan çok farklıdır.

49

ayarlanması ise Reflux sınıflandırıcıların çok geniş besleme koşullarında yüksek verimle çalışmasına olanak sağlamaktadır [16], [17].

Geri akışlı sınıflandırıcılarda, sınıflandırmanın kilit noktası her bir kanalda aynı tane boyunda ayırım yapılmasıdır. Bu nedenle besleme tane boyu dağılımının kontrolü önem arz etmektedir. Ayırım verimini yüksek kılan ise sınıflandırıcı içinde döngüsel bir iç dönüşümün olmasıdır.

Ekipman kapasitesi kömür ve mineral uygulamalarında besleme tane boyu dağılımına göre değişiklik göstermektedir. Ekipmanın farklı modellerine ait tane boyu kapasite ilişkisi kömür ve mineral için sırasıyla Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te verilmektedir.

Çizelge 3.3 -1+0.25 mm kömür yıkama uygulamasında farklı modellere ait kapasite değerleri [66]

Model	RC850	RC1400	RC1750	RC2000	RC2350	RC3000
Kapasite (t/h)	20	50	70	90	130	200

Çizelge 3.4 -0.5+0.125 mm demir zenginleştirme uygulamasında farklı modellere ait kapasite değerleri [66]

Model	RC850	RC1400	RC1750	RC2000	RC2350	RC3000
Kapasite (t/h)	25	55	75	100	140	225

3.2.2.3. Allflux Sınıflandırıcı

Allflux sınıflandırıcı iki kademeli bir kabaran yataklı sınıflandırıcı olarak tanımlanmaktadır. Ekipman yukarı yönlü bir ayırım suyu ve otojen oluşan bir yatak sayesinde yoğunluk farkına göre ayırım yapmaktadır. Ana işletim parametreleri olan yukarı yönlü yıkama suyu ve akışkan yatak seviyesi birbirinden bağımsız şekilde kontrol edilebilmektedir. Allflux sınıflandırıcıyı diğer sınıflandırıcılardan ayıran en önemli özellik ise tek ekipman içerisinde iki basamaklı bir zenginleştirme/sınıflandırma işlemi uygulamasıdır. Bunun yanı sıra her iki aşamada alınan ürün kalitesi beslemedeki değişikliklerden etkilenmemektedir [67].

Allflux sınıflandırıcıya ait şematik görünüm Şekil 3.8'de verilmektedir.

kalmaktadır. Ekipmanın dış bölmesindeki su hızı iç bölmesine göre daha düşük olmaktadır. Çökelme hızı yukarı yönlü su hızından yüksek olan ara yoğunluklu malzeme bu bölümde çökerken, yoğunluğu en düşük malzemeler ise yüzerek yüksek su içeriği ile ekipmanı üst akımdan terk ederler. Ara yoğunluklu malzeme % 40-60 katı içeriğinde periyodik olarak açılıp kapanan bir vana sistemi sayesinde ekipmandan alınır. Dış bölmedeki yukarı yönlü su hızı ayrılacak malzemelerin tane boyu ve yoğunluğuna göre ayarlanmaktadır. Ayrıca ara ürün istenmediği durumlarda ekipmanın dış bölümü devre dışı bırakılarak iki ürün üretilmesi de mümkün olmaktadır. Endüstriyel boyutta kullanılan bir Allflux sınıflandırıcıya ait fotoğraf Şekil 3.9'da verilmektedir.



Şekil 3.9 Endüstriyel boyutlu bir Allflux sınıflandırıcıya ait fotoğraf görüntüsü

Ekipmanın sınıflandırma amacıyla kullanıldığı durumlarda iri ve ince bölmedeki kesme boyu birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilmektedir. Yoğunluk farkına göre ayırım veya zenginleştirme yapıldığı durumlarda ise ayırım yoğunluğunu iri hafif taneler ile ince ağır tanelerin çökelme hızları arasındaki oranlarla sağlanmaktadır.

Allflux sınıflandırıcının endüstriyel olarak en yaygın kullanım alanı mıcır üretimidir. Ekipman 1991 yılından bu yana Almanya'da bu alanda kullanılmaktadır [68]. Günümüzde özellikle beton üretiminde kullanılan mıcır kalitesindeki beklenen artış göz önüne alındığında Allflux sınıflandırıcıların yüksek kapasite ve verim değerleri bu beklentileri karşılamaktadır. Mıcır içerisindeki en sık karşılaşılan kirlenici

malzemeler ise linyit ve bitki kökleri gibi çeşitli boyut ve yoğunluk aralığındaki doğal malzemelerdir.

Günümüzde dünya çapında 50 ünite mıcır üretimi için kullanılmaktadır. Bu ünitelerden bazılarının kapasitesi -4 mm ürün için 500 t/h değerlerine kadar ulaşmaktadır. Allflux sınıflandırıcı ile mıcır üretim aşamaları ise;

- Kazılan kumun ekipmana beslenmesi,
- -4+1 mm aralığındaki iri kumun sınıflandırılması ve hafif kirleticilerden arındırılması,
- -1+0.15 mm aralığındaki ince kumun sınıflandırılması ve hafif kirleticilerden arındırılması,
- Her iki üründen şlam uzaklaştırılması ve çöktürülmesi,
- İstenilen ürün özelliklerine göre iri ve ince kumun karıştırılması,

şeklinde sıralanmaktadır.

Allflux sınıflandırıcı ile üretilen kum konsantresinin özellikleri Çizelge 3.5'te verilmektedir.

Çizelge 3.5 Allflux ürünlerine ait tane boyu ve organik impürite dağılımları [13]

Tane Boyu (mm)	Besleme (%)	İri Kum (%)	İnce Kum (%)	Üst akım (%)	2/4	0/2 (Beton mıcırı)
4	9.55	7.26	100.00	-	93.80	100.00
2	90.19	51.86	97.44	100.00	13.70	95.67
1	79.98	9.34	93.11	9.88	1.19	84.57
0.5	51.67	2.07	56.84	99.70	-	50.97
0.25	17.96	0.11	14.06	83.53	-	12.54
0.125	0.43	-	0.24	2.80	-	0.22
% Verim	100.00	16.40	74.70	8.90	7.10	84.00
Organik Safsızlıklar (< 1.8 g/cm ³)	0.181	0.0017	0.0007	2.025	0.0015	0.0008

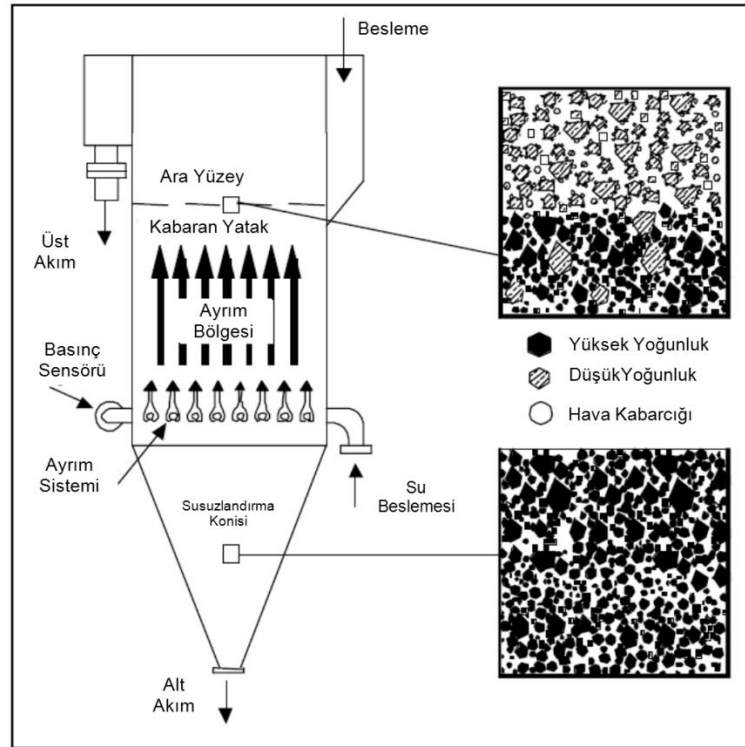
Tablodan da açıkça görüleceği üzere ürünlerdeki organik safsızlık değerleri besleme ile karşılaştırıldığında ayırım veriminin çok yüksek olduğu görülmektedir.

Ürönlere yapılan yüzdürme batırma deneyleri sonucunda ise ürönlere kaçan organik safsızlıkların oranının sadece %0.001 gibi düşük bir değör olduğu ifade edilmektedir. Beton mıcırina ait tane boyu dağılımı ise yaklaşık 2 yıllık bir üretimin ortalaması alınarak hesaplanmıştır [13].

Demir endüstrisinde Allflux sınıflandırıcının kullanıldığı bir başka alandır. Bu alanda atık sahalarından demir geri kazanımı, alümina ve silikat içerkli atıklardan hematit kazanımı gibi uygulamalar en sık rastlanan uygulamalardır.

3.2.2.4. Hydrofloat Sınıflandırıcı

Mineral endüstrisinde hidrolik sınıflandırıcıların dar tane boyu aralığı ve mineraller arasında yüksek yoğunluk farkı olması durumunda verimli çalıştıkları genel bir kabullenmedir. Geleneksel hidrolik sınıflandırıcıların daha önce bahsedilen kısıtlamaları ve sorunlarının üstesinden gelmek amacıyla HydroFloat sınıflandırıcı geliştirilmiştir (Şekil 3.10). Bu ekipman flotasyonun esnekliği ve yoğunluk farkına göre ayırımın yüksek kapasite özelliklerini bir arada bulundurmaktadır. Ekipman kapasitesi 2-5 tph/m² aralığında değişmektedir [70].



Şekil 3.10 HydroFloat Sınıflandırıcının basitleştirilmiş görünümü [70]

Çalışma esnasında besleme palpı bazı minerallerin yüzeyini hidrofobik yapmak amacıyla toplayıcı adı verilen bir kimyasal ile karıştırılır. Ardından taneler boyutları

ve yoğunlukları ile ilişkili olarak akışkan yatağa doğru çökmeye başlarlar. Akışkan yatak basınçlı hava yardımıyla sürekli olarak havalandırılır ve ayırım suyuna düşük miktarlarda köpürtücü eklenir.

Tane yüzeylerinin farklı ıslanabilirlik özellikleri nedeniyle hava kabarcıkları seçimli olarak bazı minerallerin yüzeyine yapışırlar. Hava kabarcıkları ile akışkan yatağın üst bölümüne doğru hareket eden taneler sınıflandırıcının üst akımından alınır. Hava kabarcıklarının yapışmadığı hidrofilik taneler ise yüksek katı oranlarında (~75%), sınıflandırıcının alt akımından alınırlar [70].

HydroFloat sınıflandırıcı yoğunluk farkına göre zenginleştirme yönteminin mineraller arası yoğunluk farkı olmadığı durumlarda dahi uygulanabilmesine olanak sağlamaktadır. Minerallerin yüzey özellikleri değiştirilerek değerli mineralin yan kayacından kolayca ayrılması mümkün olmaktadır. Özellikle kömür gibi doğal hidrofobik malzemelerde bu yöntem başarı ile uygulanmaktadır. Diğer bir örnekte ise, silika yüzey özellikleri değiştirilerek demir mineralinden ayrılabilir. Yüzey özelliklerini değiştirmede kullanılan kolektörler soğrulma mekanizması iyi bilinen ve köpüklü flotasyonda sürekli olarak kullanılan kimyasallardır.

HydroFloat sınıflandırıcının konvansiyonel flotasyon hücrelerine oranla bazı önemli avantajları bulunmaktadır. Akışkan yatak sisteminin kullanımı türbülansı düşürerek iri boylardaki verimi, suyun kaldırma kuvvetini, ve tanelerin çökme zamanını artırmakta, ayrıca tane köpük yapışmasını da ilerletmektedir. Ayrıca bu yeni teknoloji herhangi bir mekanik karıştırıcı içermediğinden enerji tüketimini de düşürmektedir. Daha yüksek katı oranlarında çalışma imkanı olduğundan, birim kapasite başına daha az sayıda hücre gerektirmekte bu sayede ise işletme ve bakım maliyetlerinin de düşmesine imkan sağlamaktadır.

HydroFloat sınıflandırıcının kendine özgü tasarımı konvansiyonel flotasyon hücrelerinde zenginleştirilemeyecek iri tanelerin zenginleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu özelliği kömür, potasyum ve fosfat gibi mineraller için ekonomik önem arz etmektedir. İri tanelerin veriminin artmasındaki en önemli özelliklerden biri yukarı yönlü ayırım suyunun taneleri kaldırmaya yardımcı olmasıdır. Yüksek katı içeriği ve laminar akış koşulları da hava kabarcıklarının tanelere yapışma ihtimalini arttırmaktadır [25].

Hydrofloat sınıflandırıcıda iri tanelerin zenginleştirilmesinde etkili olan en önemli parametreler;

- Kabarcık/tane çarpışma olasılıklarının artması,
- Kabarcık/tane taşınma süresinin artması,
- Kalma süresinin artması,
- Karıştırmanın azalması,
- Türbülans ve tanenin kabarcıktan kopması durumlarının azalması,
- Kaldırma kuvveti kısıtlamalarının ortadan kaldırılması,

şeklinde sıralanmaktadır [25].

Hydrofloat sınıflandırıcının farklı modellerine ait kullanım alanları, boyut ve kapasiteleri Çizelge 3.6'da verilmektedir.

Çizelge 3.6 Hydrofloat sınıflandırıcının farklı modellerine ait kullanım alanları, boyut ve kapasite değerleri [25]

Model No.	Kullanım Tipi	Boyutları (DxH)	Kapasite (t/h)
HF-150	Laboratuvar	140 x 600	0.30 - 0.45
HF-150	Laboratuvar	140 x 600	2.5 - 3.8
HF-400	Pilot	410 x 1350	3 - 5
HF-450	Pilot	460 x 1380	6 - 9
HF-600	Pilot/Endüstriyel	610 x 1380	13 - 19
HF-900	Pilot/Endüstriyel	910 x 2080	23 - 34
HF-1200	Endüstriyel	1220 x 2790	36 - 54
HF-1500	Endüstriyel	1520 x 3400	51 - 77
HF-1800	Endüstriyel	1830 x 3990	70 - 105
HF-2100	Endüstriyel	2140 x 4320	91 - 137
HF-2400	Endüstriyel	2440 x 4620	116 - 173
HF-2700	Endüstriyel	2740 x 4950	143 - 214
HF-3050	Endüstriyel	3050 x 5740	173 - 259
HF-3350	Endüstriyel	3350 x 6220	206 - 308
HF-3650	Endüstriyel	3660 x 7160	280 - 420

Günümüzde HydroFloat sınıflandırıcı geleneksel ve kolon flotasyonu yöntemiyle zenginleştirilemeyen 150-200 µm boyutundaki tanelerin zenginleştirilmesinde önemli bir ekipman haline gelmiştir. HydroFloat sınıflandırıcılar aynı zamanda flotasyon devrelerinin süpürme kısımlarında da kullanılmaktadır. Ekipmanlar devrenin atık kısmına yerleştirilmekte ve burada zor zenginleşen iri taneleri ve ara ürünleri yakalamaktadır. Yapılan laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmalar Hydrofloat sınıflandırıcının potasyum cevherinde 3 mm, sülfürlü cevherlerde ise 2 mm tane boyuna kadar zenginleştirme yaptığını göstermektedir [70]. Hydrofloat sınıflandırıcının en önemli özelliklerinden biri ise çok düşük hidrofobik yüzey alanına sahip taneleri bile zenginleştirebilmesidir.

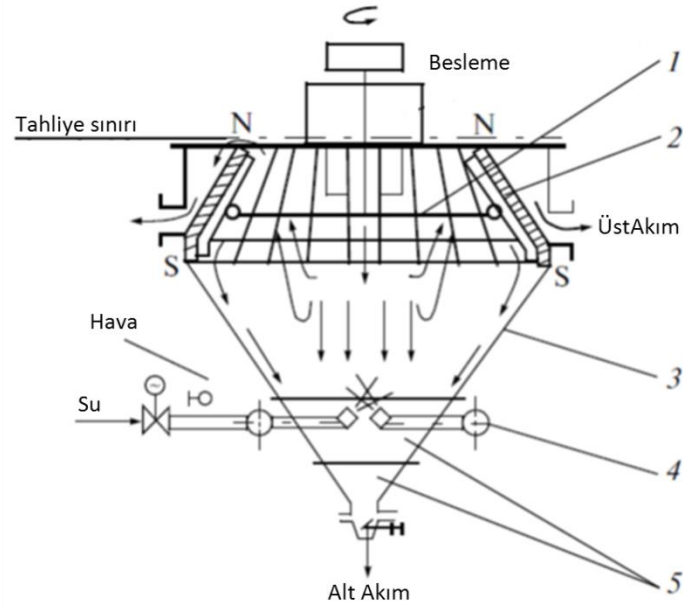
Hydrofloat sınıflandırıcının iri taneleri ve ara ürünleri zenginleştirmedeki başarısı ve flotasyon hızını arttırması gibi özellikleri ekipmanın flaş flotasyon uygulamalarında da tercih edilmesine neden olmaktadır. Bazı uygulamalardaki sonuçlar ekipmanın temiz bir atık attığını ve öğütme maliyetlerinde düşüşe neden olduğunu göstermektedir.

Geleneksel flotasyon devrelerinde beslemenin belli bir boyuta kadar öğütülmesi gerekmektedir. Ancak Hydrofloat sınıflandırıcı ile yapılan çalışmalarda beslemenin sadece tanelerin köpüğe tutunabileceği boya kadar öğütülmesinin yeterli olduğu görülmüştür [70].

3.2.2.5. Manyetik Hidroseparatör

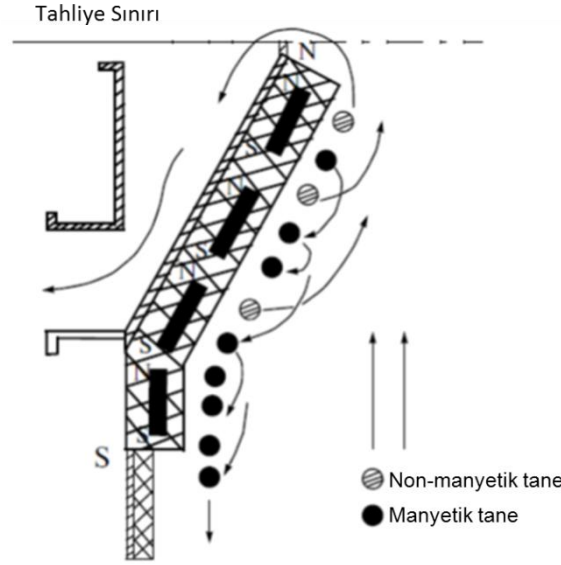
Manyetik ayırma demir cevherleri için kullanılan en yaygın yöntemdir. Ancak minerallerin manyetik alınganlıkları göz önünde bulundurulduğunda manyetik sınıflandırıcılarda yüksek verimle zenginleştirilebilecek demir cevheri manyetittir. Manyetit cevherinin içerisinde bulunan hematit cevheri ise tam olarak zenginleştirilemediği için yan kayaç ile birlikte atık bölgesine gitmektedir. Bu koşulda atığın hematit tenörü %9-12 arasında değişmektedir. Hematit cevherinin manyetik sınıflandırıcılarda zenginleştirildiği durumlarda ise bu kayıp %25-30 gibi yüksek değerlere ulaşmaktadır. Özellikle manyetit cevherlerinin giderek azaldığı günümüzde bu durum artan bir sorun teşkil etmektedir [71].

Manyetit içerisinde bulunan hematit cevherinin kazanılması amacıyla patenti Rusya ve ABD’de alınan manyetik hidroseparatörler geliştirilmiştir. Manyetik hidroseparatöre ait şematik görüntü Şekil 3.11’de verilmektedir.



Şekil 3.11 Manyetik hidroseparatora ait şematik görünüm

Manyetik hidroseparator yukarı yönlü su hızına sahip bir tekneden (3) oluşmaktadır. Tekne içerisinde değişken hızlı bir karıştırma ünitesi (1) de mevcuttur. Karıştırma ünitesi tekne içerisine dairesel olarak yerleştirilmiş olan elektromıknatısların (2) yüzeyine temas edebilecek şekilde konumlandırılmıştır. Ekipmanın alt akım çıkışı (5) bir koni şeklinde tasarlanmıştır. Yukarı yönlü su, hava ya da su/hava karışımı da (4) bu bölgeden yapılmaktadır. Manyetik hidroseparator silisli cevherleri yukarı yönlü su ve hava kabarcıkları ile demir içerikli palptan ayırır ve sistemden tahliye eder. Çoğunlukla manyetit, hematit ve silis içeren ve farklı yoğunluk ve tane boyu özelliklerine sahip ferro besleme palpı ekipmanın üst bölgesinden beslenmektedir. Besleme malzemesi yerçekimi etkisi ile ekipman içerisinde aşağı yönde çökmeye başlar. Çökme esnasında yukarı yönlü suya maruz kalan manyetit, hematit ve silis taneleri ferro besleme palpından ayrılarak yukarı yönlü suyun etkisiyle tahliye bölgesine doğru ilerlerler. Manyetit ve hematit taneleri bu bölgede tahliye sınırının altında yer alan elektromıknatıslar tarafından tutularak alt akım bölgesine doğru hareket ederler. Silisli taneler ise tahliye sınırını aşarak ekipmanı üst akımdan terk eder. Elektromıknatıslarda biriken manyetik özellikli taneler ise karıştırıcı tarafından mıknatısların yüzeyinden temizlenir ve alt akıma gönderilir. Manyetik hidroseparatorün ayırım mekanizması Şekil 3.12’de verilmektedir.



Şekil 3.12 Manyetik hidroseparatordeki ayırma mekanizmasının gösterimi

Manyetik hidroseparatorde hidrosiklonlar ve eleklerin aksine ayırma manyetik hassasiyet farklılığına dayalı olarak gerçekleştirilmektedir. Ayırma verimi elektromıknatıs özelliklerine, yıkama suyu özelliklerine ve karıştırma özelliklerine bağlıdır.

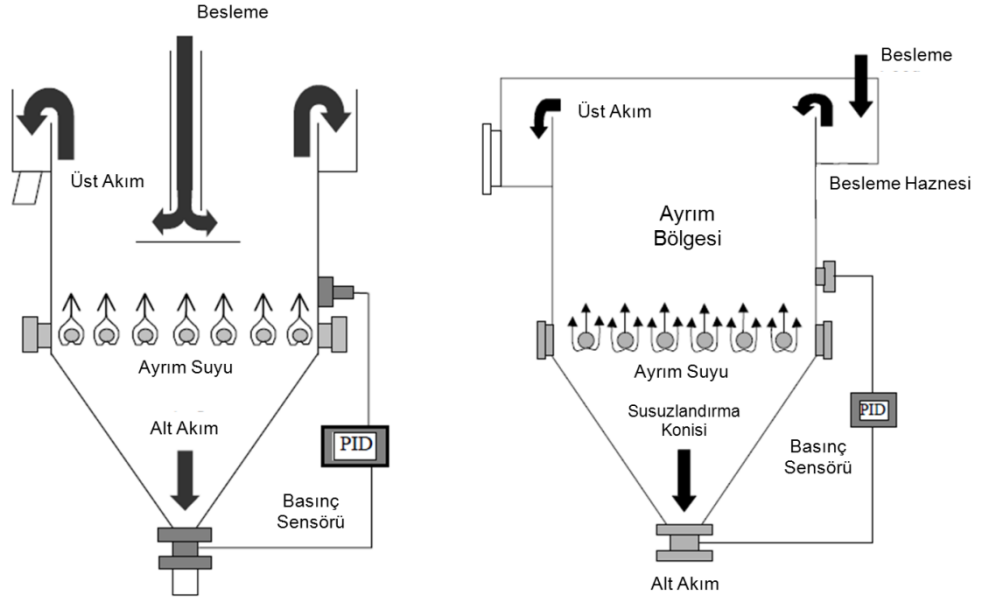
Manyetik hidroseparatorlar genellikle takonit ve demir cevherlerinde özellikle ince atıkların zenginleştirilmesinde yüksek verim değerlerinde kullanılmaktadır. Manyetik alınganlığa sahip tanelerin alt akıma yönlendirilmesinde güçlü elektromıknatıslar kullanılmaktadır. Mıknatıslar sayesinde malzeme üzerinde oluşan manyetik alan palpy karıştırmakta ve manyetik alınganlığa sahip taneleri hareketlendirmektedir. Ekipman ile yapılan laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar sonucunda 0.003 Tesla (30 Gauss) değerindeki bir manyetik alan şiddeti ile demir kaçağı çok büyük ölçüde engellenmektedir [72].

Ekipmanın en önemli özelliklerinden bir tanesi ise düşük manyetik hassasiyete sahip ara ürün olarak adlandırılan malzemeleri ayırarak bir temizleme devresi gibi davranmasıdır [71].

3.2.2.6. Crossflow Sınıflandırıcı (Çapraz Akışlı Sınıflandırıcı)

Geleneksel kabaran yataklı sınıflandırıcıların verimsizliklerini gidermek için geliştirilen en yeni hidrolik sınıflandırıcıdır. Ekipman Kohmuench (2000) tarafından geliştirilmiştir [59]. Bu ekipman özel besleme sistemi sayesinde ince tane boyutlu yoğunluğu yüksek tanelerin üst akıma kaçacağını önemli ölçüde azaltmaktadır.

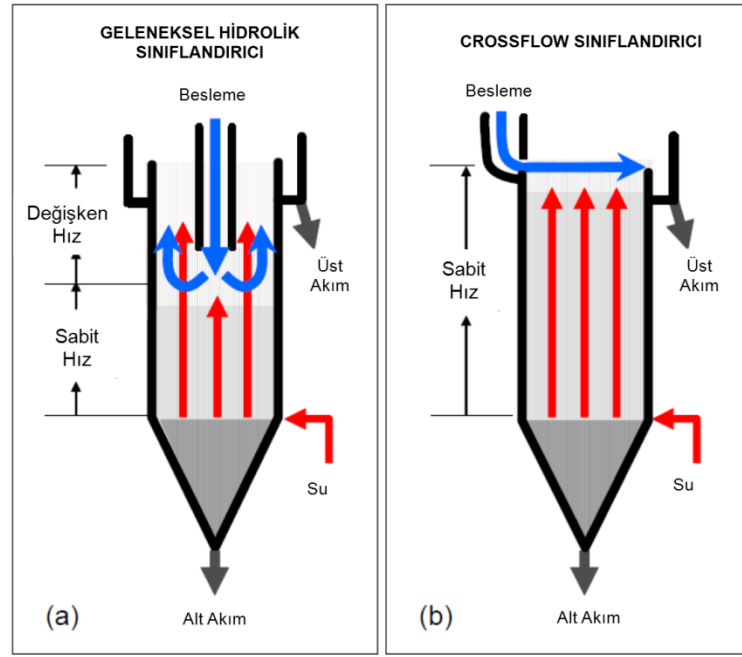
Geleneksel kabaran yataklı sınıflandırıcılar ile Crossflow sınıflandırıcıların karşılaştırmalı şematik görünümü Şekil 3.13'te verilmektedir.



Şekil 3.13 Geleneksel kabaran yataklı sınıflandırıcı (solda) ve Crossflow sınıflandırıcısının (sağda) karşılaştırılması [59]

Crossflow sınıflandırıcıları klasik sınıflandırıcılardan ayıran en önemli özellik besleme sistemidir. Besleme yüksek hızlarla yatağa yapılmak yerine sınıflandırıcının üst kısmına yapılmaktadır. Bu besleme şekli besleme palpının hızını düşürmekte ve türbülanslı akış koşullarının asgari düzeye indirilmesine olanak sağlamaktadır.

Klasik yöntemlerle karşılaştırıldığında besleme haznesinin kullanımı besleme özelliklerindeki ani değişimlerin sınıflandırıcı performansını olumsuz etkilemesini önlemektedir. Crossflow sınıflandırıcılarda ayırım suyu ayırım bölgesinde her zaman sabit kalmaktadır. Geliştirilen besleme sistemi sayesinde besleme palpı içerisindeki su üst akıma doğrudan hareket etmekte ve bu sayede yatak içerisindeki ayırım suyu miktarının artması önlenmektedir [59]. Bu durumun ekipman kapasitesi ve verimini arttırdığı yapılan deneysel çalışmalarla da desteklenmektedir [73]. Klasik sınıflandırıcılarda ise su hızı besleme bölgesinin üzerinde artış göstererek yoğunluğu yüksek ince tanelerin üst akıma kaçmasına neden olmaktadır. Bu durum Şekil 3.14'te verilmektedir.



Şekil 3.14 Geleneksel hidrolik sınıflandırıcı (a) ve Crossflow sınıflandırıcıda (b) su hızlarının karşılaştırılması

Crossflow sınıflandırıcıda ayrıca besleme haznesinin çıkışına eklenen bir bariyer ile beslemenin üst akıma kaçak yapması da engellenmektedir.

Crossflow sınıflandırıcılarda kullanılan bir başka yenilik ise yıkama suyu dağıtım sistemidir. Ayrım suyunun sınıflandırıcı boyunca dağıtılması için bölme plakası kullanılmaktadır. Bu tasarımda yatay bir plaka ayırım bölgesinin tabanına yerleştirilmiştir. Su sisteme plakanın altından ve 1.25 cm'den büyük deliklerden beslenmektedir. Klasik sınıflandırıcıların aksine bu delikler uzun aralıklarla yerleştirilmektedir (> 15 cm). Bu sistem borulardaki tıkanma problemlerini ortadan kaldırmaktadır. Besleme ve su dağıtım sistemlerinde yapılan bu değişiklikler ile sınıflandırıcının verim ve kapasite değerlerinde artış sağlanmaktadır. Ekipman kapasitesi 3-9 tph/m² değerlerindedir. Günümüzde Crossflow sınıflandırıcılar kömür yıkama ve cevher zenginleştirme işlemlerinde kullanılmaktadır. Ekipmanın besleme boyut aralığı 0.2-4 mm arasında değişmektedir [37].

Literatür araştırmalarında adı geçen yüksek verimli hidrolik sınıflandırıcıların genel özellikleri, işletim ve tasarım parametreleri, öne çıkan özellikleri ve kullanım alanları gibi özet bilgiler Çizelge 3.7'de verilmektedir.

Çizelge 3.7 Yüksek verimli hidrolik sınıflandırıcılar hakkında özet bilgiler [12]

Hidrolik sınıflandırıcı	Tasarım Parametreleri	İşletim Parametreleri	Öne çıkan Özellikleri	Kullanım Alanları
Floatex Sınıflandırıcı	Konik silindirik kısmın yüksekliği, besleme dağıtıcısının yüksekliği, su besleme delikleri arasındaki mesafe, su besleme deliklerinin dizilimi.	Yıkama suyu akış hızı, basınç set noktası, besleme tane boyu ve yoğunluk dağılımı, besleme palp yoğunluğu, besleme katı miktarı.	Kullanım kolaylığı, PID tabanlı basınç kontrolü, konik alt akım, kare şeklindeki ayırım bölgesi, yoğunluk ölçüm ve alt akım otomatik vana sistemleri.	Plaser mineraller, kuvars kumu, kömür, kromit, demir, manganez, elektronik atıklar, fosfat cevherleri.
Reflux Sınıflandırıcı	Plaka eğimi, yüksekliği, ve uzunluğu, kolon yüksekliği, konik ve silindirik kısmın yüksekliği, konik kısmın açısı, besleme noktası.	Yıkama suyu akış hızı, yatak yoğunluğu, besleme hızı, besleme palp yoğunluğu, besleme tane boyu dağılımı.	İri boylarda yüksek verim, besleme suyunun borularla dağıtılması, yoğunluk ölçüm ve alt akım otomatik vana sistemleri.	Ağır mineraller, kömür, hematit, agrega.
Allflux Sınıflandırıcı	İkiz bölgelerin konik ve silindirik kısımlarının yüksekliği	Yıkama suyu akış hızı, yatak yoğunluğu, besleme hızı, besleme palp yoğunluğu, besleme tane boyu dağılımı.	Yüksek kapasite, dairesel ayırım bölgesi, yoğunluk ölçüm ve alt akım otomatik vana sistemleri.	Kömür, demir, endüstriyel mineraller, cüruf işleme, plastik.
Crossflow Sınıflandırıcı	Konik silindirik kısmın yüksekliği, besleme sistemi	Yıkama suyu akış hızı, yatak yoğunluğu, besleme hızı, besleme palp yoğunluğu, besleme tane boyu dağılımı.	Modifiye edilmiş besleme sistemi, su dağıtım sistemi, yoğunluk ölçüm ve alt akım otomatik vana sistemleri.	Barit, kömür hematit.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

Bu bölümde kuvars kumu, manyetit konsantresi ve ağırlıkça %50-50 oranında hazırlanan yapay karışım numunesine uygulanan çalışmalara yer verilmektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan kuvars ve manyetit numuneleri ilk olarak malzeme karakterizasyon çalışmalarına tabi tutulmuş, ardından ise laboratuvar ölçekli 10x10 cm çapındaki kabaran yataklı sınıflandırıcı (Crossflow Sınıflandırıcı) ile farklı su hızı ve basınç değerlerinde sınıflandırmaya tabi tutulmuştur. Her bir koşulda devre etrafından alınan numunelerin tane boyu dağılımı, % katı içeriği ve palp yoğunluğu belirlenmiştir.

Elde edilen veriler ışığında tüm numuneler ve koşullar için ekipmanın alt akım miktarı, kesme boyu, verimsizliği, kaçak miktarı ve ayırım keskinliği belirlenerek ekipman performansı değerlendirilmiştir. Yapay karışım numunesi (%50 kuvars+%50 manyetit) ile yapılan çalışmalarda ek olarak her bir koşuldaki demir tenörleri belirlenerek işletim parametrelerinin tenör ve verim üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

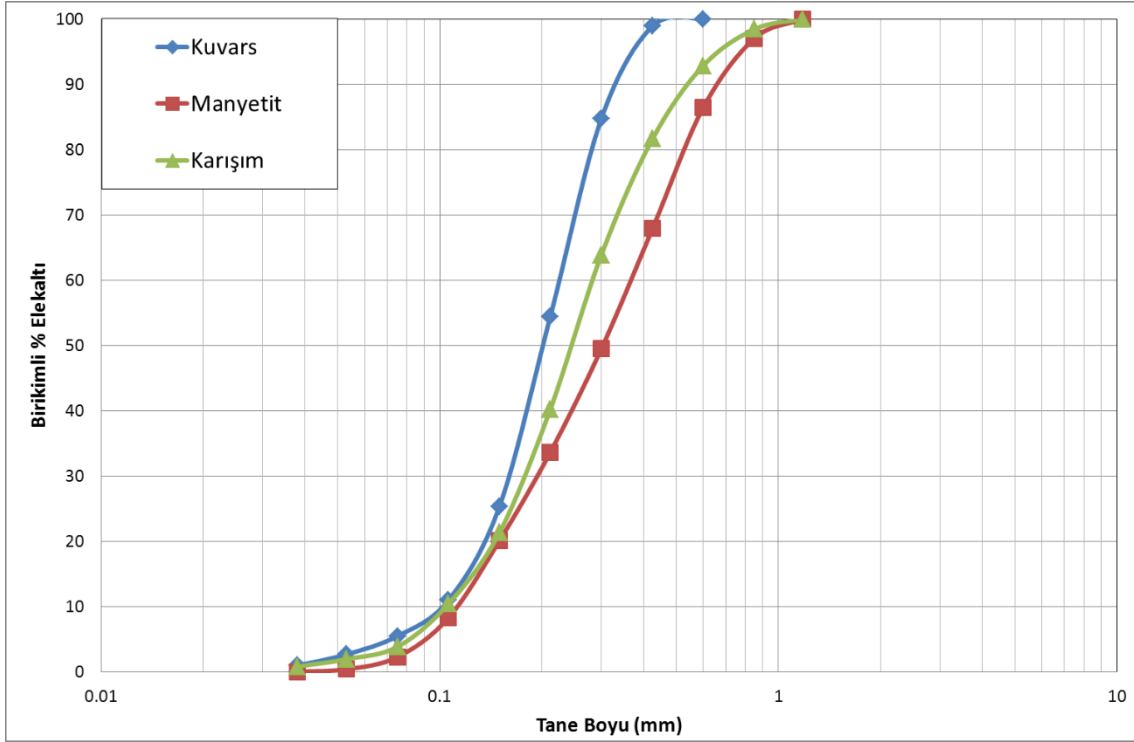
Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen kesme boyu değerleri ile literatürde geçerli olan ve bir önceki bölümde verilen engelli çökelme eşitliklerinden elde edilen kesme boyları kullanılarak deneysel ve literatür verileri kıyaslanmış ve tartışılmıştır.

4.1. Malzeme Karakterizasyon Çalışmaları

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan kuvars kumu ve manyetit konsantresine ait karakterizasyon çalışmaları verilmektedir. Karakterizasyon çalışmalarında kullanılmak üzere temsili şekilde hazırlanan numuneler sırasıyla tane boyu analizi, yoğunluk, kimyasal analiz ve XRD (X-Ray Diffraction) yöntemi kullanılarak mineralojik analize tabi tutulmuştur.

4.1.1. Tane Boyu Dağılımı Belirleme Çalışmaları

Deneysel çalışmalarda besleme malzemesi olarak kullanılan kuvars kumu, manyetit konsantresi ve yapay karışım numunelerinin tane boyu dağılımları en iri boydan 38 µm'a kadar yaş elek analizi yöntemi ile belirlenmiştir. Beslemelere ait tane boyu dağılımları Şekil 4.1'de verilmektedir.

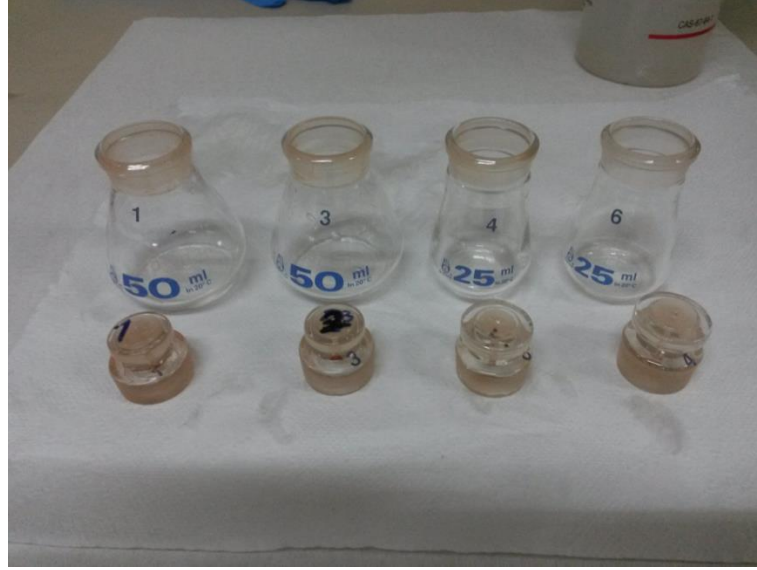


Şekil 4.1 Deneyisel çalışmalarda kullanılan besleme malzemelerine ait tane boyu dağılımları

Şekil 4.1'den de görüleceği üzere deneyisel çalışmalarda kullanılan malzemelerden en ince boyut dağılımına sahip olan kuvars kumu (d_{80} 0.286 mm), en iri boyut dağılımına sahip olan ise manyetit konsantresidir (d_{80} 0.539 mm). Bu iki cevherin eşit miktarlarda karıştırılması ile elde edilen karışım cevherinin tane boyu dağılımı (d_{80} 0.413 mm) ise iki cevherin ortalaması şeklinde görülmektedir.

4.1.2. Yoğunluk Belirleme Çalışmaları

Deneysel çalışmalarda kullanılacak malzemelerin yoğunlukları piknometre yöntemi ile belirlenmiştir. Yoğunluk belirleme çalışmaları deneylerde kullanılacak olan kuvars ve manyetit cevherlerinin saflıkları konusunda önemli bir bilgi sunmaktadır. Literatürde kuvars cevherinin yoğunluğu 2.65 g/cm^3 , manyetit cevherinin yoğunluğu ise $5.1\text{-}5.2 \text{ g/cm}^3$ olarak verilmektedir [74]. Yoğunluk belirleme çalışmaları sırasında kullanılan piknometreler Şekil 4.2'de, 4 tekrarlı ölçüm sonucunda elde edilen ortalama yoğunluk değerleri ise Çizelge 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.2 Yoğunluk belirleme çalışmalarında kullanılan piknometreler

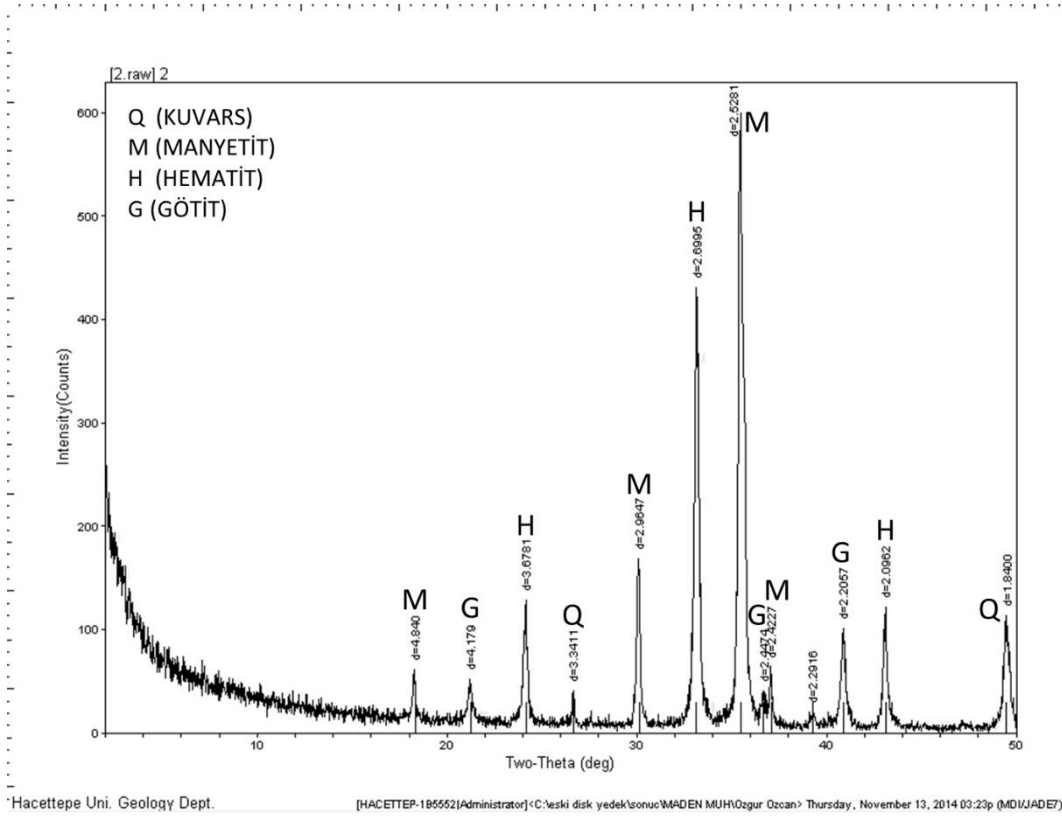
Çizelge 4.1 Kuvars ve manyetit konsantrelerine ait yoğunluk değerleri

Ölçüm	Kuvars Kumu (g/cm ³)	Manyetit Konsantresi (g/cm ³)	Yapay Karışım (g/cm ³)
1	2.63	4.90	3,78
2	2.64	4.95	3,77
3	2.65	4.90	3,76
4	2.65	4.95	3,78
Ortalama	2.64	4.93	3,77

Yoğunluk belirleme çalışmaları sonucunda kuvars numunesinin yoğunluğu 2.64 g/cm³, manyetit numunesinin yoğunluğu 4.93 g/cm³, karışım numunesinin yoğunluğu ise 3.77 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar kuvars numunesinin saf olduğunu ancak demir konsantresi içerisinde bir miktar safsızlık bulunabileceğini göstermektedir.

4.1.3. Kimyasal Analiz Çalışmaları

Besleme malzemelerinden manyetit numunesi için titrasyon yöntemi ile kimyasal analiz yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda manyetit numunesinin demir içeriği % 68.2 olarak belirlenmiştir. Manyetit cevherinin teorik demir içeriği ise %72.36'dır [74].



Şekil 4.4 Manyetit numunesine ait XRD deseni

Kuvars numunesine ait XRD deseni incelendiğinde malzemenin saf kuvars (Q) olduğu görülmektedir. Manyetit numunesine ait XRD deseni incelendiğinde ise numune içerisinde demir cevherleri olan manyetit (M), hematit (H) ve götit (G) ayrıca bir miktarda kuvars (Q) numunesi olduğu görülmektedir.

4.2. Kayma Hızı Hesaplamaları

Homojen bir palp içeriğinde askıda kalan tanelerin hızları kayma hızı kavramı ile açıklanmaktadır. Kayma hızı, tanenin çökme hızı (U_t) ile palp içerisinden geçen suyun hızı (U_f) arasındaki ilişkiye bağlıdır.

Bir taneye ait kayma hızı kendisini oluşturan üç bileşene ayrılabilir. Bunlardan ilki tanenin terminal çökme hızı, ikincisi taneler arası mesafe ve üçüncüsü de palp yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır. Bu bileşenlerin hesaplanmasına yönelik çalışmalar alt başlıklar altında verilmektedir.

4.2.1 Terminal Çökme Hızının Hesaplanması

Tanelerin terminal çökme hızını hesaplamaya yönelik eşitlikler 2. bölümde detaylı şekilde verilmiştir. Tanelerin terminal çökme hızları bu eşitlikler dışında deneysel

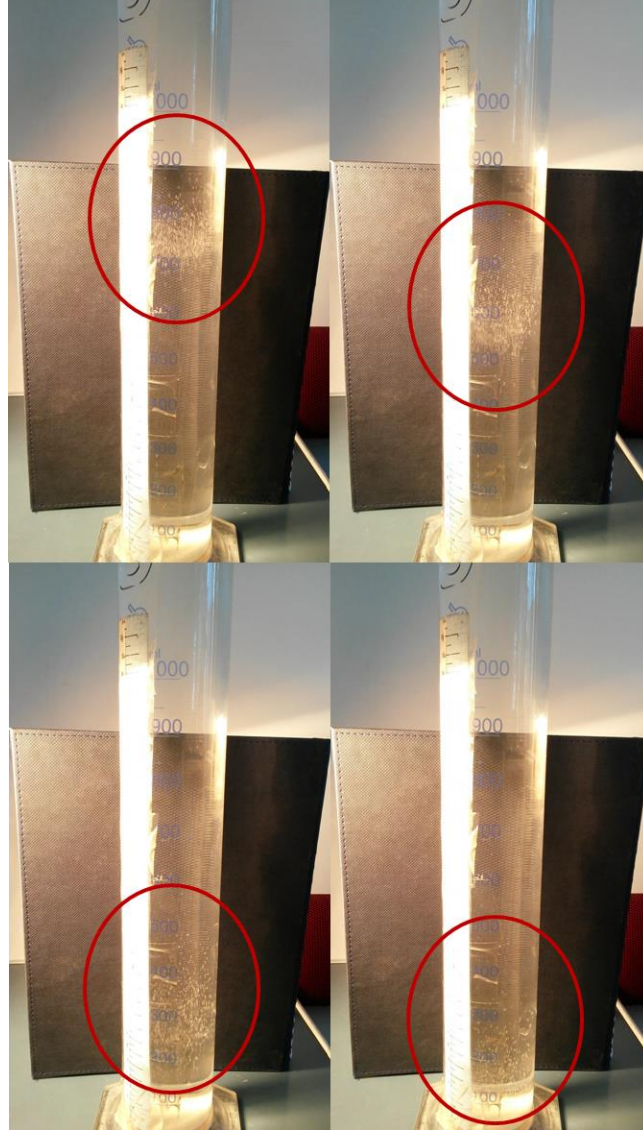
yöntemlerle de hesaplanabilmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda kullanılacak olan kuvars kumu ve manyetit konsantresinin serbest çökme koşulları altındaki terminal çökme hızları hem serbest çökme eşitlikleri kullanılarak hem de deneysel yöntemler yardımıyla hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Terminal çökme hızının deneysel yöntemlerle hesaplanması amacıyla kuvars numunesi ve manyetit konsantresi elek analizi fraksiyonları ile aynı fraksiyonlarda hazırlanmıştır (Çizelge 4.2). Hazırlanan fraksiyonlar ise katı içeriği ağırlıkça % 10'u geçemeyecek şekilde serbest çökmeye bırakılmıştır. Bu amaçla hazırlanan deney düzeneği Şekil 4.5'te verilmektedir.



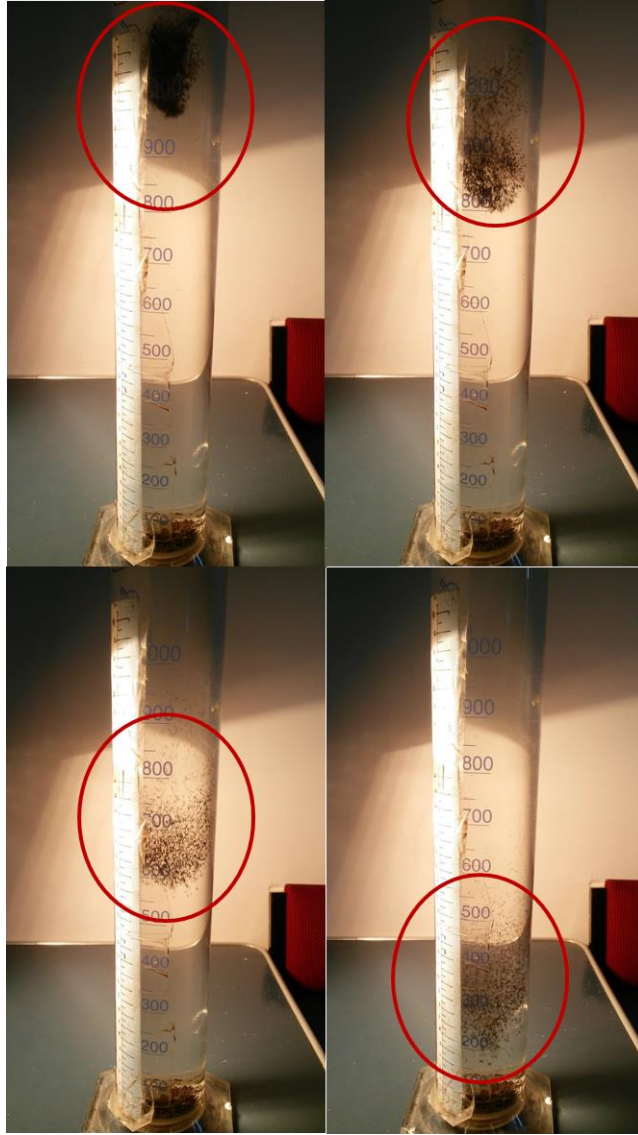
Şekil 4.5 Terminal çökme hızı hesaplamalarında kullanılan deney düzeneği

Şekil 4.5'ten de görüleceği üzere üzerine milimetrik kağıt yapıştırılan mezür çökme kabı olarak kullanılmıştır. Tane boyu fraksiyonlarının zaman ile yer değiştirmesi ise yüksek çözünürlüklü bir kamera ile kaydedilmiştir. Kaydedilen görüntüler daha sonra bir bilgisayar programı yardımıyla salise bazında incelenmiş ve çıplak gözle fark edilemeyecek kısa sürelerdeki hareket bu sayede rahatlıkla gözlenmiştir. Programın kullanılması özellikle yoğunluğu 4.93 g/cm^3 olan manyetit cevherinin terminal çökme hızının hesaplanmasında büyük bir yarar sağlamıştır. Her iki cevhere ait tane boyu fraksiyonlarının program görüntüleri sırasıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de, kuvars numunesi ve manyetit konsantresinin elek analizi fraksiyonlarına ait çökme

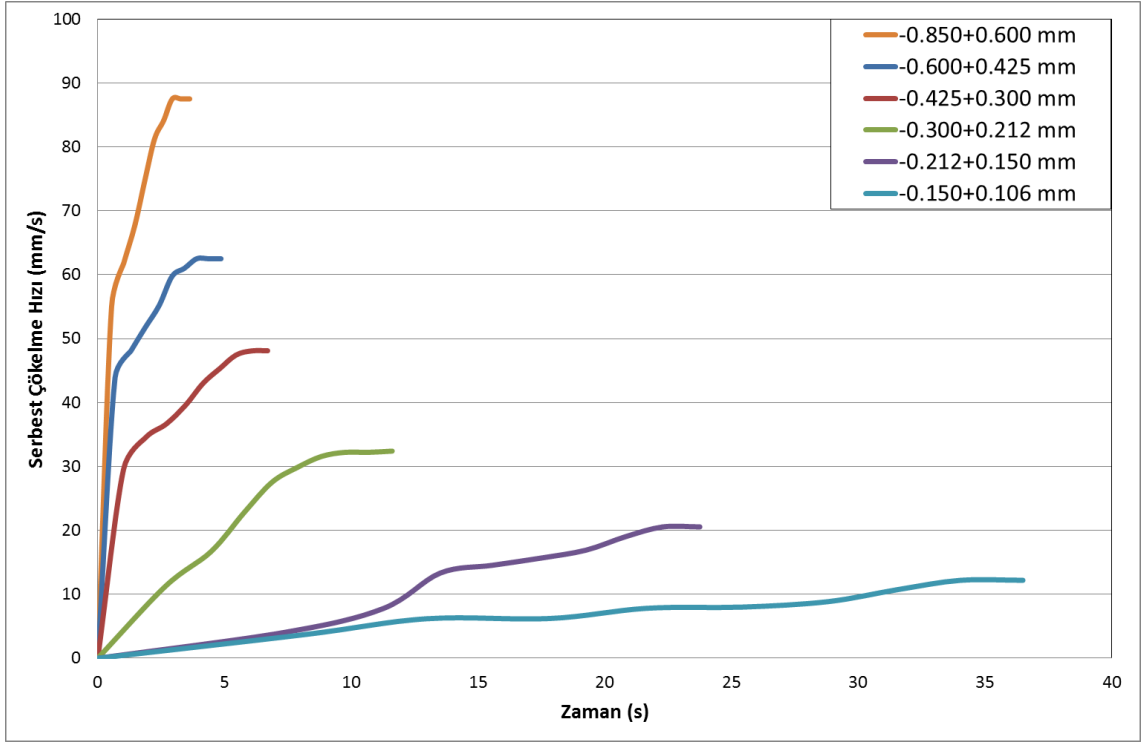
hızı grafikleri ise sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da, tane boyu fraksiyonlarına ait terminal çökeltme hızları ise Çizelge 4.2'de verilmektedir.



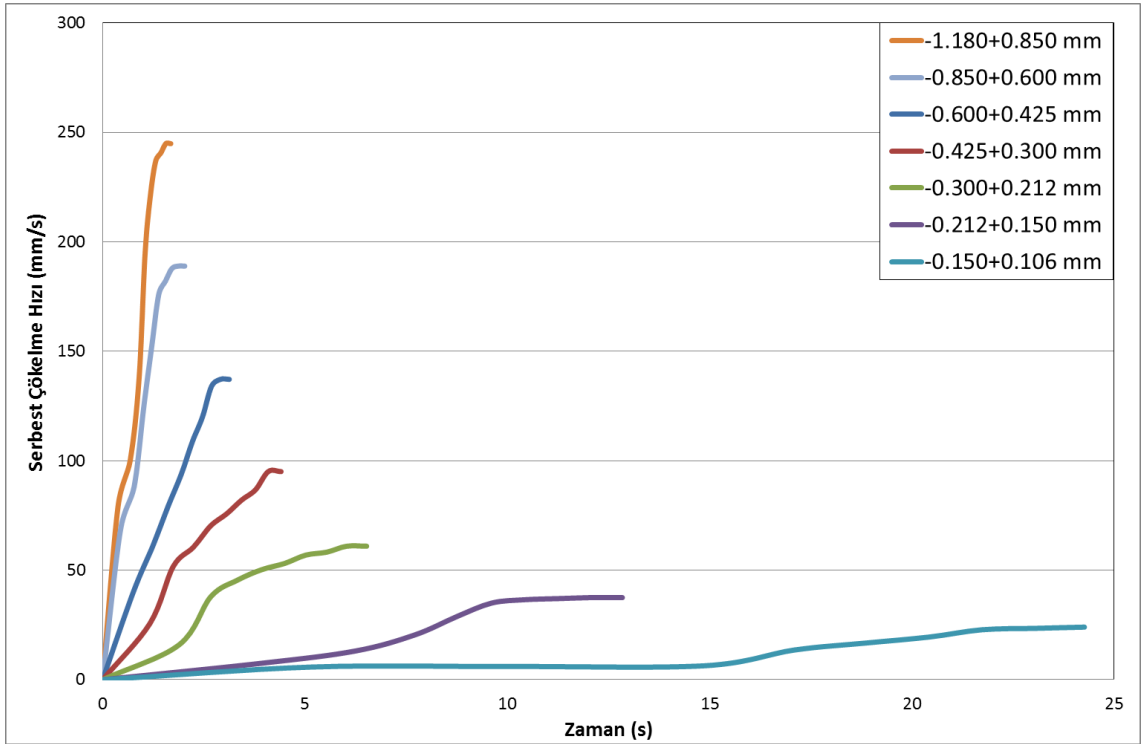
Şekil 4.6 Kuvars cevherine ait serbest çökeltme görüntüleri



Şekil 4.7 Manyetit konsantresine ait serbest çökeltme görüntüleri



Şekil 4.8 Kuvarts numunesine ait serbest çökme hızları

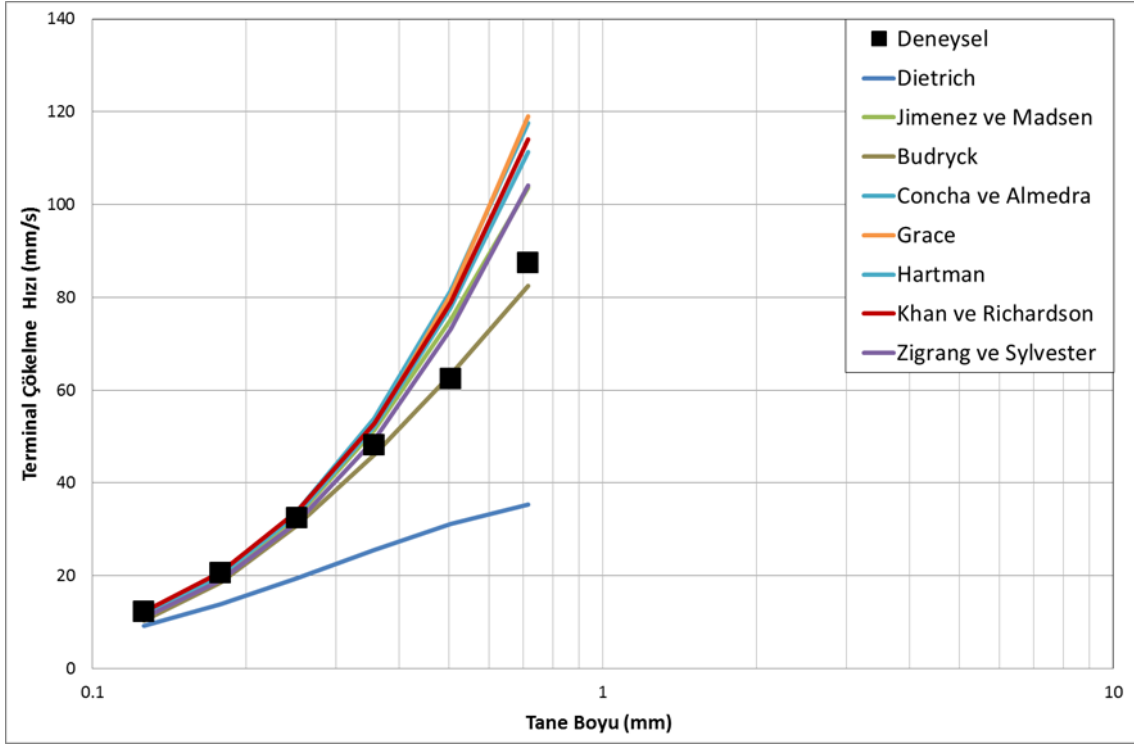


Şekil 4.9 Manyetit numunesine ait serbest çökme hızları

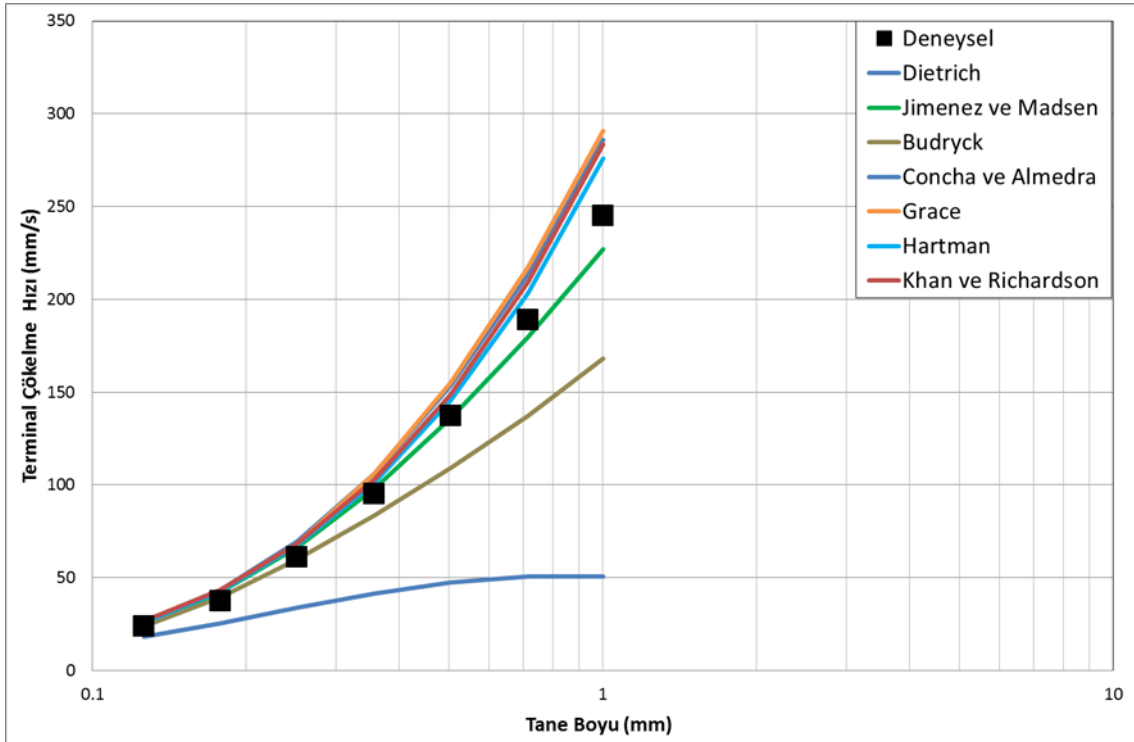
Çizelge 4.2 Kuvars ve manyetit numunelerine ait terminal çökme hızları

		KUVERS	MANYETİT
Tane Boyu Fraksiyonu (mm)	Geometrik Ortalama (mm)	Terminal Çökme Hızı (mm/s)	Terminal Çökme Hızı (mm/s)
-1,180+0.850	1.001	-	244.87
-0,850+0.600	0.714	87.50	188.93
-0,600+0.425	0.505	62.50	137.20
-0,425+0.300	0.357	48.10	95.08
-0,300+0.212	0.252	32.41	60.97
-0,212+0.150	0.178	20.55	37.50
-0,150+0.106	0.126	12.20	24.02

Deneysel çalışmalar sonucu hesaplanan terminal çökme hızları ile literatürdeki eşitlikler kullanılarak hesaplanan terminal çökme hızlarının karşılaştırılması kuvars numunesi ve manyetit konsantresi için sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmektedir. Deneysel çalışmalar sonucunda hesaplanan terminal çökme hızları ile geçiş (transisyonel akış) bölgesi için literatürde verilen eşitlikler ile hesaplanan terminal çökme hızlarının incelenmesi sonucunda özellikle ince boyut aralıklarındaki hızların birbirine çok yakın olduğu ancak tane boyu irileştikçe deneysel verilerin hesaplanan verilere göre daha düşük değerler almaya başladığı gözlenmiştir. Bu durumun nedeninin ise eşitliklerdeki hızların küresel taneler için hesaplanmış olması düşünülmektedir. Tane boyu inceldikçe taneler “n” yüzlü bir prizma şeklini almaktadır. Tane boyunun incelmesi n değerini arttırmakta ve taneleri küresel kabul edilebilir değerlere yaklaştırmaktadır. Ancak irileşen tane boyu sonucunda n değeri azalmakta ve taneler küresellikten uzaklaşmaktadır.



Şekil 4.10 Kuvars numunesine ait deneysel ve hesaplanan serbest çökme hızlarının karşılaştırılması ($d_{katı} : 2.64 \text{ g/cm}^3$).



Şekil 4.11 Manyetit konsantresine ait deneysel ve hesaplanan serbest çökme hızlarının karşılaştırılması ($d_{katı} : 4.93 \text{ g/cm}^3$).

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 incelendiğinde kuvars kumunun terminal çökelme hızı Budryck eşitliği ile manyetit konsantresinin çökelme hızı ise Jimenez ve Madsen eşitliği ile tüm boyut fraksiyonlarında uyumludur. Bu nedenle fraksiyonların Reynold sayılarının ve ardından kayma hızlarının hesaplanmasında deneysel çalışmalar sonucu elde edilen terminal çökelme hızları kullanılmıştır.

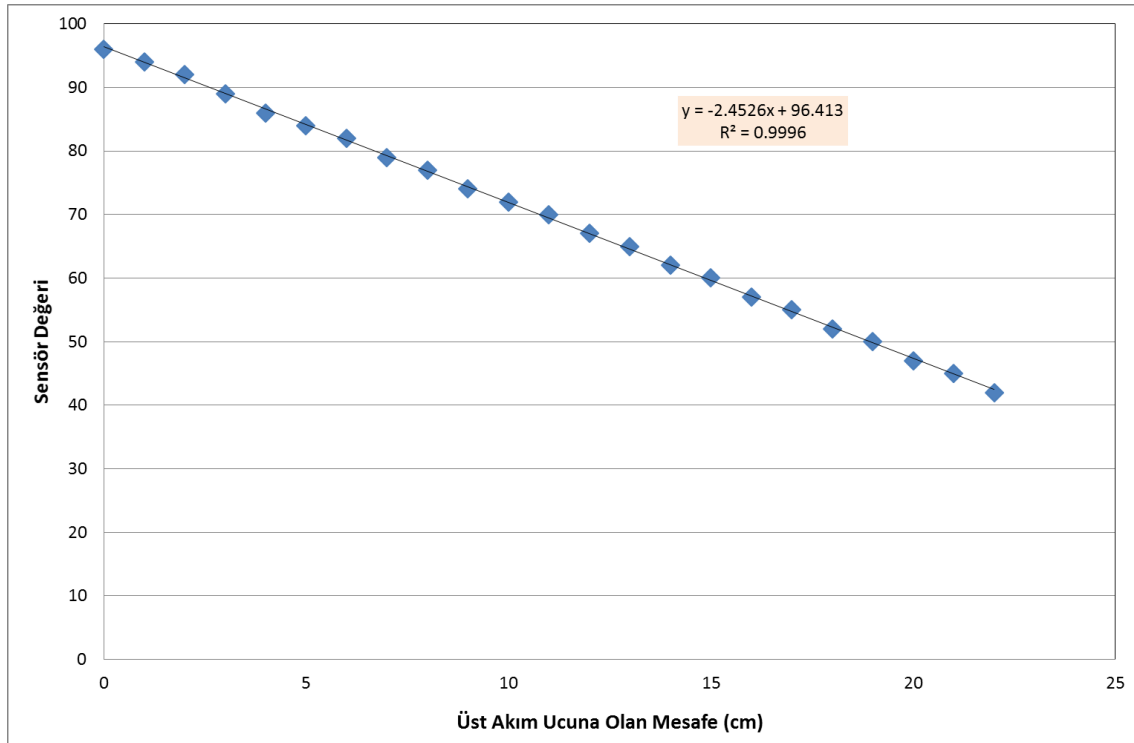
4.2.2 Ortalama Palp Yoğunluğunun Hesaplanması

Ortalama palp yoğunluğu hesaplamalarında Eşitlik 2.61 kullanılmıştır. Eşitliğe göre ortalama palp yoğunluğunun belirlenebilmesi için ekipman yalnızca su ile dolu iken ve deneysel çalışmalar sırasındaki koşullarda okuyacağı basınç değeri kPa cinsinden gerekmektedir.

Kabaran yataklı sınıflandırıcı yalnızca su ile doldurulduğunda kontrol paneli üzerinden 100 değeri okunmuştur. Ancak bu değer birimsiz olması okunan değer basınç cinsinden biriminin bulunması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Sıvı basıncı, hesaplanacak noktanın derinliği, sıvının özkütlesi ve yerçekimi ivmesine bağlıdır. Sıvıların basıncı içlerinde bulundukları kabın şeklinden ise bağımsızdır. Bu prensiplerden yola çıkılarak kabaran yataklı sınıflandırıcının kontrol panelinde okunan birimsiz değer kPa cinsinden hesaplanmıştır. Hesaplama basamakları ise aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.

Sensör ve üst akım arası yükseklik (m)	:	0.4
Ekipman yalnızca su ile dolu iken sensör değeri	:	100
Sıvının özkütlesi (t/m^3)	:	1000
Yerçekimi İvmesi (m/s^2)	:	9.81
Basınç (kPa)	:	3.924

Kontrol paneli üzerinde okunan tüm değerlerinde basınç olarak hesaplanabilmesi için kabaran yataklı sınıflandırıcı tamamen su ile doldurulduktan sonra alt akım vanasının sızıntı yapması sağlanmış ve su sütunu yüksekliğindeki düşüş ile kontrol paneli üzerinde okunan birimsiz basınç değerindeki değişimler takip edilmiştir. Su sütununun değişimi ile sensör değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.12’de verilmektedir.



Şekil 4.12 Su sütunu yüksekliğine bağlı olarak sensör değerlerinin değişimi

Şekil 4.12’den de anlaşılabacağı üzere ekipman içerisindeki su yüksekliği ve sensör değeri arasında doğrusal bir ilişki mevcuttur ($R^2 = 0.999$). Yapılan hesaplamalarda su yüksekliğindeki her 2 cm düşüşte sensör değerinin 5 birim azaldığı görülmüştür. Bu nedenle su yüksekliğinin her 2 cm düşüşü sonucu oluşan yeni basınç değerleri kPa cinsinden hesaplanarak sensör değerleri ile ilişkilendirilmiştir. Sensör değerlerinin karşılık geldiği basınç değerleri ise Çizelge 4.3’te verilmektedir.

Çizelge 4.3 Kabaran yataklı sınıflandırıcıda ölçülen sensör set değerlerinin karşılık gelen basınç değerleri

Sensör Set Değeri	Basınç (kPa)
190	7.456
180	7.063
170	6.671
160	6.278
150	5.886
140	5.494
130	5.101
120	4.709
110	4.316
100	3.924

Yapılan hesaplamalar sonucunda farklı yatak yükseklikleri için öngörülen ortalama palp yoğunlukları Çizelge 4.4'te verilmektedir.

Çizelge 4.4 Faklı yatak yükseklikleri için hesaplanan ortalama palp yoğunlukları

Sensör Set Değeri	Basınç (kPa)	Yatak içi Ortalama Palp Yoğunluğu (kg/m³)
190	7.456	1900
180	7.063	1800
170	6.671	1700
160	6.278	1600
150	5.886	1500
140	5.494	1400
130	5.101	1300
120	4.709	1200
110	4.316	1100
100	3.924	1000

4.2.3. Yatak Boşluk Oranının Belirlenmesi

Yatak boşluğu kabaran yataklı sınıflandırıcıların içerisindeki suyun kapladığı hacimi ifade etmektedir. Yatak boşluk oranı sınıflandırıcının eksen boyuna değişiklik göstermektedir. Palp yoğunluğu tabanda en yüksek değerini alırken eksen boyunca tabandan uzaklaştıkça düşmektedir. Dolayısıyla yatak boşluğu tabanda en düşük değerini almakta ve eksen boyunca yükseldikçe artmaktadır.

Kuvars numunesi ve manyetit konsantresi için gerekli yatak boşluk oranları Eşitlik 2.58 kullanılarak hesaplanmıştır. Kuvars kumu ve manyetit konsantresi için hesaplanan yatak boşluk oranları Çizelge 4.5'te verilmektedir.

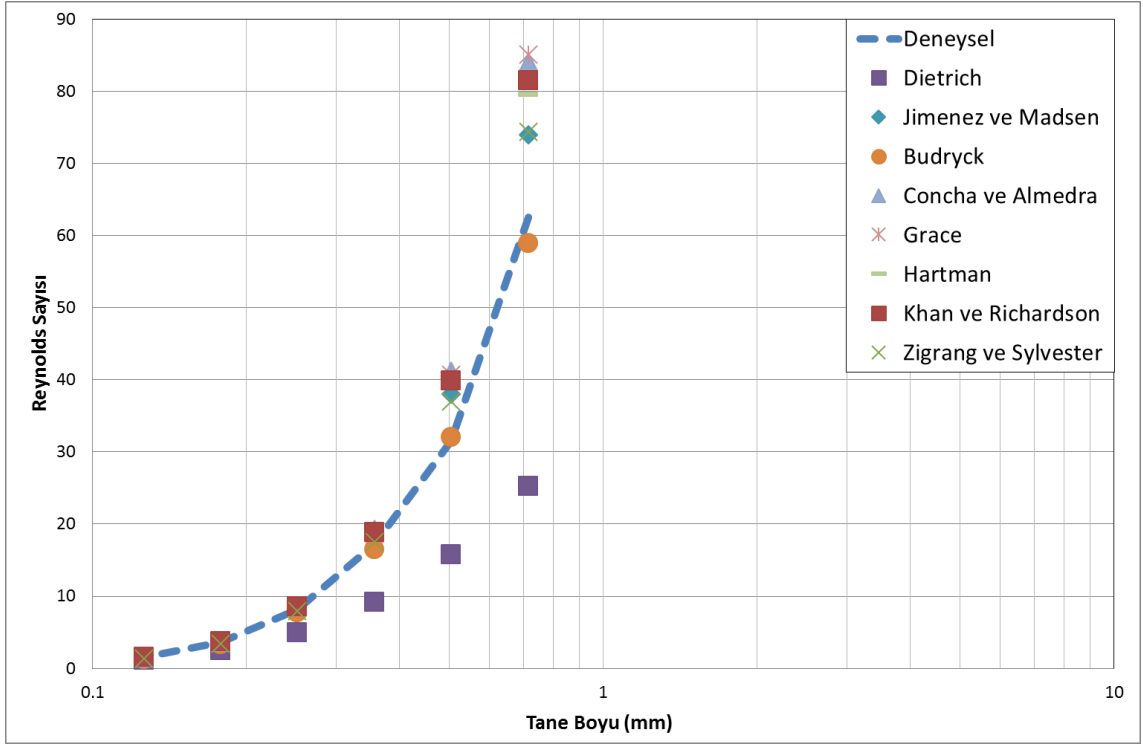
Çizelge 4.5 Kuvars kumu ve manyetit konsantresine ait hesaplanan yatak boşluk oranları

Sensör Set Değeri	Basınç (kPa)	Yatak Boşluk Oranı	
		Kuvars	Manyetit
100	3.924	1.000	1.000
110	4.316	0.939	0.976
120	4.709	0.878	0.951
130	5.101	0.817	0.927
140	5.494	0.756	0.903
150	5.886	0.695	0.879
160	6.278	0.634	0.854
170	6.671	0.573	0.83
180	7.063	0.512	0.806
190	7.456	0.451	0.782

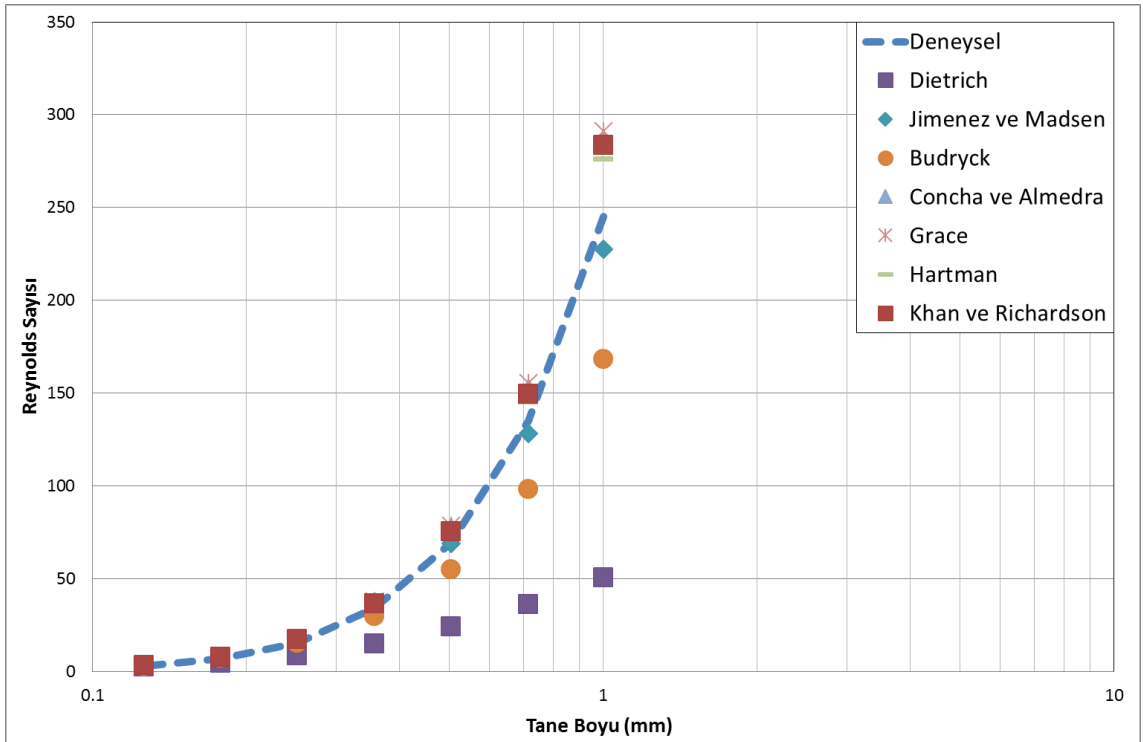
Çizelge 4.5 incelendiğinde aynı basınç değerlerinde manyetit konsantresine ait boşluk oranı kuvars numunesinden fazladır. Bir başka deyişle aynı basınç değerine ulaşmak için kuvars numunesinden daha fazla miktarda kullanmak gerektiği açıkça görülmektedir.

4.2.4. Reynolds Sayısının Hesaplanması

Reynolds sayısının belirlenmesi kayma hızı için gerekli olan ve tanelerin Reynolds sayısı ile ilişkili olan Richardson ve Zaki indeksinin (n) belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. Terminal çökme hızı deneyleri sonucunda ölçülen çökme hızlarının literatürdeki hesaplamalarla çok yakın değerlerde olması Reynolds sayısının hesaplanmasında deneysel çalışmalarda ölçülen terminal çökme hızlarının kullanılabileceğini göstermektedir. Deneysel çalışmalar sonucunda ölçülen terminal çökme hızları ile hesaplanan Reynolds sayıları ile literatürde hesaplanan Reynolds sayıları arasındaki ilişki kuvars kumu ve manyetit konsantresi için sırasıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te verilmektedir.



Şekil 4.13 Kuvars kumu fraksiyonları için hesaplanan Reynolds sayısının hesaplanan değerlerle karşılaştırılması



Şekil 4.14 Manyetit konsantresi fraksiyonları için hesaplanan Reynolds sayısının hesaplanan değerlerle karşılaştırılması

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 incelendiğinde özellikle ince boylarda ölçülen ve hesaplanan Reynolds sayısı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle Richardson ve Zaki indeksinin hesaplanmasında deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilerle hesaplanan Reynolds sayıları kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen terminal çökme hızları kullanılarak hesaplanan Reynolds sayıları Çizelge 4.6'da verilmektedir.

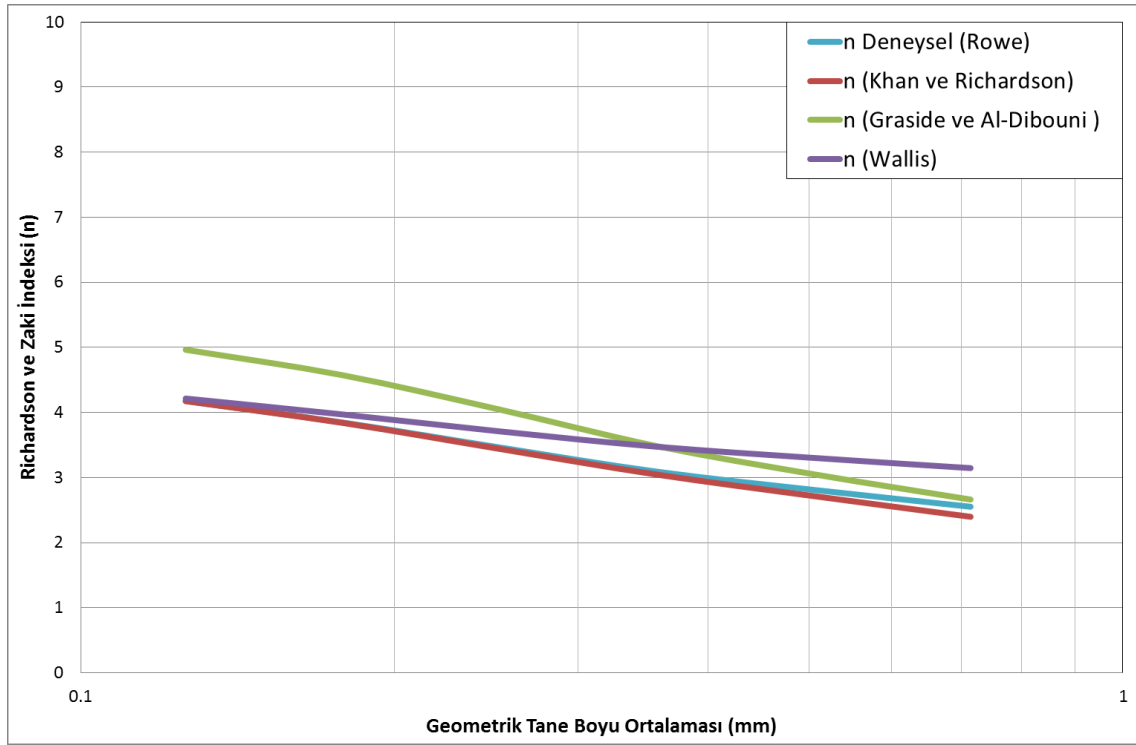
Çizelge 4.6 Kuvars kumu ve manyetit konsantresinin farklı boyut fraksiyonlarına ait Reynolds sayıları

Tane Boyu Fraksiyonu (mm)	Geometrik Ortalama (mm)	Kuvars	Manyetit
		Reynolds Sayısı	Reynolds Sayısı
-1.180+0.850	1.001	-	245.237
-0.850+0.600	0.714	62.487	134.923
-0.600+0.425	0.505	31.561	69.283
-0.425+0.300	0.357	17.175	33.950
-0.300+0.212	0.252	8.173	15.376
-0.212+0.150	0.178	3.665	6.687
-0.150+0.106	0.126	1.538	3.029

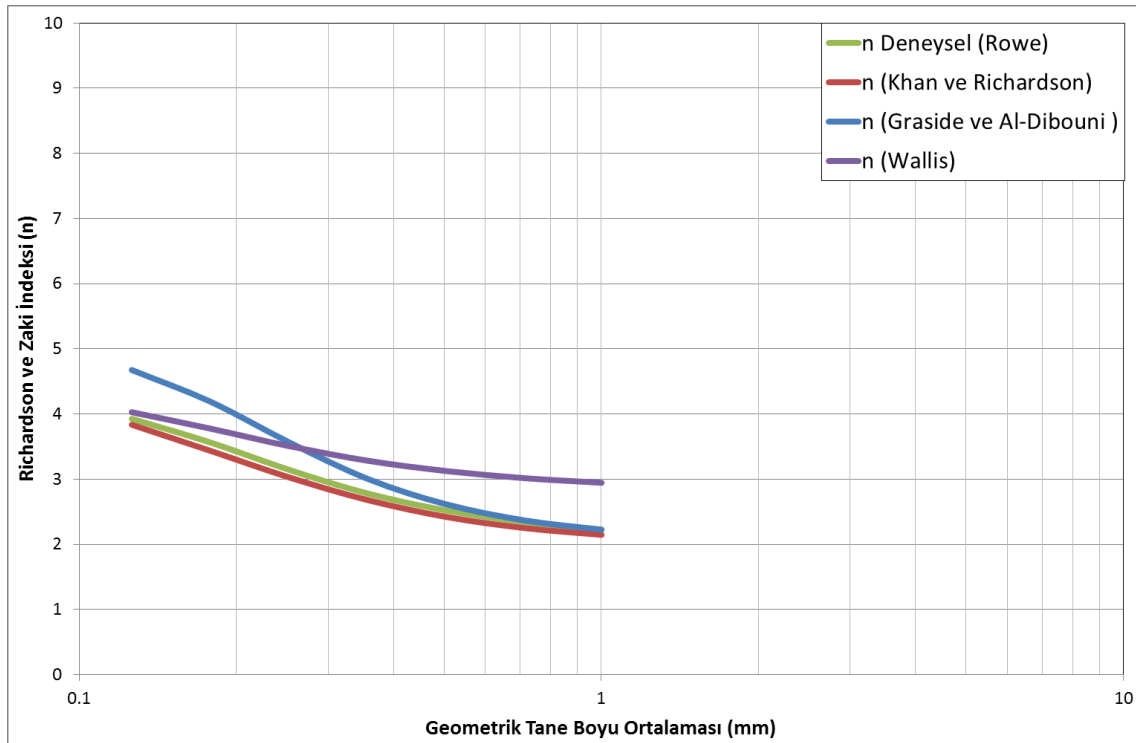
4.2.5. Richardson ve Zaki İndeksinin Hesaplanması

Richardson ve Zaki indeksinin (n) hesaplanması ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar 2. bölümde detaylı şekilde verilmiştir. Tanelerin Reynolds sayısına bağlı olan bu parametrenin hesaplanabilmesi için Çizelge 2.5'te yer alan eşitlikler kullanılarak n değerleri hesaplanmıştır.

Hesaplanan değerler günümüzde n indeksinin hesaplanabilmesi için en geçerli korelasyon olan Rowe korelasyonu ile karşılaştırılmıştır [8]. Deneysel çalışmalardan elde edilen Reynolds sayıları ve Rowe korelasyonu kullanılarak hesaplanan n değerlerinin literatürdeki diğer korelasyonlarla karşılaştırılması kuvars kumu ve manyetit konsantresi için sırasıyla Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmektedir.



Şekil 4.15 Deneysel çalışmalar sonucunda kuvars kumu için hesaplanan n indeksinin literatür değerleri ile karşılaştırılması



Şekil 4.16 Deneysel çalışmalar sonucunda manyetit konsantresi için hesaplanan n indeksinin literatür değerleri ile karşılaştırılması

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 incelendiğinde Eşitlik 2.41’de verilen Khan ve Richardson korelasyonu ile Çizelge 2.5’te verilen Rowe korelasyonunun her iki numune içinde birbirine çok yakın değerler aldığı görülmektedir. Diğer korelasyonlar ile elde edilen değerler kendi arasında ve diğer korelasyonlar ile bir benzerlik göstermediğinden hesaplamalarda kullanılmamışlardır. Hesaplamalarda kullanılan n indeksleri Çizelge 4.7’de verilmektedir.

Çizelge 4.7 Kuvars kumu ve manyetit konsantresine ait n indeksleri

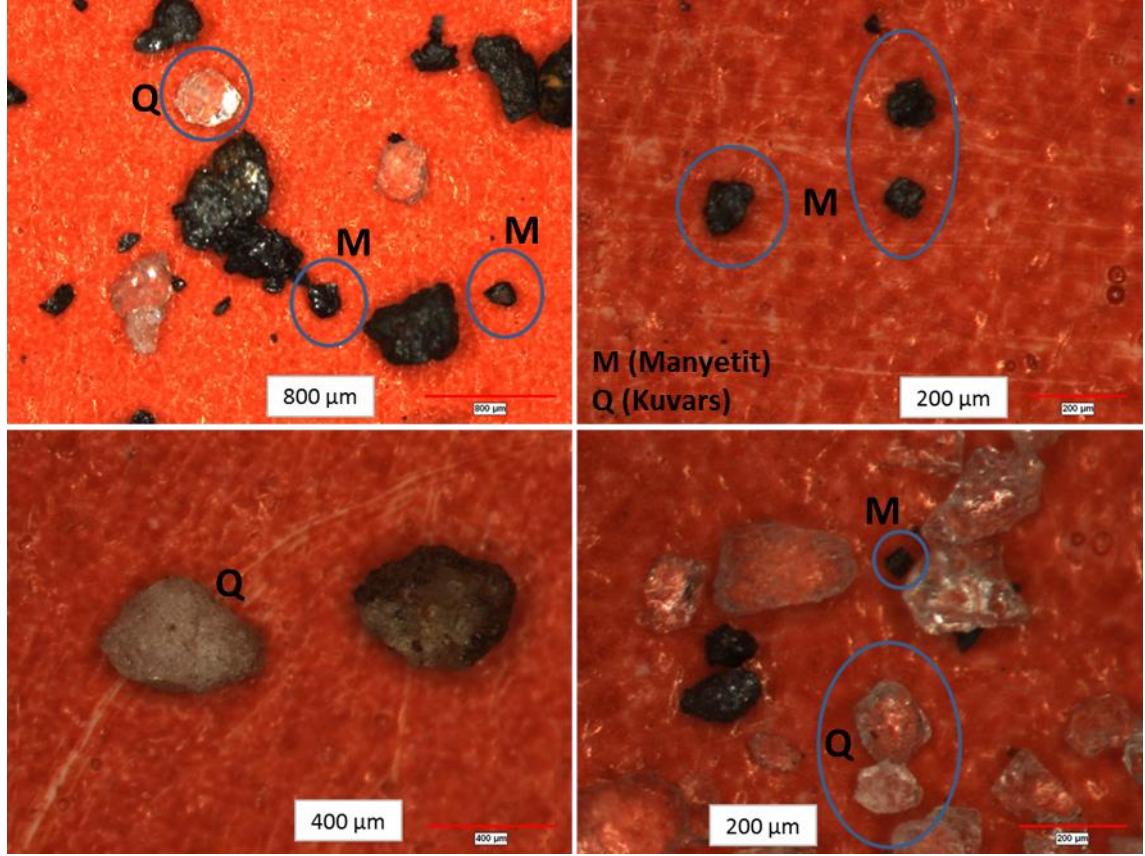
Tane Boyu Aralığı (mm)	Geometrik Ortalama (mm)	n indeksleri	
		Kuvars Kumu	Manyetit Konsantresi
-1.180+0.850	1.001	-	2.228
-0.850+0.600	0.714	2.552	2.341
-0.600+0.425	0.505	2.811	2.519
-0.425+0.300	0.357	3.090	2.780
-0.300+0.212	0.252	3.463	3.145
-0.212+0.150	0.178	3.846	3.564
-0.150+0.106	0.126	4.175	3.926

4.2.6. Kayma Hızı Tahmini

Kayma hızının hesaplanabilmesi için gerekli tüm korelasyonlar yapıldıktan sonra kuvars kumu ve manyetit konsantresine ait kayma hızları farklı su hızı ve basınç değerleri için Eşitlik 2.44 kullanılarak hesaplanmıştır.

Önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlar tanelerin terminal çökme hızları, Reynolds sayıları ve n indekslerinin genellikle ince boylarda literatürle daha yakın değerler aldığını göstermektedir. Bu durumun sebebinin ise literatürde yapılan tüm çalışmalarda küresel tanelerin kullanılması ancak bu tez çalışmasında kullanılan tanelerin özellikle iri boylarda küresellikten uzaklaşması sonucu farklı sonuçlar vermesi olarak düşünülmektedir. Bu durumun daha net açıklanabilmesi için kuvars kumu ve demir konsantresinin farklı boyut aralıklarının optik mikroskop altında görüntüleri alınarak incelenmiştir. İncelenen fotoğraf görüntüleri de tanelerin incelidikçe küresele daha yakın hale geldiği, irileştikçe ise küresellikten uzaklaştığı

görülmüştür. Tanelerin küreselliğinin incelendiği fotoğraf görüntüleri Şekil 4.17’de verilmektedir.



Şekil 4.17 Kuvars kumu ve manyetit konsantresine ait fotoğraf görüntüleri

Eşitlik 2.44 kullanılarak farklı basınç değerleri için hesaplanan kayma hızları kuvars kumu ve manyetit konsantresi için sırasıyla Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’da verilmektedir.

Çizelge 4.8 Kuvars kumuna ait kayma hızı değerleri

				Kayma Hızı (mm/s)		
Tane Boyu Aralığı (mm)	Geometrik Ortalama (mm)	Terminal Çökelme Hızı (mm/s)	Reynolds Sayısı	140 (5.494 kPa)	150 (5.886 kPa)	160 (6.278 kPa)
-0.850+0.600	0.714	87.50	62.48	56.69	49.76	43.15
-0.600+0.425	0.505	62.50	31.56	37.67	32.35	27.4
-0.425+0.300	0.357	48.10	17.17	26.81	22.49	18.56
-0.300+0.212	0.252	32.41	8.17	16.28	13.23	10.56
-0.212+0.150	0.178	20.55	3.66	9.27	7.3	5.62
-0.150+0.106	0.126	12.20	1.54	5.02	3.85	2.87

Çizelge 4.9 Manyetit konsantresine ait kayma hızı değerleri

				Kayma Hızı (mm/s)		
Tane Boyu Aralığı (mm)	Geometrik Ortalama (mm)	Terminal Çökelme Hızı (mm/s)	Reynolds Sayısı	170 (6.671 kPa)	180 (7.063 kPa)	190 (7.456 kPa)
-1.180+0.850	1.001	244.87	244.87	194.81	187.84	180.91
-0.850+0.600	0.714	188.93	134.90	147.19	141.45	135.77
-0.600+0.425	0.505	137.20	69.29	103.4	98.84	94.35
-0.425+0.300	0.357	95.08	33.94	68.25	64.74	61.31
-0.300+0.212	0.252	60.97	15.36	40.89	38.37	35.93
-0.212+0.150	0.178	37.50	6.68	23.27	21.56	19.93
-0.150+0.106	0.126	24.02	3.03	13.93	12.77	11.68

Yatak içi su hızının tanenin kayma hızından büyük olması durumunda tane üst akıma aksi takdirde ise alt akıma gitmelidir. Kayma hızı yatak içi su hızına eşit olan tanelerin ise alt ya da üst akıma gitme olasılıkları eşit görülmektedir. Bu nedenle kabaran yataklı sınıflandırıcının kesme boyu, kayma hızı yatak içi su hızına eşit olan tane boyudur. Yatak içi su hızı besleme su hızının boşluk oranına bölünmesi ile hesaplanmaktadır [8].

Deneysel çalışmalarda uygulanacak işletim parametreleri ve bu parametrelere bağlı olarak hesaplanan sınıflandırıcı kesme boyları kuvars kumu ve manyetit konsantresi için sırasıyla Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11’de verilmektedir.

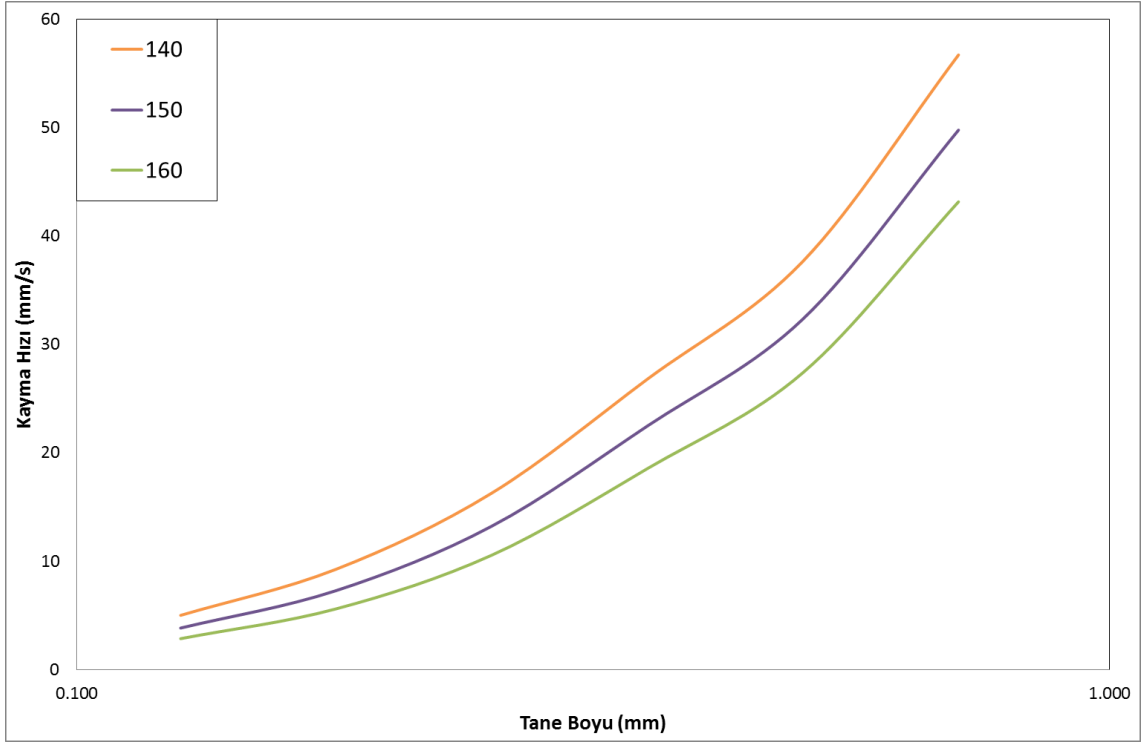
Çizelge 4.10 Kuvars kumu için hesaplanan tahmini kesme boyları

Yıkama Suyu Hızı (mm/s)	Basınç Set Değeri	Basınç (kPa)	Yatak içi Su Hızı (mm/s)	Kesme Boyu (mm)
5.00 (3 l/dk)	140	5.494	6.61	0.146
	150	5.886	7.19	0.177
	160	6.278	7.88	0.212
8.33 (5 l/dk)	140	5.494	11.02	0.197
	150	5.886	11.99	0.237
	160	6.278	13.14	0.286
11.67 (7 l/dk)	140	5.494	15.43	0.244
	150	5.886	16.78	0.292
	160	6.278	18.4	0.355

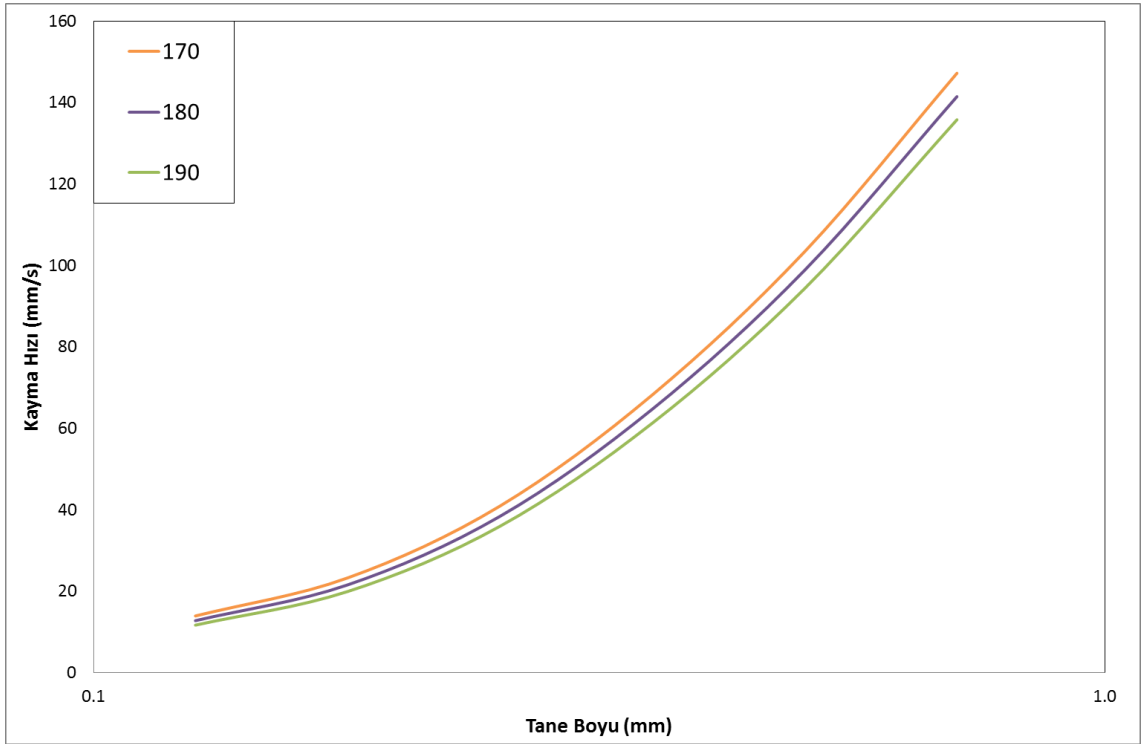
Çizelge 4.11 Manyetit konsantresi için hesaplanan tahmini kesme boyları

Yıkama Suyu Hızı (mm/s)	Basınç Set Değeri	Basınç (kPa)	Yatak içi Su Hızı (mm/s)	Kesme Boyu (mm)
10.00 (6 l/dk)	170	6.671	12.05	0.116
	180	7.063	16.06	0.124
	190	7.456	20.08	0.133
13.33 (8 l/dk)	170	6.671	12.41	0.138
	180	7.063	16.55	0.149
	190	7.456	20.68	0.160
16.67 (10 l/dk)	170	6.671	12.80	0.160
	180	7.063	17.06	0.174
	190	7.456	21.33	0.185

Kuvars kumu ve manyetit konsantresine ait kayma hızları sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilmektedir.



Şekil 4.18 Farklı basınç değerlerine ait kayma hızları (Kuars kumu)



Şekil 4.19 Farklı basınç değerlerine ait kayma hızları (Manyetit konsantresi)

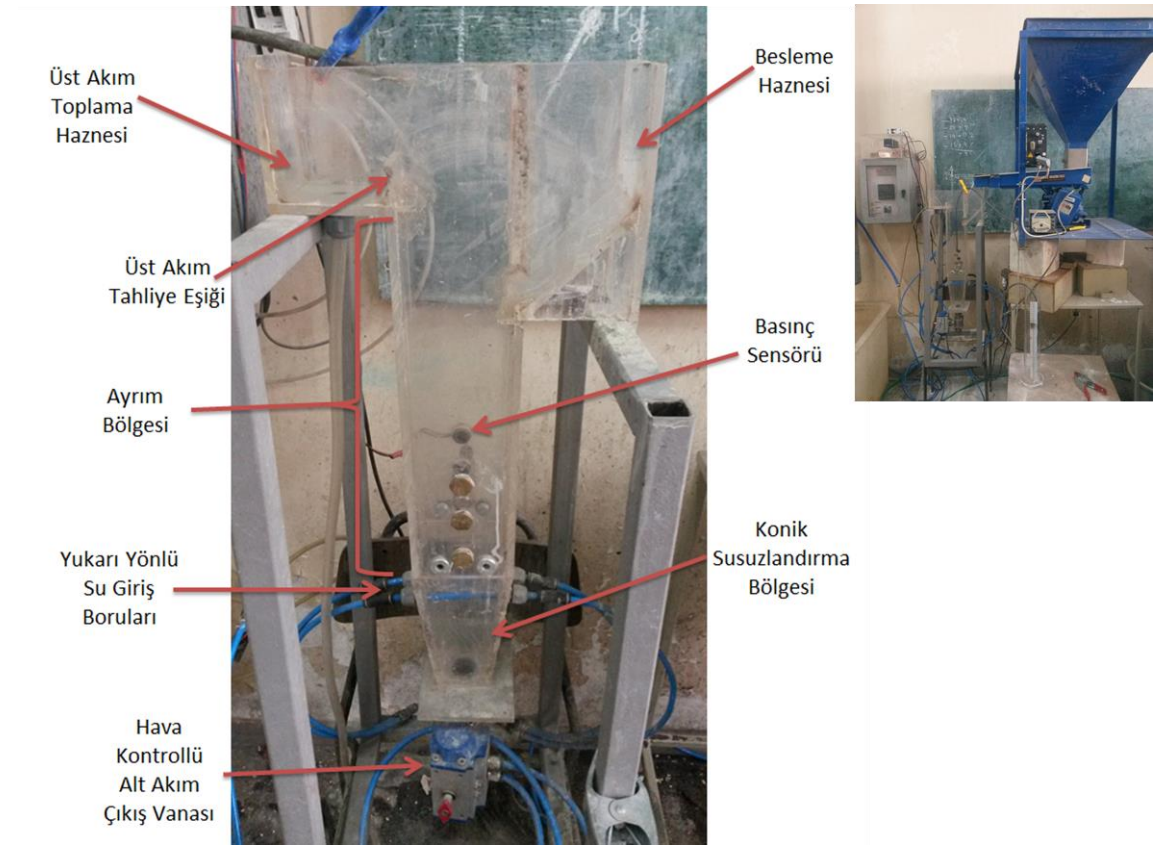
Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 incelendiğinde artan basınç değerleriyle birlikte her iki malzemeninde kayma hızlarının düştüğü görülmektedir. Basınç değerindeki artış

kabaran yataklı içerisindeki malzeme miktarını arttırmakta yatak yoğunluğu ve yüksekliği de buna bağlı olarak artmaktadır. Bu durumun sonucu olarak tanelerin birbiri ile ve ekipman duvarları ile çarpışma olasılığı artmakta ve çökme hızları daha da düşmektedir. Kabaran yataklı sınıflandırıcıdaki tane çökme hızı ve yukarı yönlü su hızının bir sonucu olan bağlı hız olarakta adlandırılan kayma hızı bu nedenle düşmekte ve ekipman farklı boylarda ayırım yapabilmektedir.

4.3. Kabaran Yataklı Sınıflandırıcı ile Yapılan Çalışmalar

4.3.1. Kuvars Kumu ile Yapılan Çalışmalar

Deneysel çalışmaların bu kısmında kabaran yataklı sınıflandırıcının tane boyuna göre ayırım performansının belirlenmesi amacıyla yoğunluğu sabit (2.64 g/cm^3) kuvars kumu kullanılmıştır. Deneyler esnasında ekipman Çizelge 4.10'da verilen koşullarda çalıştırılarak kararlı durumda besleme, alt ve üst akışlardan numuneler alınmıştır. Alınan numunelerin tane boyu analizi gerçekleştirilmiş, % katı içeriği ve palp yoğunlukları belirlenmiştir. Ayrıca ekipman kararlı durumda çalıştığı esnada sensör bölgesinden yukarı doğru sabit hızla çekilen ve peristaltik bir pompaya bağlı olan hortum yardımıyla yatak içerisinde malzeme çekilerek ortalama yoğunluk belirlenmeye çalışılmıştır. Bu işlem sadece bir fikir vermesi amacıyla yapılmıştır. Deneysel çalışmalara ait deney düzeneği Şekil 4.20'de verilmektedir.



Şekil 4.20 Kabaran Yataklı Sınıflandırıcı deney düzeneği

Deneysel çalışmalar esnasında yaklaşık 600 kg kuvars kumu kullanılmıştır. Deneysel çalışmalara ait koşullar Çizelge 4.12’de verilmektedir.

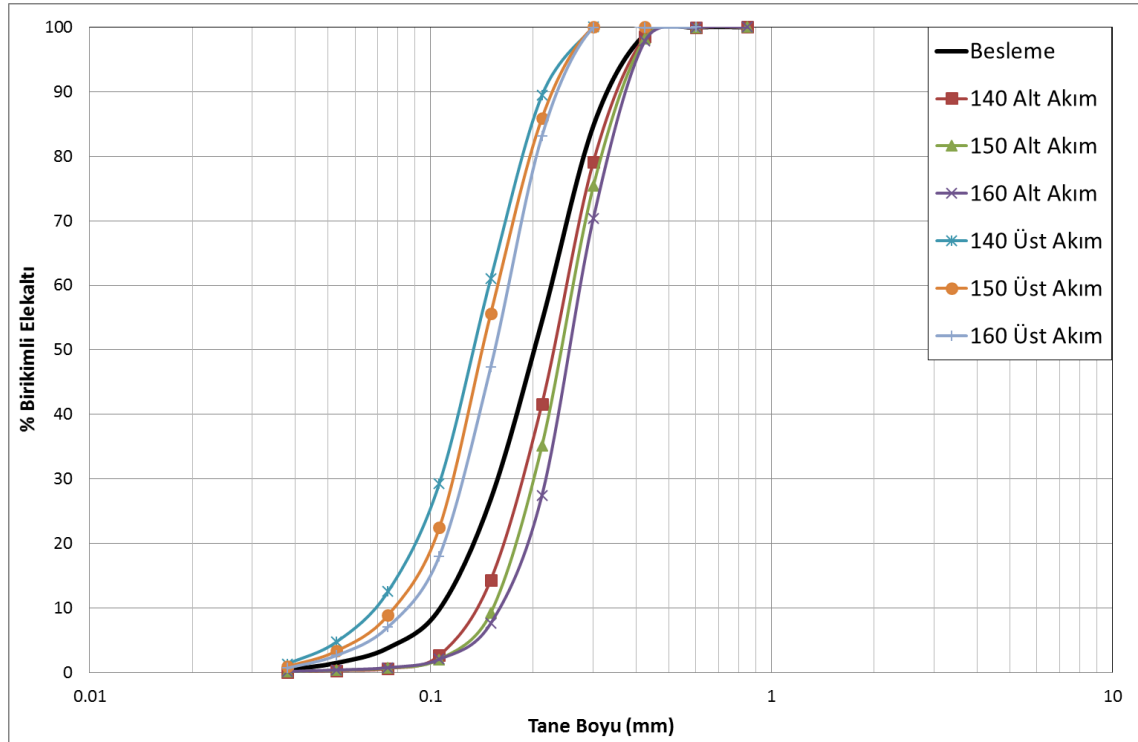
Çizelge 4.12 Tane boyuna göre ayırım deneylerine ait koşullar

Yıkama Suyu (l/dk)	Yıkama Suyu Hızı (mm/s)	Basmaç Set Değeri	Basmaç (kPa)
3	5.00	140	5.494
		150	5.886
		160	6.278
5	8.33	140	5.494
		150	5.886
		160	6.278
7	11.67	140	5.494
		150	5.886
		160	6.278

5 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar Çizelge 4.13'te, deneysel çalışmalara ait tane boyu dağılımları Şekil 4.21'de verilmektedir.

Çizelge 4.13 5 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar

Yıkama Suyu Hızı 5 mm/s				
Basınç Set Değeri	Akış Kolu	% Ağırlık	% Katı	Palp Yoğunluğu (g/cm ³)
140 (5.494 kPa)	Besleme	100.00	100.00	2.64
	Alt Akım	73.24	60.86	1.60
	Üst Akım	26.76	1.31	1.01
	Yatak	-	-	1.06
150 (5.886 kPa)	Besleme	100.00	100.00	2.64
	Alt Akım	62.02	61.29	1.61
	Üst Akım	37.98	3.30	1.02
	Yatak	-	-	1.46
160 (6.278 kPa)	Besleme	100.00	100.00	2.64
	Alt Akım	51.55	62.47	1.63
	Üst Akım	48.45	7.65	1.05
	Yatak	-	-	1.57

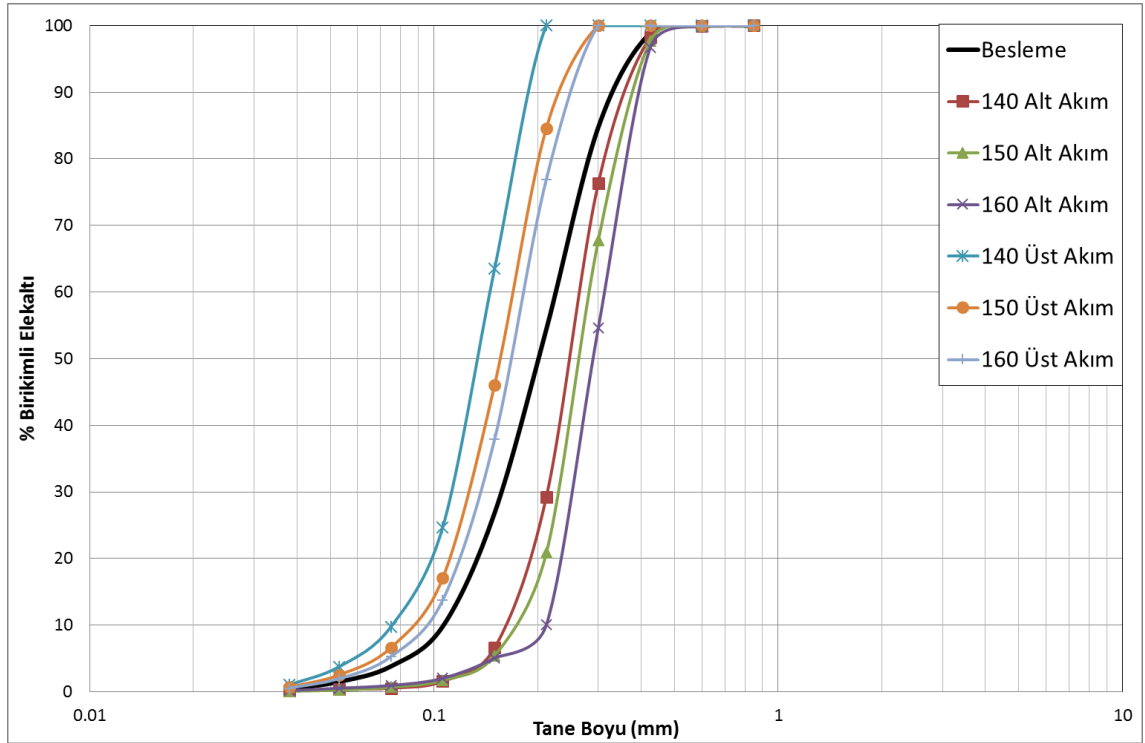


Şekil 4.21 5 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan testlere ait devre etrafı tane boyu dağılımları

8.33 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar Çizelge 4.14'te, deneysel çalışmalara ait tane boyu dağılımları ise Şekil 4.22'de verilmektedir.

Çizelge 4.14 8.33 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar

Yıkama Suyu Hızı 8.33 mm/s				
Basınç Set Değeri	Akış Kolu	% Ağırlık	% Katı	Palp Yoğunluğu (g/cm ³)
140 (5.494 kPa)	Besleme	100.00	100.00	2.64
	Alt Akım	64.42	64.99	1.68
	Üst Akım	35.58	2.16	1.01
	Yatak	-	-	1.43
150 (5.886 kPa)	Besleme	100.00	100.00	2.64
	Alt Akım	47.30	64.42	1.67
	Üst Akım	52.70	5.28	1.03
	Yatak	-	-	1.54
160 (6.278 kPa)	Besleme	100.00	100.00	2.64
	Alt Akım	33.64	64.86	1.67
	Üst Akım	66.36	8.63	1.06
	Yatak	-	-	1.57

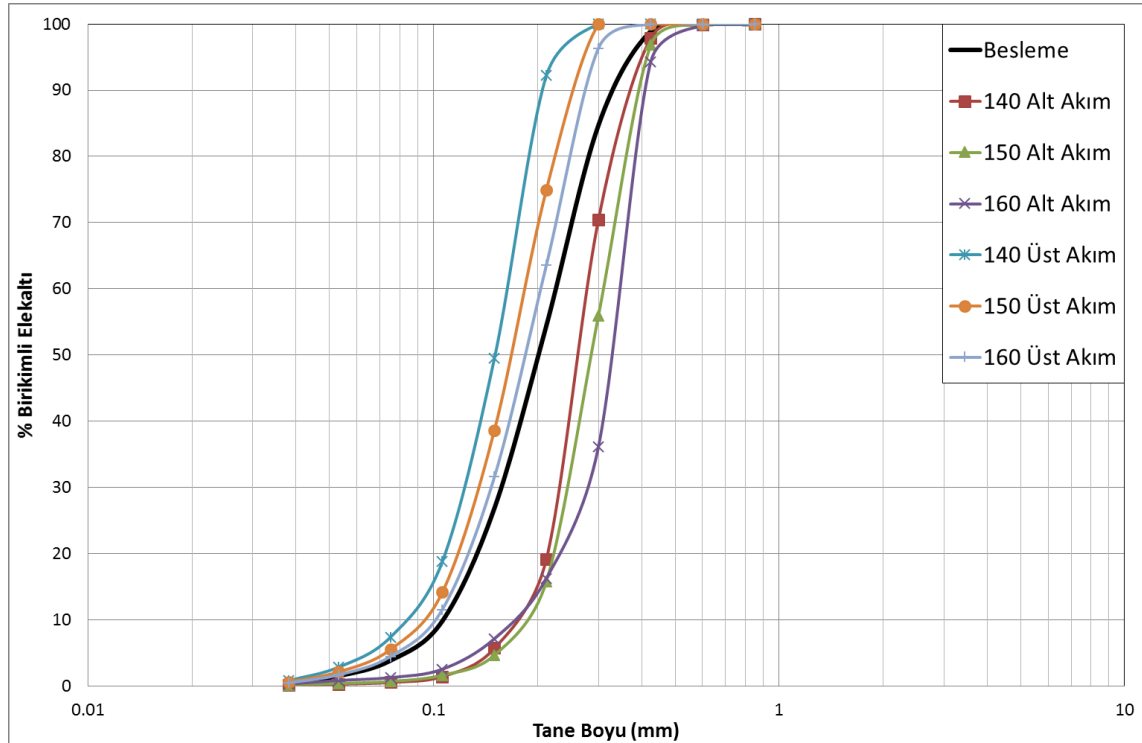


Şekil 4.22 8.33 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan testlere ait devre etrafı tane boyu dağılımları

11.7 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar Çizelge 4.15'te, deneysel çalışmalara ait tane boyu dağılımları ise Şekil 4.23'te verilmektedir.

Çizelge 4.15 11.67 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar

Yıkama Suyu Hızı 11.67 mm/s				
Basınç Set Değeri	Akış Kolu	% Ağırlık	% Katı	Palp Yoğunluğu (g/cm ³)
140 (5.494 kPa)	Besleme	100.00	100.00	2.64
	Alt Akım	51.70	62.82	1.64
	Üst Akım	48.30	2.95	1.02
	Yatak	-	-	1.42
150 (5.886 kPa)	Besleme	100.00	100.00	2.64
	Alt Akım	34.68	64.14	1.66
	Üst Akım	65.32	6.76	1.04
	Yatak	-	-	1.53
160 (6.278 kPa)	Besleme	100.00	100.00	2.64
	Alt Akım	19.31	64.72	1.67
	Üst Akım	80.69	14.91	1.10
	Yatak	-	-	1.59



Şekil 4.23 11.67 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan testlere ait devre etrafı tane boyu dağılımları

Kuvars kumu ile yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde su hızı ve basınç değerleri arttıkça alt ve üst akımın tane boyu dağılımlarının irileştiği görülmektedir. Bunun yanı sıra su hızı ve basıncın artması üst akımın hem katı içeriğini hem de palp yoğunluğunu arttırmaktadır. Özellikle 11.67 mm/s su hızı ve 6.278 kPa koşulunda elde edilen üst akım tane boyu dağılımının besleme tane boyu dağılımına son derece yaklaştığı görülmektedir. Beslemenin %80.69'unun üst akımdan alındığı bu koşulun beslemedeki en iri tane boyu fraksiyonunun üst akıma gelebilmesi için yaklaşık koşul olduğu düşünülmektedir. Kuvars numunesi ile yapılan çalışmalara ait detaylı bilgi madde denkliği ve performans değerlendirme çalışmaları başlığı altında verilecektir.

4.3.2. Manyetit Konsantresi ile yapılan Çalışmalar

Deneysel çalışmaların bu kısmında kabaran yataklı sınıflandırıcının tane boyuna göre ayırım performansının belirlenmesi amacıyla manyetit konsantresi kullanılmıştır. Deneyler esnasında ekipman farklı su hızları ve basınç değerlerinde çalıştırılarak kararlı durumda besleme, alt ve üst akışlardan numuneler alınmıştır. Alınan numunelerin tane boyu analizi gerçekleştirilmiş, % katı içeriği ve palp yoğunlukları belirlenmiştir. Deneysel çalışmalara ait deney düzeneği kuvars numunesi ile aynıdır. Deneysel çalışmalar esnasında yaklaşık 400 kg manyetit konsantresi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalara ait koşullar Çizelge 4.16'da verilmektedir.

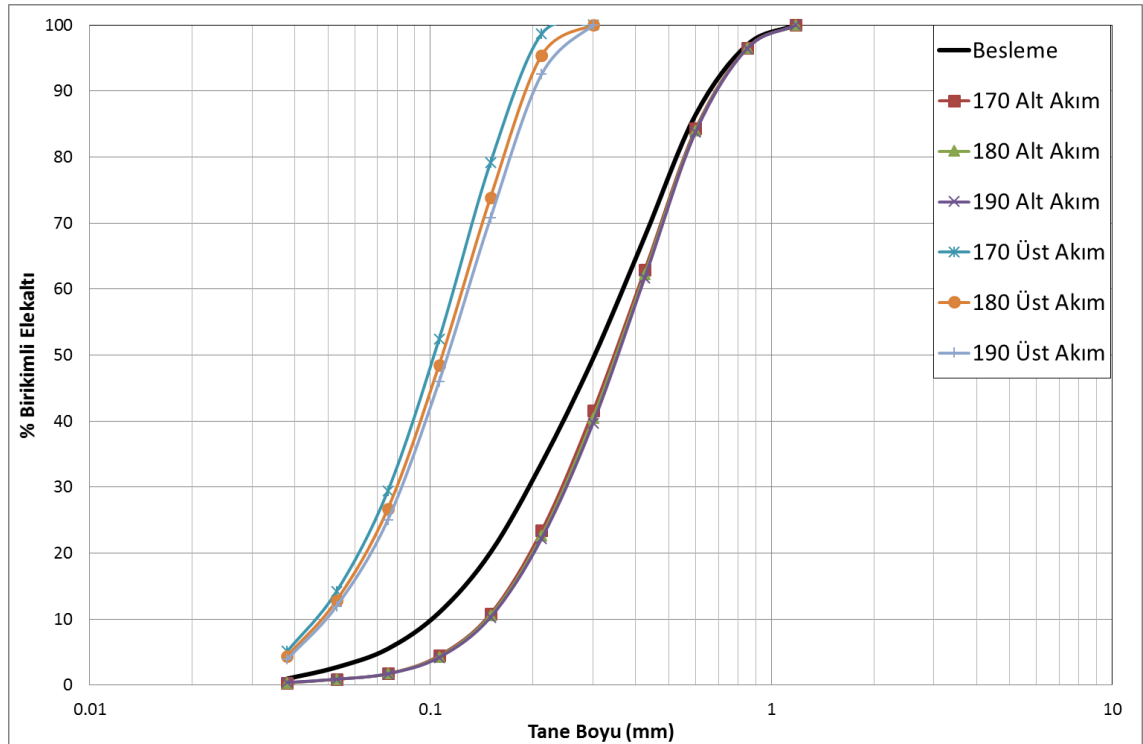
Çizelge 4.16 Tane boyuna göre ayırım deneylerine ait koşullar

Yıkama Suyu (l/dk)	Yıkama Suyu Hızı (mm/s)	Basınç Set Değeri	Basınç (kPa)
6	10.00	170	6.671
		180	7.063
		190	7.456
8	13.33	170	6.671
		180	7.063
		190	7.456
10	16.67	170	6.671
		180	7.063
		190	7.456

10 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar Çizelge 4.17’de, deneysel çalışmalara ait tane boyu dağılımları ise Şekil 4.24’te verilmektedir.

Çizelge 4.17 10.00 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar

Yıkama Suyu Hızı 10 mm/s				
Basınç Set Değeri	Akış Kolu	% Ağırlık	% Katı	Palp Yoğunluğu (g/cm ³)
170 (6.671 kPa)	Besleme	100.00	100.00	4.93
	Alt Akım	86.42	73.77	2.43
	Üst Akım	13.58	1.23	1.01
	Yatak	-	-	1.66
180 (7.063 kPa)	Besleme	100.00	100.00	4.93
	Alt Akım	84.92	74.04	2.44
	Üst Akım	15.08	1.25	1.01
	Yatak	-	-	1.78
190 (7.456 kPa)	Besleme	100.00	100.00	4.93
	Alt Akım	83.77	74.56	2.47
	Üst Akım	16.23	1.37	1.01
	Yatak	-	-	1.84

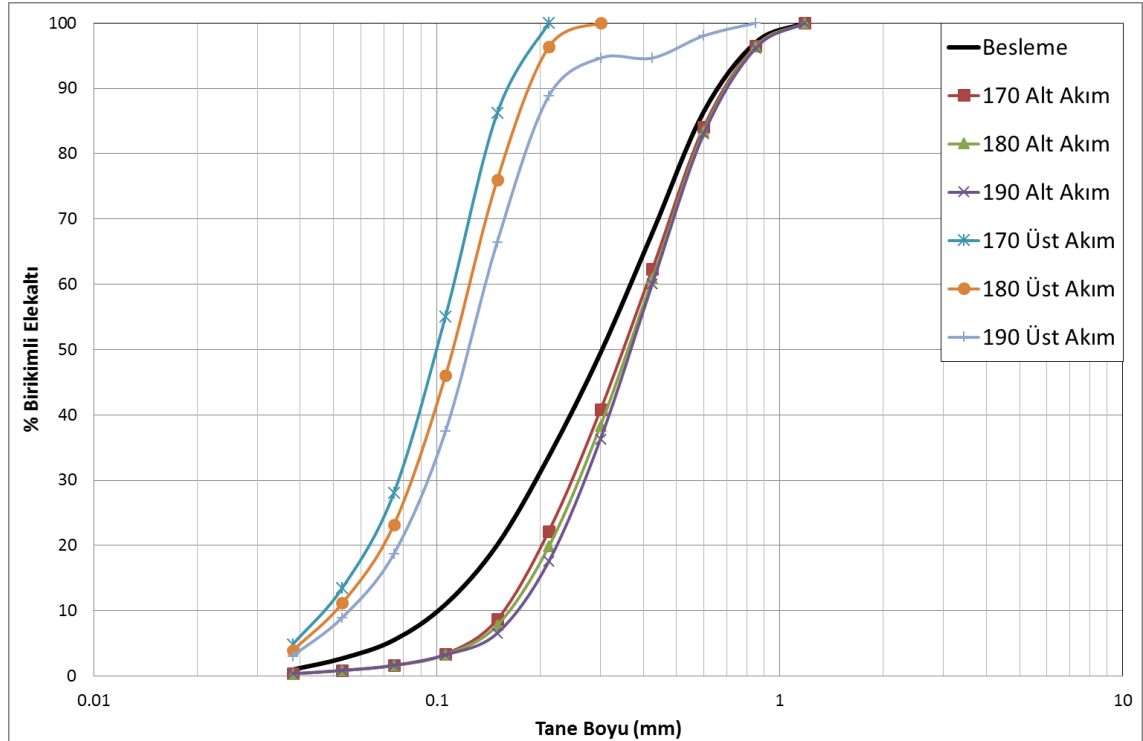


Şekil 4.24 10.00 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan testlere ait devre etrafı tane boyu dağılımları

13.33 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar Çizelge 4.18'de, deneysel çalışmalara ait tane boyu dağılımları ise sırasıyla Şekil 4.25'te verilmektedir.

Çizelge 4.18 13.33 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar

Yıkama Suyu Hızı 13.33 mm/s				
Basınç Set Değeri	Akış Kolu	% Ağırlık	% Katı	Palp Yoğunluğu (g/cm ³)
170 (6.671 kPa)	Besleme	100.00	100.00	4.93
	Alt Akım	85.28	74.75	2.47
	Üst Akım	14.72	1.35	1.01
	Yatak	-	-	1.71
180 (7.063 kPa)	Besleme	100.00	100.00	4.93
	Alt Akım	81.95	74.18	2.45
	Üst Akım	18.05	1.83	1.01
	Yatak	-	-	1.84
190 (7.456 kPa)	Besleme	100.00	100.00	4.93
	Alt Akım	77.42	74.91	2.48
	Üst Akım	22.58	2.46	1.02
	Yatak	-	-	1.87

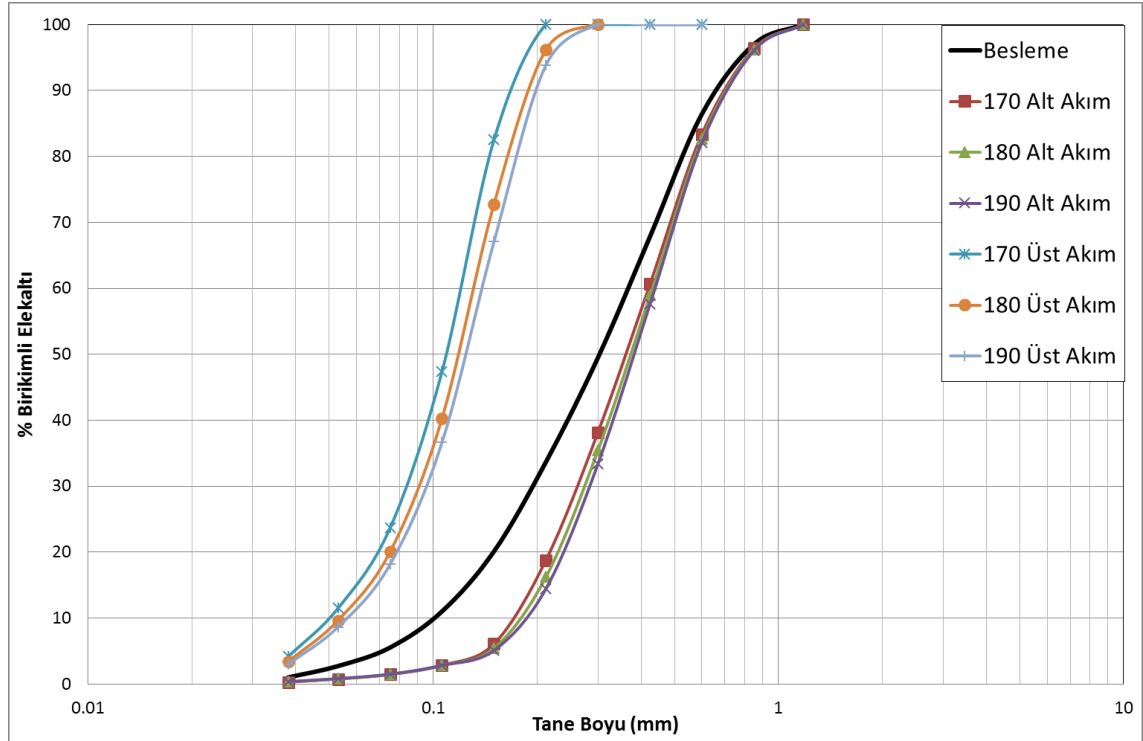


Şekil 4.25 13.33 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan testlere ait devre etrafı tane boyu dağılımları

16.67 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar Çizelge 4.19'da, deneysel çalışmalara ait tane boyu dağılımları ise Şekil 4.26'da verilmektedir.

Çizelge 4.19 16.67 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar

Yıkama Suyu Hızı 16.67 mm/s				
Basınç Set Değeri	Akış Kolu	% Ağırlık	% Katı	Palp Yoğunluğu (g/cm ³)
170 (6.671 kPa)	Besleme	100.00	100.00	4.93
	Alt Akım	81.66	74.82	2.48
	Üst Akım	18.34	2.45	1.02
	Yatak	-	-	1.72
180 (7.063 kPa)	Besleme	100.00	100.00	4.93
	Alt Akım	78.18	74.50	2.46
	Üst Akım	21.82	3.32	1.03
	Yatak	-	-	1.80
190 (7.456 kPa)	Besleme	100.00	100.00	4.93
	Alt Akım	75.78	75.07	2.49
	Üst Akım	24.22	5.71	1.05
	Yatak	-	-	1.94



Şekil 4.26 16.67 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan testlere ait devre etrafı tane boyu dağılımları

Manyetit konsantresi ile yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde kuvars numunesine benzer şekilde su hızı ve basınç değerleri arttıa alt ve st akımın tane boyu dağılımlarının irileştiği görülmektedir. Bunun yanı sıra su hızı ve basıncın artması st akımın hem katı içeriğini hem de palp yoğunluğunu arttırmaktadır. Ancak su hızının 16.67 mm/s değerlerine çıktığı durumda bile st akımdan beslemenin % 24.22'sinin çok düşük katı miktarlarında alınabildiği görülmektedir. Bu durumun temel nedeni manyetit cevherinin yüksek yoğunluğu ve aynı zamanda kuvars cevherinden daha iri bir tane boyu dağılımına sahip olmasıdır. Manyetit cevheri ile yapılan çalışmalara ait detaylı bilgi madde denkliği ve performans değerlendirme çalışmaları başlığı altında verilecektir.

4.3.3. Yapay Karışım Numenesi ile Yapılan alışmalar

Deneysel çalışmaların bu kısmında kabaran yataklı sınıflandırıcının tane boyuna ve yoğunluk farkına göre ayırım performansının belirlenmesi amacıyla eşit miktarda kuvars kumu ve manyetit konsantresinden oluşan yapay karışım kullanılmıştır. Deneyler esnasında ekipman farklı su hızları ve basınç değerlerinde çalıştırılarak kararlı durumda besleme, alt ve st akışlardan numuneler alınmıştır. Alınan numunelerin tane boyu analizi gerçekleştirilmiş, % katı içeriği, palp yoğunlukları ve demir tenörleri belirlenmiştir. Deneysel alışmalar esnasında yaklaşık 500 kg kuvars ve manyetitten oluşan yapay karışım kullanılmıştır. Numunelerin karıştırılması işlemini gösteren fotoğraf grntş şekil 4.27'de, deneysel çalışmalara ait koşullar ise izelge 4.20'de verilmektedir.



Şekil 4.27 Kuvars ve manyetit cevherinden oluşan yapay karışım numunesi

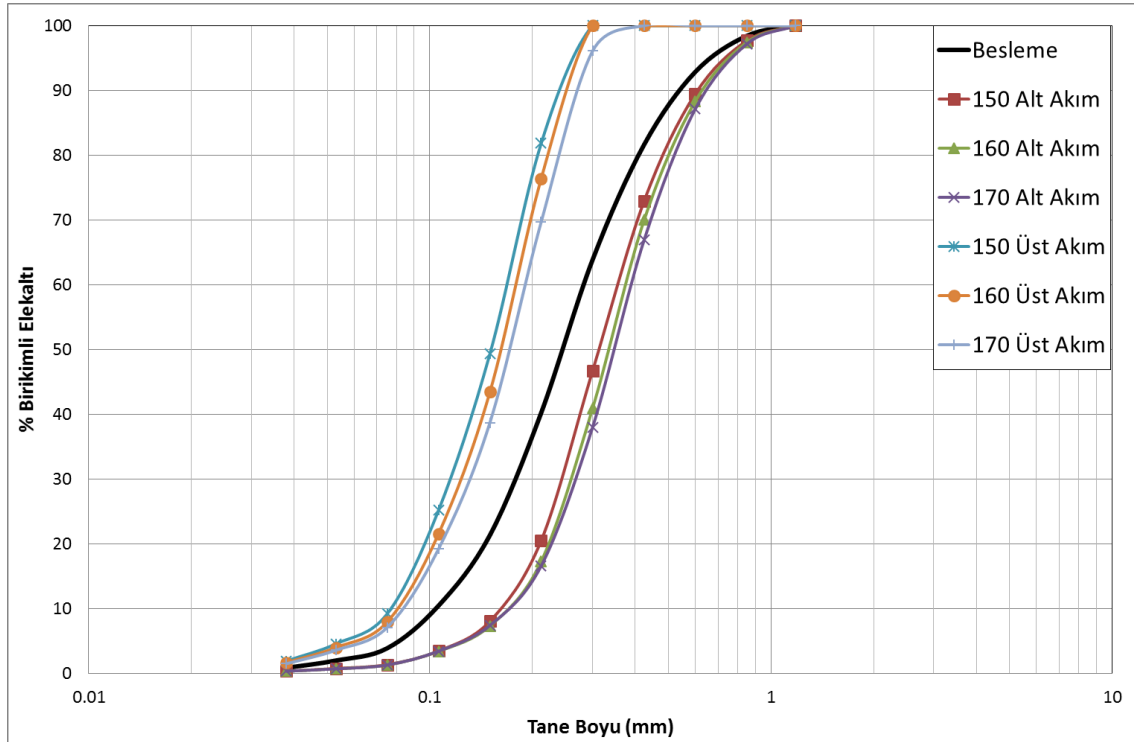
Çizelge 4.20 Tane boyu ve yoğunluğa göre ayırım deneylerine ait koşullar

Yıkama Suyu (l/dk)	Yıkama Suyu Hızı (mm/s)	Basınç Set Değeri	Basınç (kPa)
4	6.67	150	5.886
		160	6.278
		170	6.671
6	10.00	150	5.886
		160	6.278
		170	6.671
8	13.33	150	5.886
		160	6.278
		170	6.671

6.67 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar Çizelge 4.21’de, deneysel çalışmalara ait tane boyu dağılımları ise Şekil 4.28’de verilmektedir.

Çizelge 4.21 6.67 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar

Yıkama Suyu Hızı 6.67 mm/s				
Basınç Set Değeri	Akış Kolu	% Ağırlık	% Katı	Palp Yoğunluğu (g/cm ³)
150 (5.886 kPa)	Besleme	100.00	100.00	3.77
	Alt Akım	67.82	72.88	2.15
	Üst Akım	32.18	4.47	1.03
	Yatak	-	-	1.45
160 (6.278 kPa)	Besleme	100.00	100.00	3.77
	Alt Akım	61.17	72.89	2.15
	Üst Akım	38.83	4.72	1.04
	Yatak	-	-	1.62
170 (6.671 kPa)	Besleme	100.00	100.00	3.77
	Alt Akım	55.49	73.54	2.18
	Üst Akım	44.51	6.73	1.05
	Yatak	-	-	1.66

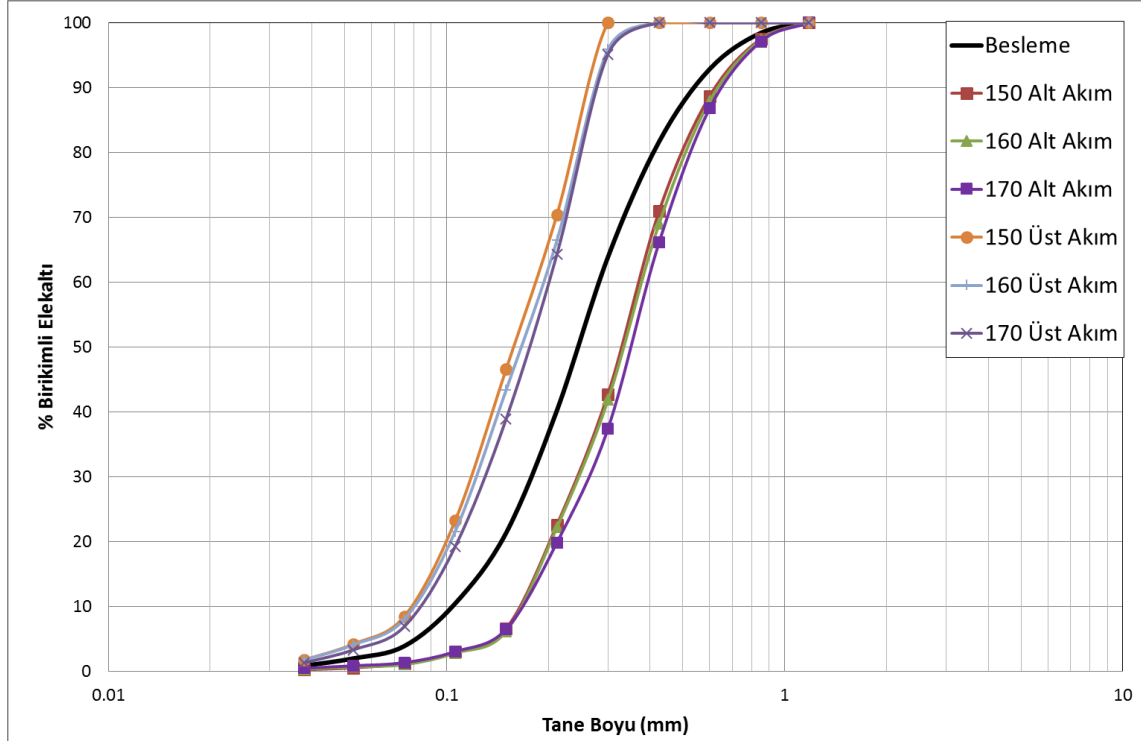


Şekil 4.28 6.67 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan testlere ait devre etrafı tane boyu dağılımları

10.00 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar Çizelge 4.22’de, deneysel çalışmalara ait tane boyu dağılımları Şekil 4.29’da verilmektedir.

Çizelge 4.22 10.00 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar

Yıkama Suyu Hızı 10.00 mm/s				
Basınç Set Değeri	Akış Kolu	% Ağırlık	% Katı	Palp Yoğunluğu (g/cm ³)
150 (5.886 kPa)	Besleme	100.00	100.00	3.77
	Alt Akım	63.10	74.00	2.19
	Üst Akım	36.90	4.53	1.03
	Yatak	-	-	1.48
160 (6.278 kPa)	Besleme	100.00	100.00	3.77
	Alt Akım	59.21	74.53	2.21
	Üst Akım	40.79	4.93	1.04
	Yatak	-	-	1.59
170 (6.671 kPa)	Besleme	100.00	100.00	3.77
	Alt Akım	54.15	74.96	2.23
	Üst Akım	45.85	6.16	1.05
	Yatak	-	-	1.73

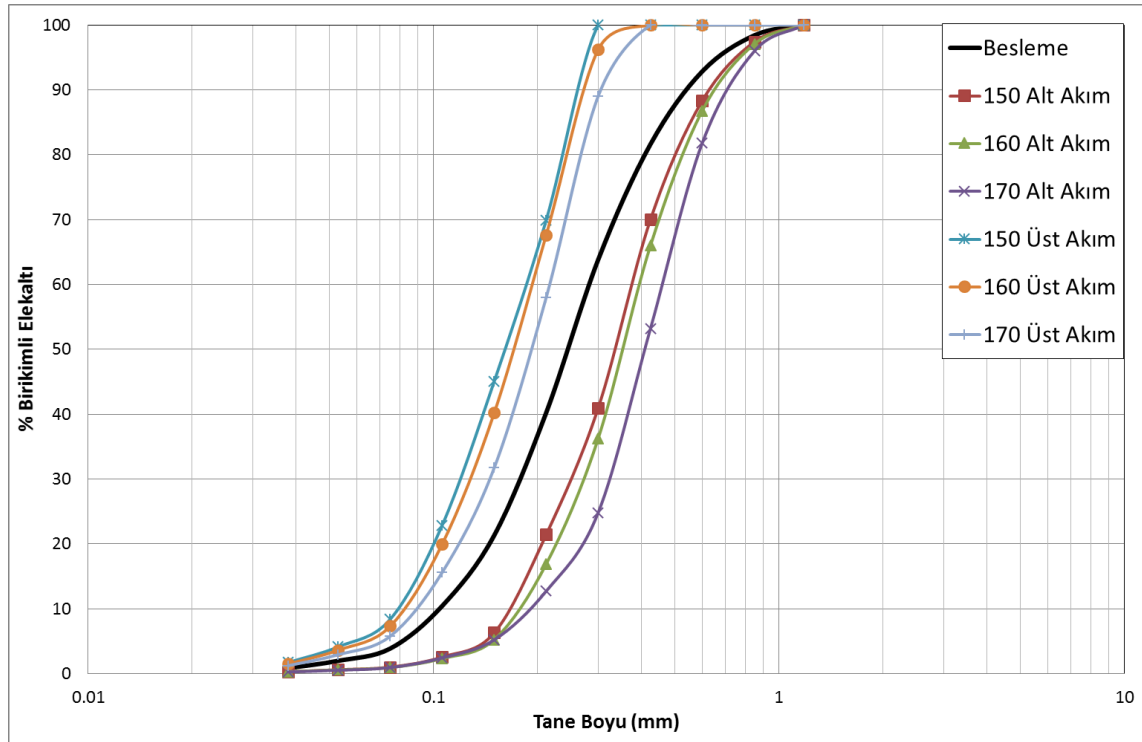


Şekil 4.29 10.00 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan testlere ait devre etrafı tane boyu dağılımları

13.33 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar Çizelge 4.23'te, deneysel çalışmalara ait tane boyu dağılımları ise Şekil 4.30'da verilmektedir.

Çizelge 4.23 13.33 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan çalışmalara ait sonuçlar

Yıkama Suyu Hızı 13.33 mm/s				
Basınç Set Değeri	Akış Kolu	% Ağırlık	% Katı	Palp Yoğunluğu (g/cm ³)
150 (5.886 kPa)	Besleme	100.00	100.00	3.77
	Alt Akım	61.24	75.04	2.23
	Üst Akım	38.76	5.55	1.04
	Yatak	-	-	1.49
160 (6.278 kPa)	Besleme	100.00	100.00	3.77
	Alt Akım	54.01	75.14	2.23
	Üst Akım	45.99	7.04	1.05
	Yatak	-	-	1.61
170 (6.671 kPa)	Besleme	100.00	100.00	3.77
	Alt Akım	39.24	75.17	2.23
	Üst Akım	60.76	8.37	1.07
	Yatak	-	-	1.70



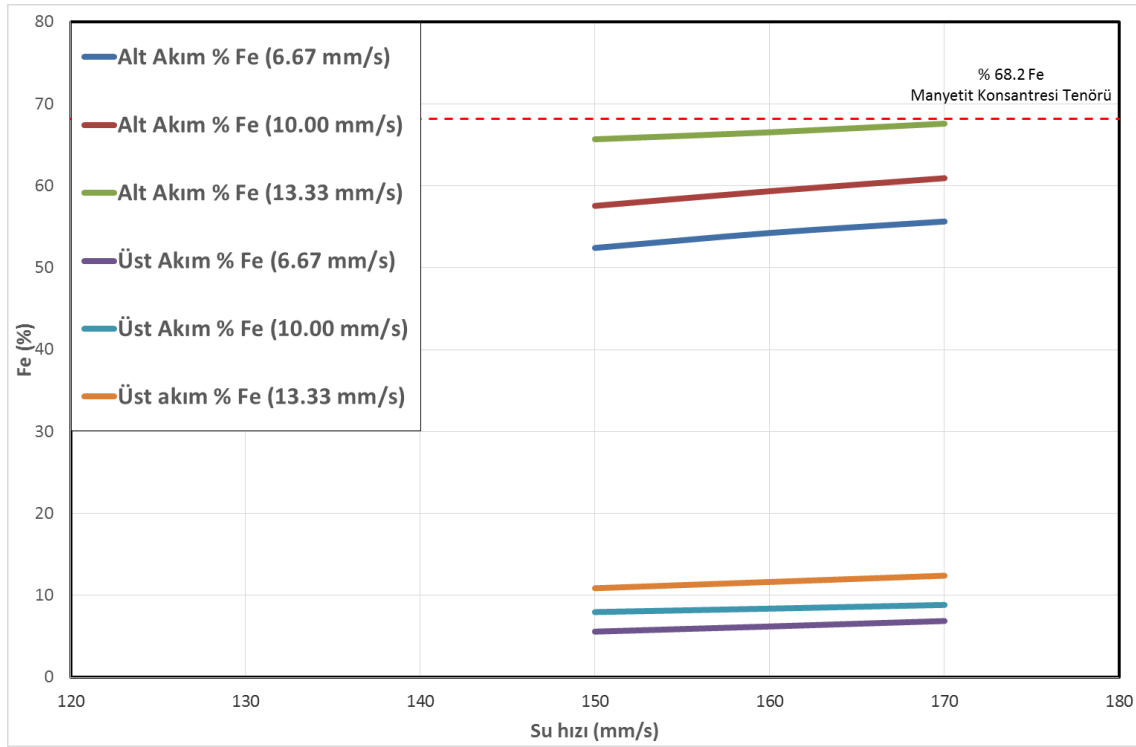
Şekil 4.30 13.33 mm/s hızdaki yıkama suyu ile yapılan testlere ait devre etrafı tane boyu dağılımları

Yapay karışım numunesi ile yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde kuvars ve manyetit numunesine benzer şekilde su hızı ve basınç değerleri arttıkça alt ve üst akımın tane boyu dağılımlarının irileştiği görülmektedir. Bu durum su hızı ve basıncın artmasının daha iri tanelerinde üst akıma taşınabildiğinin bir göstergesidir. Karışım numunesi ile yapılan çalışmalara ait detaylı bilgi madde denkliği ve performans değerlendirme çalışmaları başlığı altında verilecektir.

Yapay karışım numunesi ile yapılan testler sonucunda elde edilen tüm numunelere ait demir tenör ve verimleri Çizelge 4.24'te su hızı ve basınca göre alt akım ve üst akım demir tenörleri ise Şekil 4.31'de verilmektedir.

Çizelge 4.24 Karışım numunesine ait demir tenör ve verim değerleri

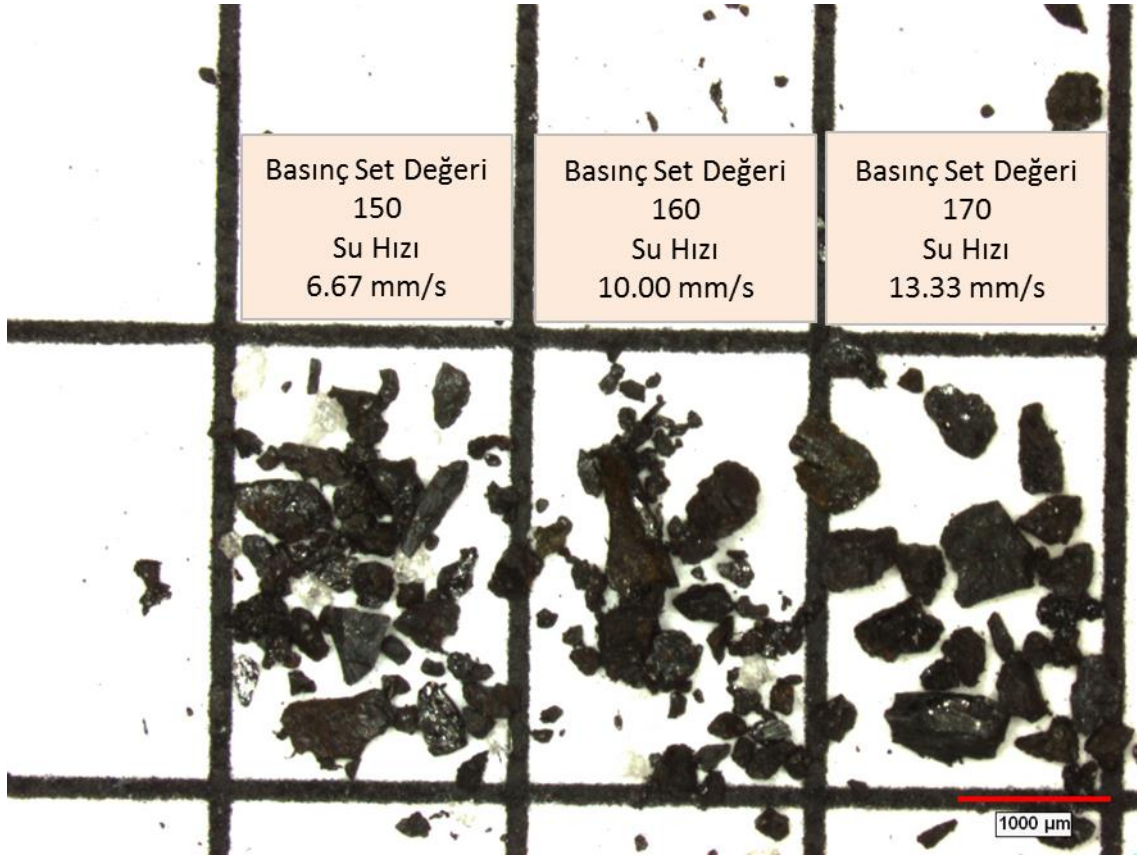
Basınç Set Değeri 150 (5.886 kPa)						
Su hızı (mm/s)	Fe (%) Alt Akım	Verim (%) Alt Akım	Fe (%) Üst Akım	Verim (%) Üst Akım	Fe (%) Besleme	Verim (%) Besleme
6.67	52.41	95.20	5.57	4.80	37.34	100.00
10.00	57.54	92.51	7.97	7.49	39.25	100.00
13.33	65.67	90.51	10.88	9.49	44.43	100.00
Basınç Set Değeri 160 (6.278 kPa)						
Su hızı (mm/s)	Fe (%) Alt Akım	Verim (%) Alt Akım	Fe (%) Üst Akım	Verim (%) Üst Akım	Fe (%) Besleme	Verim (%) Besleme
6.67	54.23	93.23	6.20	6.77	35.58	100.00
10.00	59.33	91.13	8.38	8.87	38.55	100.00
13.33	66.52	87.03	11.64	12.97	41.28	100.00
Basınç Set Değeri 170 (6.671 kPa)						
Su hızı (mm/s)	Fe (%) Alt Akım	Verim (%) Alt Akım	Fe (%) Üst Akım	Verim (%) Üst Akım	Fe (%) Besleme	Verim (%) Besleme
6.67	55.64	90.98	6.87	9.02	33.93	100.00
10.00	60.92	89.06	8.84	10.94	37.04	100.00
13.33	67.58	77.86	12.41	22.14	34.06	100.00



Şekil 4.31 Yapay karışım numunesine ait alt akım ve üst akım tenör değişimleri

Şekil 4.31 incelendiğinde alt akım demir tenörünün % 52.41 değerinden % 67.58 değerine kadar yükseldiği ve bu koşulda % 77.86 verim değerinde elde edilebildiği görülmektedir. Ancak buna karşın üst akım demir tenörü değerleri de % 5.57'den %12.41'e yükselmektedir. Bu durum yukarı yönlü su hızı ve basıncın artmasıyla birlikte hidrolik kaldırma kuvvetinin de artması ve daha fazla demir içeren mineralin üst akımdan alınması anlamına gelmektedir. Ancak hem alt akım hem de üst akım demir tenörlerindeki değişime bakıldığında tenör değişimini etkileyen ana unsurun yukarı yönlü su hızı olduğu açıkça görülmektedir.

En düşük su hızı ve basınç ile en yüksek su hızı ve basınç değerlerinde alınan alt akım numunelerine ait optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.32'de verilmektedir.



Şekil 4.32 Yapay karışım numunesi ile yapılan çalışmalar sırasında farklı koşullarda alınan kabaran yataklı sınıflandırıcı alt akım numuneleri

Şekil 4.32 incelendiğinde düşük basınç ve su hızı değerlerinde alt akımda kuvars taneleri ve ince boyda demir taneleri görülmektedir. Ancak su hızı ve basınç değerinin artmasıyla birlikte öncelikle nispeten daha iri olan kuvars taneleri ve en yüksek koşulda ise yoğunluğu yüksek olmasına rağmen ince demir taneleri de alt akıma gelememektedir. Bu durum alt akım demir tenörünü artırırken üst akıma kaçan demir miktarı nedeniyle alt akım verimini düşürmektedir.

Bu durumun önüne geçilebilmek için karışım numunesinin daha dar bir tane boyu aralığında beslenmesi gerekliliği açıkça görülmektedir. Ayrıca alt akımda yüksek tenör değerleri yüksek basınç set değerlerinde elde edilmektedir. Bu durum yoğunluğa göre ayırım yapılması gereken durumlarda asgari bir yatak yoğunluğunun sağlanması gerektiğini de açıkça göstermektedir.

Sonuç olarak yukarı yönlü su hızının artması sonucu ince tanelerde meydana gelen verim kaybını önlemek amacıyla beslemenin dar tane boyu fraksiyonlarında

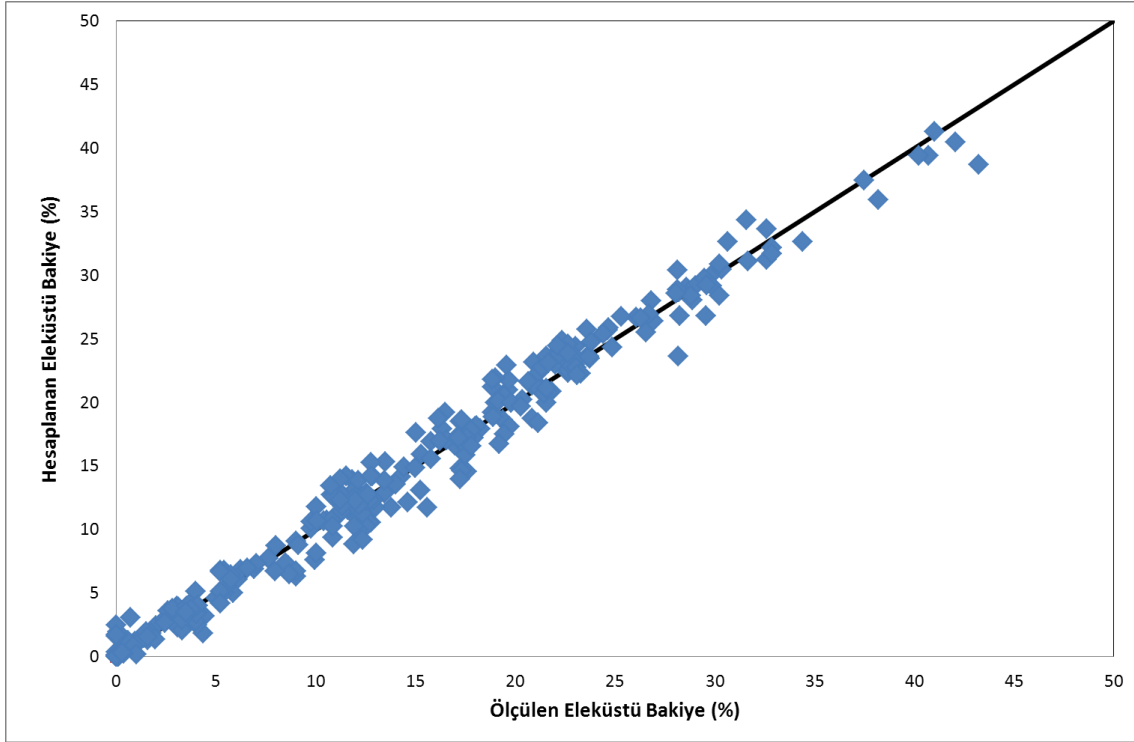
hazırlanması ve yoğunluk farkına göre ayrımı sağlamak amacıyla yüksek yoğunluk/basınç değerlerinde çalışması gerektiği düşünülmektedir.

4.3. Madde Denkliği ve Performans Değerlendirme Çalışmaları

Herhangi bir örnekleme çalışması sırasında, sistemin dinamik yapısından, fiziksel koşullardan, ölçümsel hatalardan ve insan faktöründen kaynaklanan bazı hatalar ortaya çıkmaktadır. Madde denkliği, ham verilerin istatistiksel olarak hatalardan arındırılarak, devre etrafındaki akışların en iyi şekilde tahmin edilmesini kapsamaktadır.

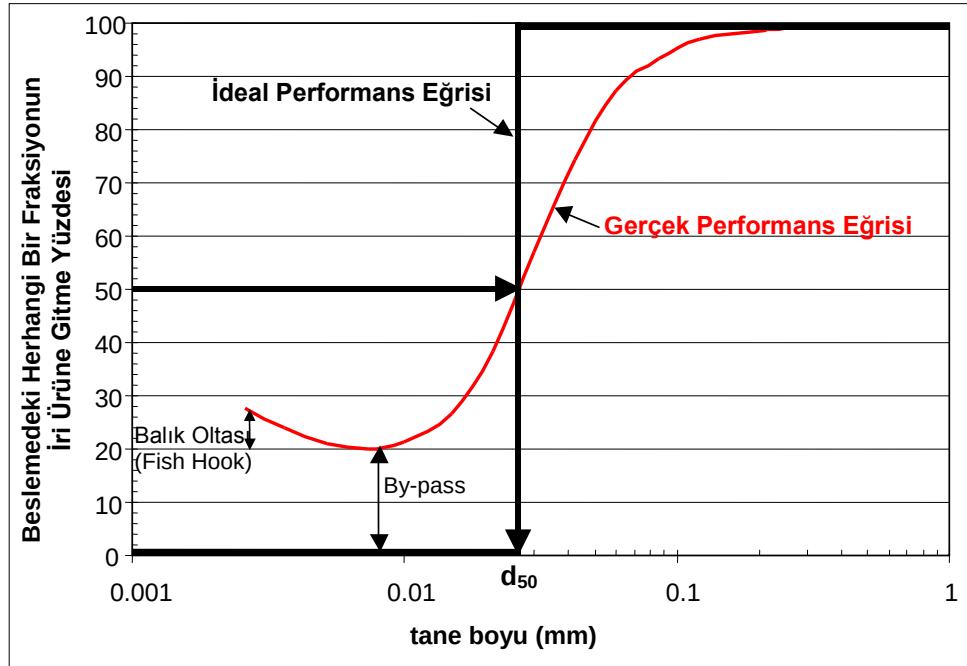
Kabaran yataklı sınıflandırıcıdan alınan devre etrafı numunelerinin tane boyu dağılımları ve ölçülen kuru katı değerleri kullanılarak madde denkliği çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar sırasında madde denkliği algoritması kullanılmıştır. Madde denkliği sonucunda devre etrafı tane boyu dağılımları istatistiksel olarak hatalardan arındırılarak düzeltilmiş ve bu değerler kullanılarak devredeki tüm kolların akış değerleri (tonajları) hesaplanmıştır.

Ölçülen tane boyu dağılım değerlerinin madde denkliği sonucunda hesaplanan (düzeltilmiş) tane boyu dağılım değerlerine çok yakın olması örnek alma işleminin sorunsuz olduğunu göstermektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm numuneler için ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları arasındaki ilişki Şekil 4.33'te verilmektedir.



Şekil 4.33 Ölçülen ve hesaplanan tane boyu değerleri arasındaki ilişki

Herhangi bir sınıflandırıcının boyut ayırımı yönünden performansı değerlendirilirken ise performans eğrisi (verimlilik veya tromp eğrisi) kullanılmaktadır. Tipik bir performans eğrisi Şekil 4.34'te verilmektedir.



Şekil 4.34 Tipik bir performans eğrisi

Şekil 4.34'te görülen verimlilik eğrisinin x-ekseninde logaritmik olarak tane boyu, y-ekseninde ise partisyon katsayısı (P_i) yer almaktadır. Partisyon katsayısı, separatör beslemesinde yer alan herhangi bir boyut fraksiyonundaki (i) malzemenin ne kadarının (%) separatör irisi olarak alındığını göstermektedir [75]. Buna göre partisyon katsayısı Eşitlik 4.1 ile hesaplanmaktadır.

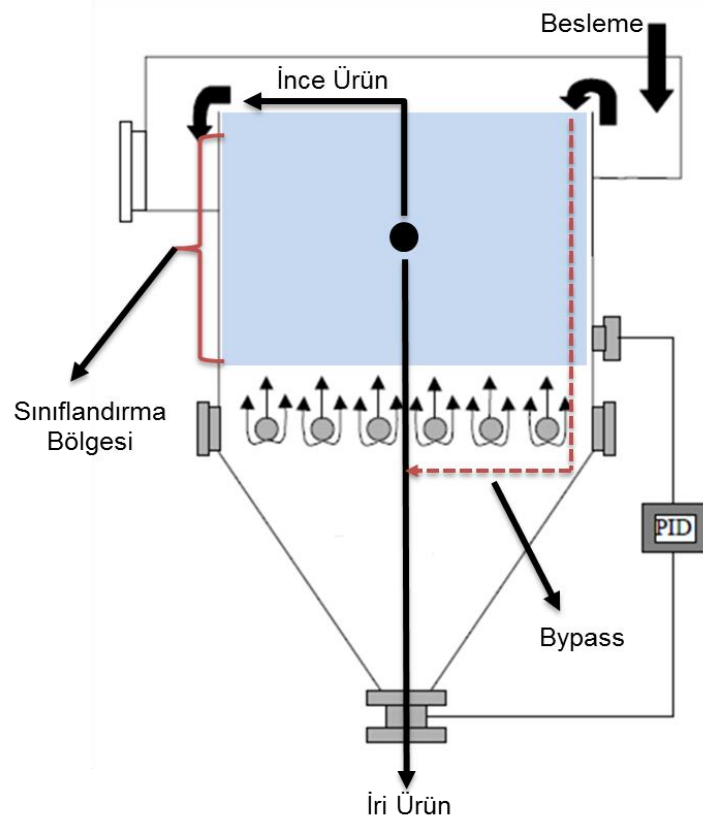
$$P_i = \frac{U \cdot u_i}{F \cdot f_i} \quad (4.1)$$

Burada,

- P_i : i tane boyu fraksiyonuna ait partisyon katsayısı,
- U : Alt akım miktarı,
- u_i : i tane boyu fraksiyonunun alt akımdaki yüzdesi,
- F : Besleme miktarı,
- f_i : i tane boyu fraksiyonunun beslemedeki yüzdesi,

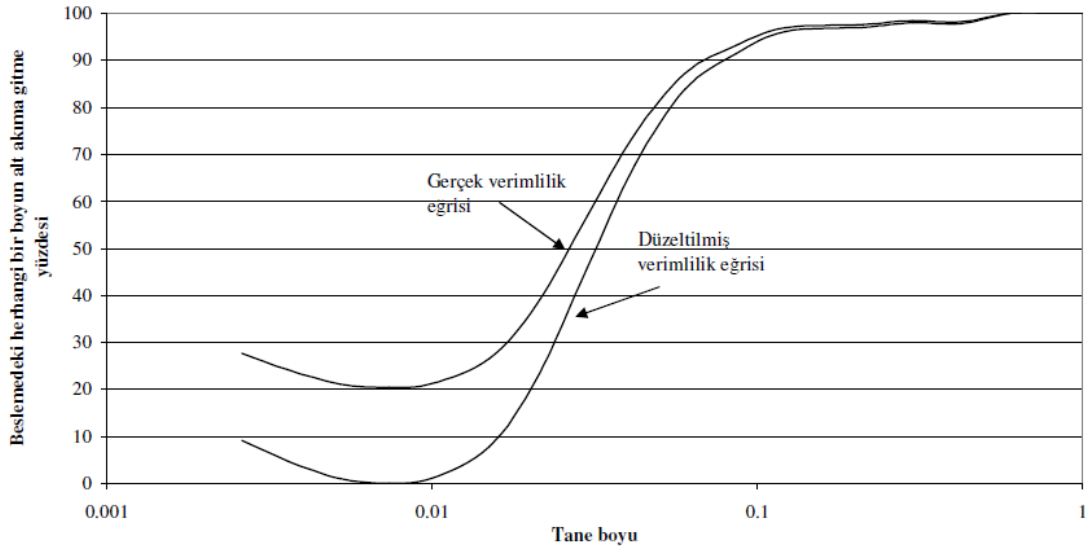
şeklinde verilmektedir.

Bu formüller sınıflandırıcıda mükemmel karışım (perfect mixing) varsayımıyla kullanılabilir. Ancak uygulamada mükemmel karışım koşulları oluşmamakta ve beslemenin bir bölümü sınıflandırmaya uğramadan, alt akıma kısa devre yaparak karışmaktadır. Performans eğrisinin ulaştığı en düşük değer kaçak, (bypass) olarak adlandırılmaktadır (Şekil 4.35). Bir başka ifade ile kaçak, sınıflandırmaya uğramadan iri ürüne giden malzeme miktarıdır. Bu değer düşük olması ayırımın iyi olduğunu göstermektedir. Verimlilik eğrisi, minimum değere ulaştıktan sonra tane boyu incelmesiyle partisyon değeri bir artış gösterir. Bu artış balık oltası etkisi (fishhook) olarak adlandırılmaktadır. Sınıflandırma sırasında ince tanelerin topaklanarak iri tane gibi davranması sonucunda ince tanelerin bir kısmının iri ürüne gitmesi sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Fakat nedeni tümüyle açıklanamamıştır [76].



Şekil 4.35 Bypass'ın şematiksel ifadesi

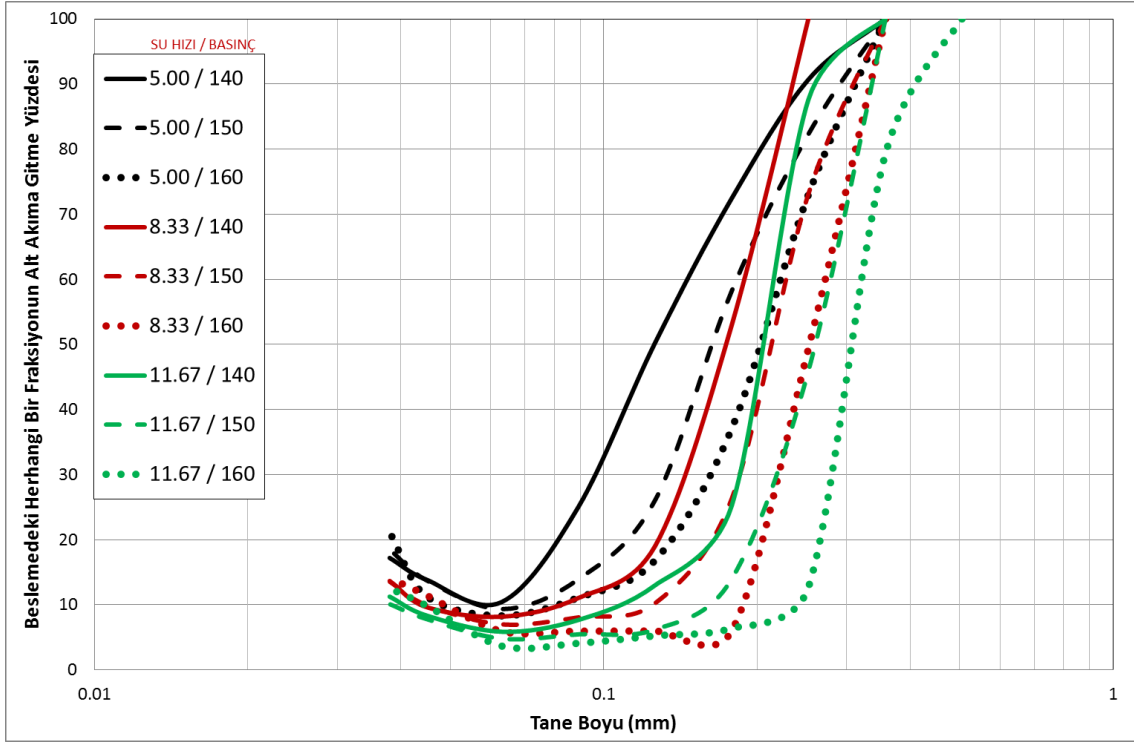
Performans eğrilerinin eğimi ayırım keskinliği hakkında bilgi vermektedir; eğrinin dikleşmesi ayırım keskinliğinin arttığını yani daha iyi bir ayırımın meydana geldiğini, eğrinin yatık hal alması ise ayırım keskinliğinin azaldığını göstermektedir. Performansın değerlendirmede kullanılan bir diğer parametre ise kaçak (by-pass) yapan malzeme oranıdır. Performans eğrisinin ulaştığı en düşük değer, kaçak yapan malzeme oranını ifade etmektedir. Bu değer düşük olması ayırımın iyi olduğu anlamına gelmektedir. Alt akıma kaçan yapan kısım sınıflandırıcı irilerinden çıkarıldıktan sonra elde edilen ve sadece sınıflandırmayı tanımlayan yeni eğriye düzeltilmiş verimlilik eğrisi adı verilmektedir (Bypass düzeltmesi). Şekil 4.36'da gerçek ve düzeltilmiş verimlilik eğrileri verilmektedir.



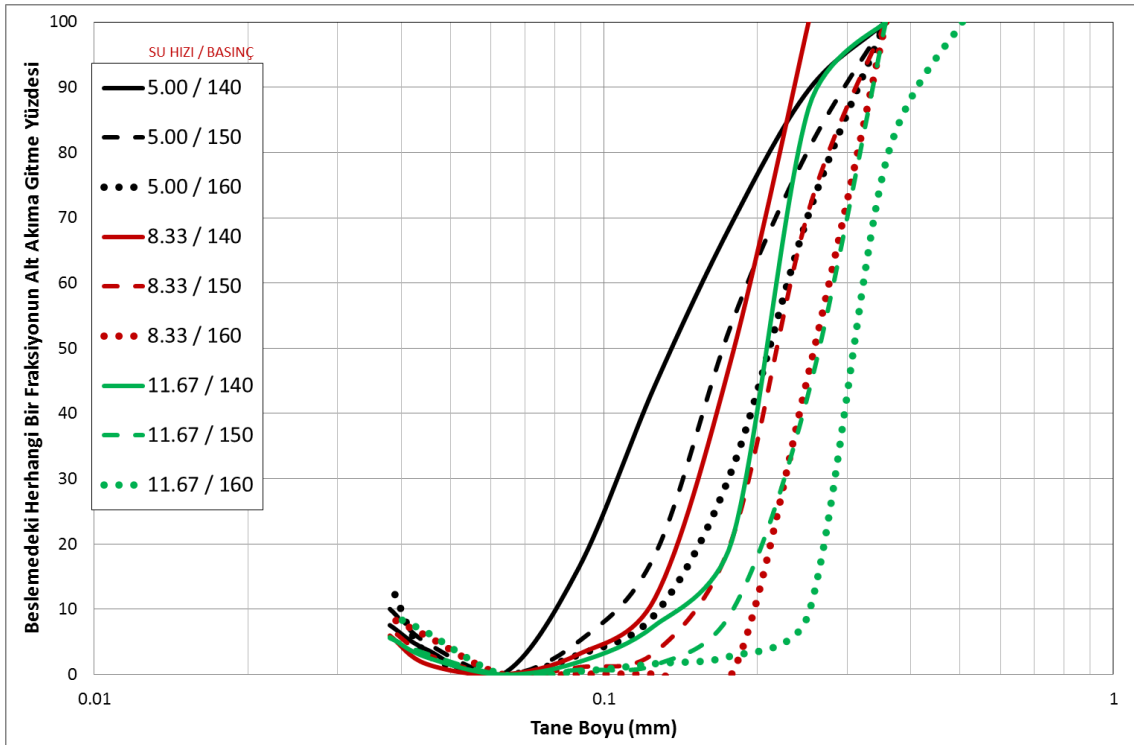
Şekil 4.36 Gerçek ve düzeltilmiş verimlilik eğrileri

Düzeltilmiş verimlilik eğrisi üzerinde %50 partiyon değerine karşılık gelen tane boyutu değeri d_{50c} olarak adlandırılmaktadır. d_{50c} sınıflandırılmış malzemede tanelerin %50'sinin incele, %50'sinin irilere gittiği boyutu göstermekte olup, ayırım boyu olarak da adlandırılmaktadır. Dolayısıyla d_{50c} 'nin küçülmesi sınıflandırıcının daha ince bir ayırım yaptığını göstermektedir. Düzeltilmiş verimlilik eğrisinde x-ekseninde d/d_{50c} değerleri kullanıldığında oluşan yeni eğri indirgenmiş verimlilik eğrisi olarak adlandırılmaktadır. Bu eğri, sınıflandırıcı performansının işletme parametrelerinden bağımsız hale getirilerek kullanılabilmesini sağlamaktadır. İşlemin keskinliği ise, partiyon eğrisinin ideal (%100 verimli) ayırımdan uzaklaşması yani kesme noktasından çizilen dik bir doğruya olan uzaklığı ile ifade edilir. Keskinliğin ampirik bir ifadesi ise E_p ile gösterilen Ecart olasılık hatasıdır. Her ne kadar eğrinin sadece yarısını ifade etse de E_p verimlilik eğrilerinin keskinliğinin hesaplanmasında kullanılan bir standart haline gelmiştir. [24]. Ayırım verimsizliği ise düzeltilmiş imperfeksiyon (I) ile ifade edilmektedir.

Kuvars kumu numunesi ile yapılan tüm testlere ait gerçek ve düzeltilmiş verimlilik eğrileri sırasıyla Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de verilmektedir.



Şekil 4.37 Kuvars kumu numunesine ait sınıflandırıcı gerçek verimlilik eğrileri



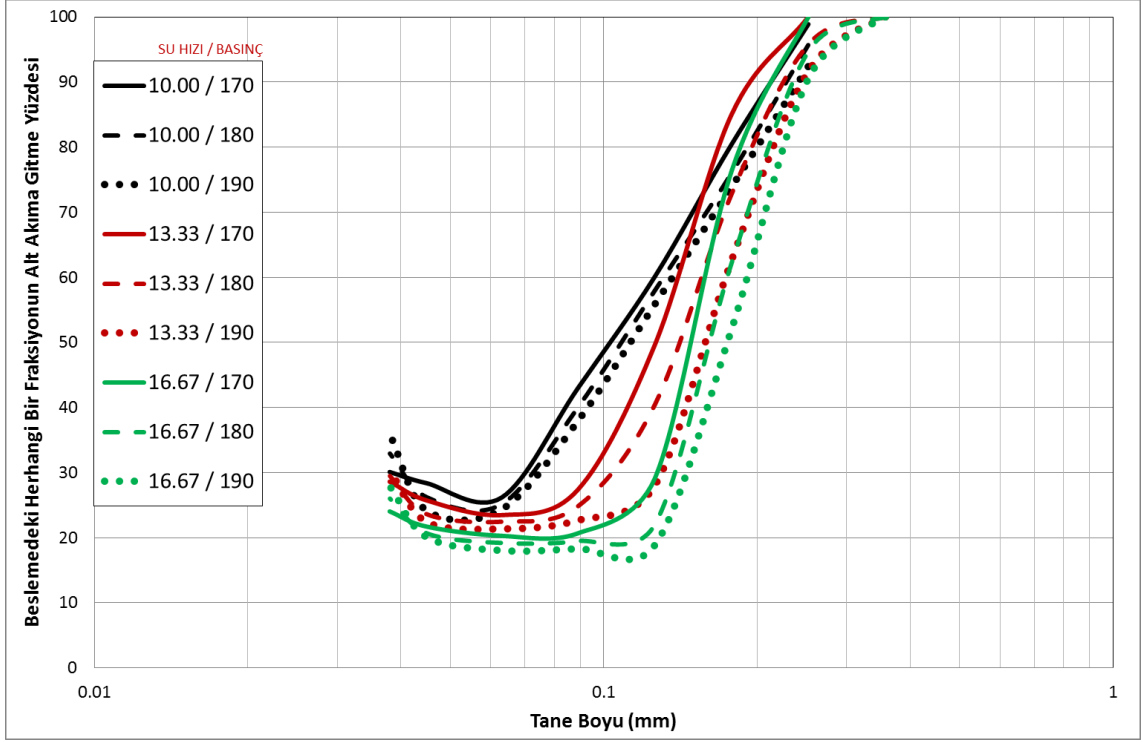
Şekil 4.38 Kuvars kumu numunesine ait sınıflandırıcı düzeltilmiş verimlilik eğrileri

Kuvars kumu numunesi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalara ait sonuçlar Çizelge 4.25'te verilmektedir.

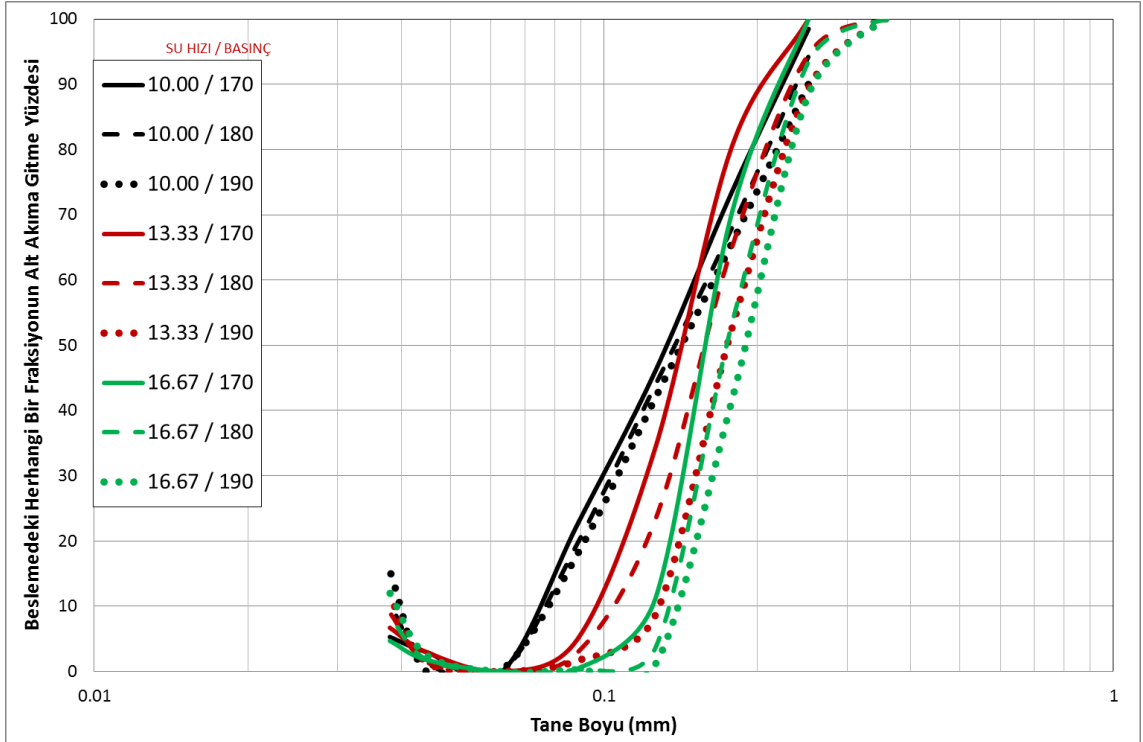
Çizelge 4.25 Kuvars kumu numunesi ile yapılan testlere ait toplu sonuçlar

Basınç Set Değeri 140 (5.494 kPa)					
Su hızı (mm/s)	Alt Akıma Kaçak (%)	Kesme Boy (mm)	Düzeltilmiş Kesme Boy (mm)	Verimsizlik	Alt Akıma Giden Miktar (%)
5.00	10.42	0.126	0.138	0.397	73.24
8.33	8.17	0.174	0.180	0.223	64.42
11.67	5.86	0.208	0.211	0.144	51.70
Basınç Set Değeri 150 (5.886 kPa)					
Su hızı (mm/s)	Alt Akıma Kaçak (%)	Kesme Boy (mm)	Düzeltilmiş Kesme Boy (mm)	Verimsizlik	Alt Akıma Giden Miktar (%)
5.00	9.34	0.165	0.172	0.320	62.02
8.33	7.05	0.216	0.221	0.198	47.30
11.67	4.76	0.260	0.265	0.135	34.68
Basınç Set Değeri 160 (6.278 kPa)					
Su hızı (mm/s)	Alt Akıma Kaçak (%)	Kesme Boy (mm)	Düzeltilmiş Kesme Boy (mm)	Verimsizlik	Alt Akıma Giden Miktar (%)
5.00	8.25	0.205	0.213	0.275	51.55
8.33	5.95	0.253	0.259	0.187	33.64
11.67	3.64	0.311	0.314	0.127	19.31

Manyetit konsantresi ile yapılan tüm testlere ait gerçek ve düzeltilmiş verimlilik eğrileri sırasıyla Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'da verilmektedir.



Şekil 4.39 Manyetit konsantresine ait sınıflandırıcı gerçek verimlilik eğrileri



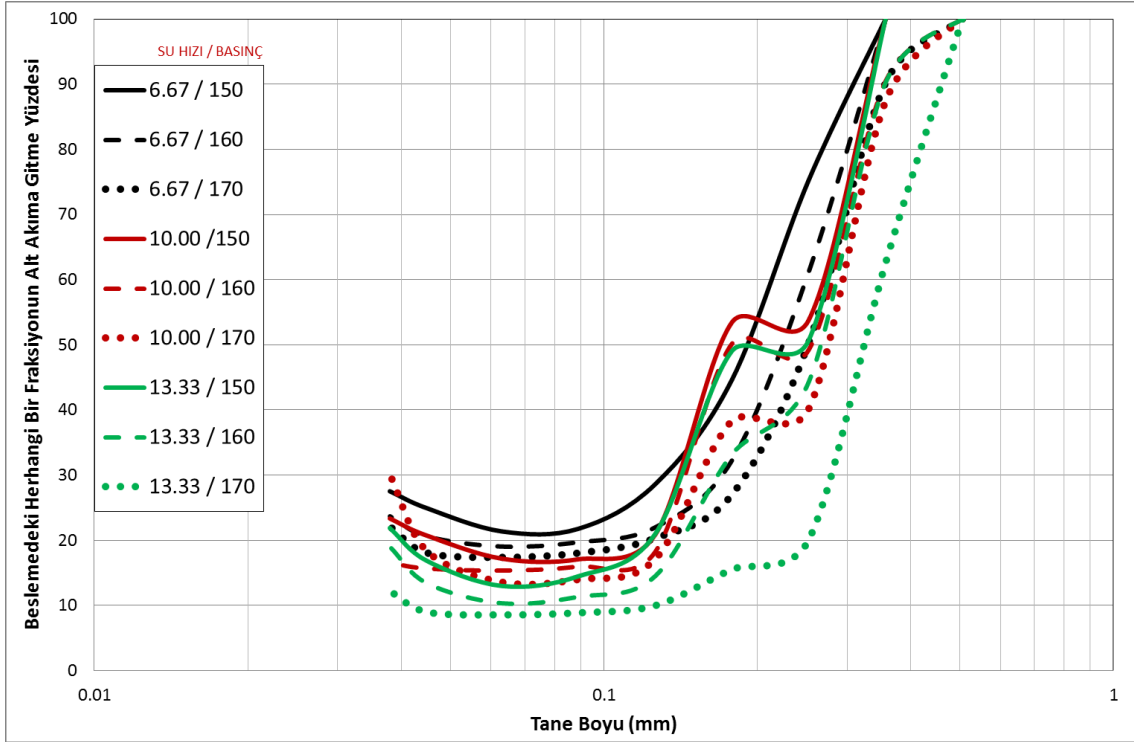
Şekil 4.40 Manyetit konsantresine ait sınıflandırıcı düzeltilmiş verimlilik eğrileri

Manyetit konsantresi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalara ait sonuçlar Çizelge 4.26'da verilmektedir.

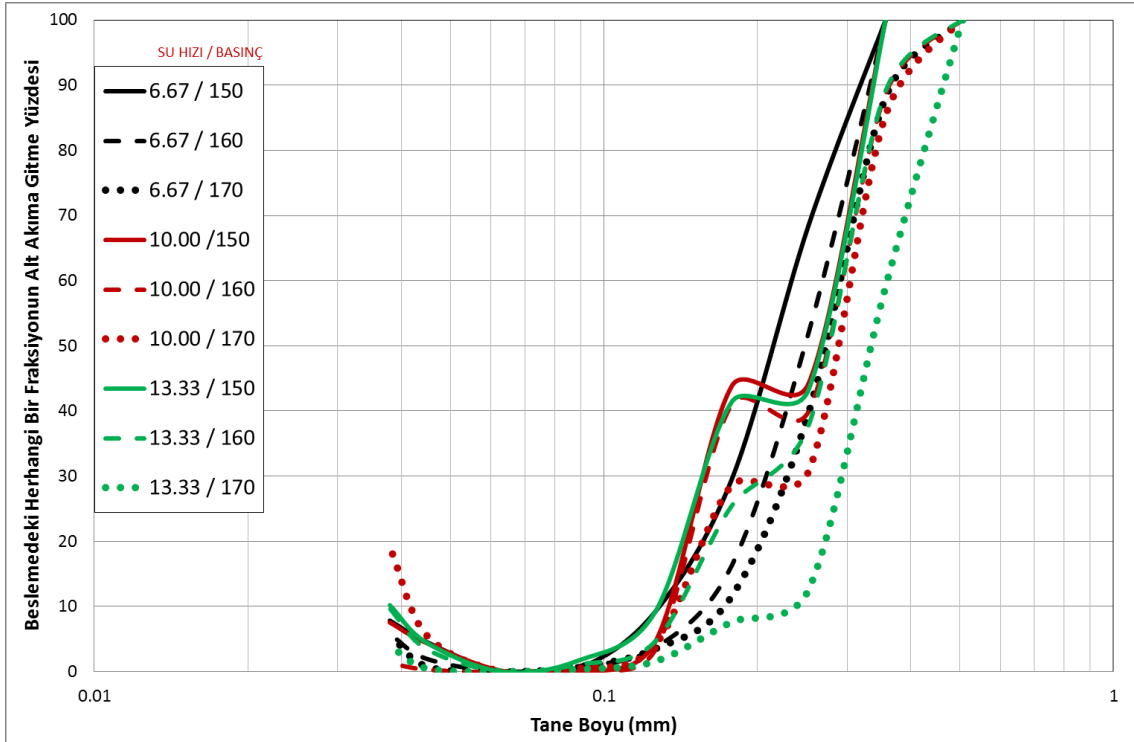
Çizelge 4.26 Manyetit konsantresi ile yapılan testlere ait toplu sonuçlar

Basınç Set Değeri 170 (6.671 kPa)					
Su hızı (mm/s)	Alt Akıma Kaçak (%)	Kesme Boyu (mm)	Düzeltilmiş Kesme Boyu (mm)	Verimsizlik	Alt Akıma Giden Miktar (%)
10.00	26.17	0.104	0.132	0.494	86.42
13.33	23.48	0.127	0.144	0.356	85.28
16.67	20.29	0.149	0.160	0.222	81.66
Basınç Set Değeri 180 (7.063 kPa)					
Su hızı (mm/s)	Alt Akıma Kaçak (%)	Kesme Boyu (mm)	Düzeltilmiş Kesme Boyu (mm)	Verimsizlik	Alt Akıma Giden Miktar (%)
10.00	25.19	0.110	0.139	0.514	84.92
13.33	22.45	0.141	0.159	0.338	81.95
16.67	19.16	0.162	0.175	0.238	78.18
Basınç Set Değeri 190 (7.456 kPa)					
Su hızı (mm/s)	Alt Akıma Kaçak (%)	Kesme Boyu (mm)	Düzeltilmiş Kesme Boyu (mm)	Verimsizlik	Alt Akıma Giden Miktar (%)
10.00	24.11	0.114	0.144	0.519	83.77
13.33	21.37	0.159	0.175	0.329	77.42
16.67	18.04	0.175	0.191	0.248	75.78

Karışım numunesi ile yapılan tüm testlere ait gerçek ve düzeltilmiş verimlilik eğrileri sırasıyla Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de verilmektedir.



Şekil 4.41 Karışım numunesine ait sınıflandırıcı gerçek verimlilik eğrileri



Şekil 4.42 Karışım numunesine ait sınıflandırıcı düzeltilmiş verimlilik eğrileri

Şekil 4.41 incelendiğinde orta ve yüksek su hızlarında verimlilik eğrilerinin belirli noktalarda farklılaştığı görülmektedir. Bu durumun sebebi ise kuvars ve manyetit arasındaki yoğunluk farkı nedeniyle iki farklı verimlilik eğrisinin oluşması şeklinde

açıklanabilmektedir. Ancak su hızı ve basıncın en yüksek olduğu noktada eğrinin düzeldiği görülmektedir.

Karışım numunesi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalara ait sonuçlar Çizelge 4.27’de verilmektedir.

Çizelge 4.27 Karışım numunesi ile yapılan testlere ait toplu sonuçlar

Basınç Set Değeri 150 (5.886 kPa)					
Su hızı (mm/s)	Alt Akıma Kaçak (%)	Kesme Boyu (mm)	Düzeltilmiş Kesme Boyu (mm)	Verimsizlik	Alt Akıma Giden Miktar (%)
6.67	21.37	0.191	0.217	0.379	67.82
10.00	17.09	0.205	0.263	0.485	63.10
13.33	13.00	0.222	0.265	0.384	61.24
Basınç Set Değeri 160 (6.278 kPa)					
Su hızı (mm/s)	Alt Akıma Kaçak (%)	Kesme Boyu (mm)	Düzeltilmiş Kesme Boyu (mm)	Verimsizlik	Alt Akıma Giden Miktar (%)
6.67	19.01	0.224	0.248	0.331	61.17
10.00	15.38	0.254	0.274	0.355	59.21
13.33	10.38	0.265	0.277	0.315	54.01
Basınç Set Değeri 170 (6.671 kPa)					
Su hızı (mm/s)	Alt Akıma Kaçak (%)	Kesme Boyu (mm)	Düzeltilmiş Kesme Boyu (mm)	Verimsizlik	Alt Akıma Giden Miktar (%)
6.67	17.34	0.251	0.274	0.307	55.49
10.00	13.58	0.274	0.289	0.336	54.15
13.33	8.61	0.326	0.337	0.218	39.24

5. MODELLEME VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Yürütülen çalışmalar sonucunda elde edilen veriler kullanılarak yapılan madde denkliği çalışmaları ile ekipman etrafındaki boyut dağılımları istatistiksel olarak hatalardan arındırılmış ve akış değerleri hesaplanmıştır. Bu aşamadan sonra modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Modelleme kısmında özetle yapılan iş, ekipman etrafındaki boyut dağılımları ile akış değerlerinin en iyi şekilde tahmin edilmesini sağlayan model parametrelerinin belirlenmesidir.

Bu aşamada, separatör verimlilik eğrisini en iyi tanımlayan yaklaşım olan Whiten yaklaşımı temel alınmıştır. Separatör verimlilik eğrisini tanımlayan α , β , β^* , C ve d_{50c} parametrelerinin belirlenmesinde bu yaklaşım oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca, balık oltası (fishhook) etkisini de oldukça iyi bir şekilde tanımlayabilmektedir [77]. Bu parametrelerin işlem değişkenleri olan basınç ve su hızına bağlı olarak belirlenmesinde MatLab programından yararlanılmıştır.

Whiten eşitliği Eşitlik 5.1'de verilmektedir.

$$E_{OA} = C \left[\frac{(1 + \beta\beta^*x)(e^\alpha - 1)}{e^{(\alpha\beta^*x)} + e^\alpha - 2} \right] \quad (5.1)$$

Burada,

- E_{OA} : Partisyon katsayısı,
- C : 1-kaçak miktarı,
- β : Balık oltası değeri (fishhook)
- β^* : Düzenleme parametresi
- x : d_i / d_{50c}
- α : Ayrım keskinliğini ifade eden parametre

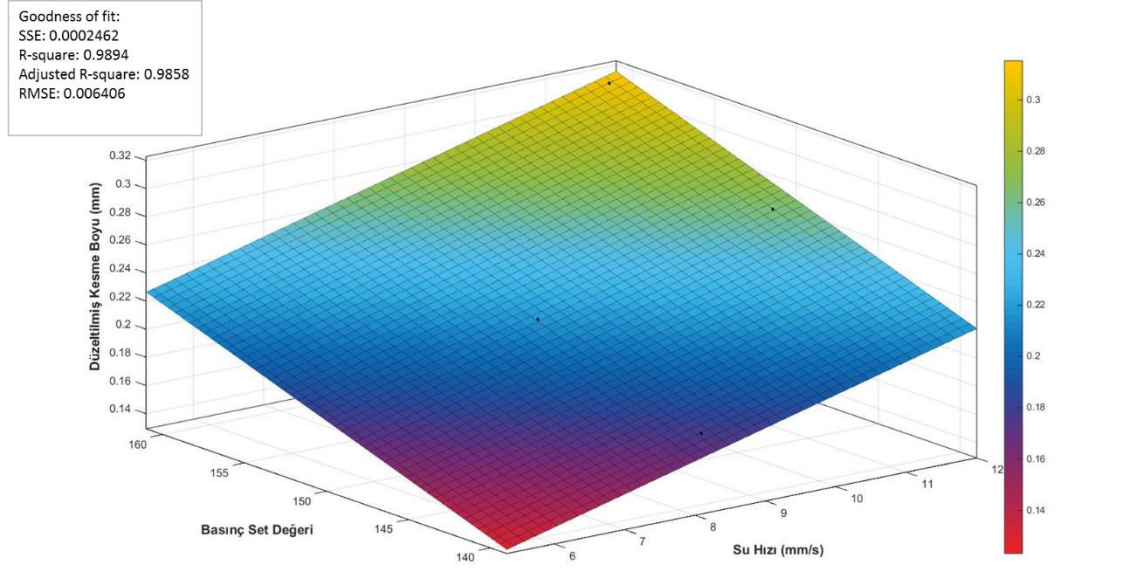
şeklinde verilmektedir.

5.1. Kuvars Kumu Modelleme Çalışmaları

Kuvars kumu ile yürütülen modelleme çalışmaları sırasında Eşitlik 5.1'de verilen model parametreleri işletim parametreleri ile ilişkilendirilerek MatLab programı üzerinden doğrusal regresyon yöntemi ile çözülmüştür.

Sınıflandırıcının ayırım performansının tahmini için en uygun d_{50c} parametresinin belirlenmesi amacıyla madde denkliği çalışmalarından elde edilen düzeltilmiş

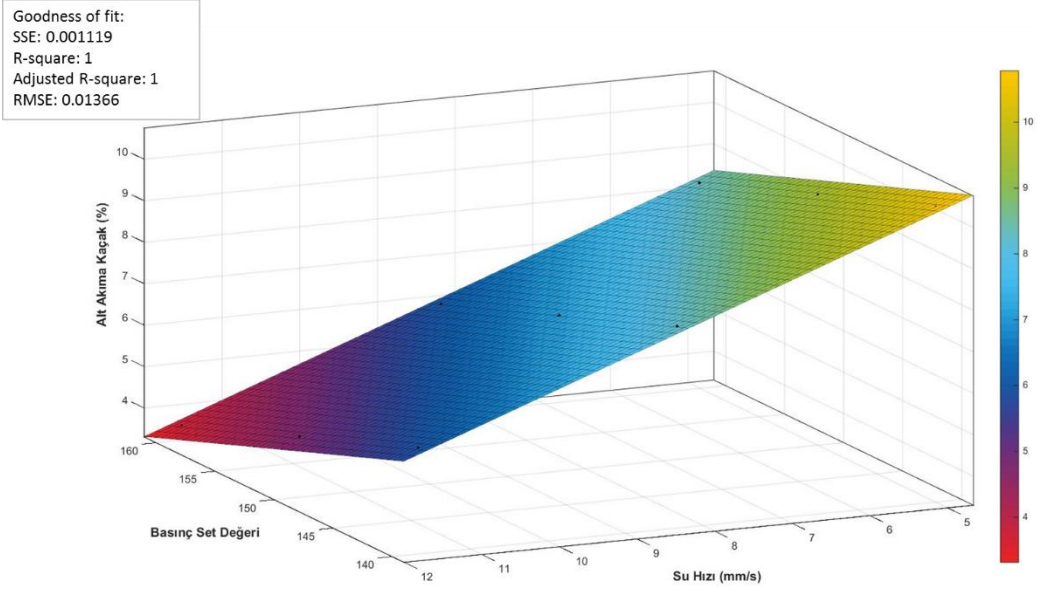
kesme boyu değerleri kullanılmıştır. Düzeltilmiş kesme boyu değerlerinin işlem değişkenleri ile ilişkisi şekil 5.1'de verilmektedir.



şekil 5.1 Düzeltilmiş kesme boyu ve işlem değişkenleri arasındaki ilişki

şekil 5.1 incelendiğinde d_{50c} değerinin en düşük su hızı ve basınç değerinde minimum, en yüksek su hızı ve basınç değerinde maksimum değerini aldığı görölmektedir. Ayrıca d_{50c} parametresinin su hızı ile daha belirgin bir şekilde değiştiği de açıkça görölmektedir.

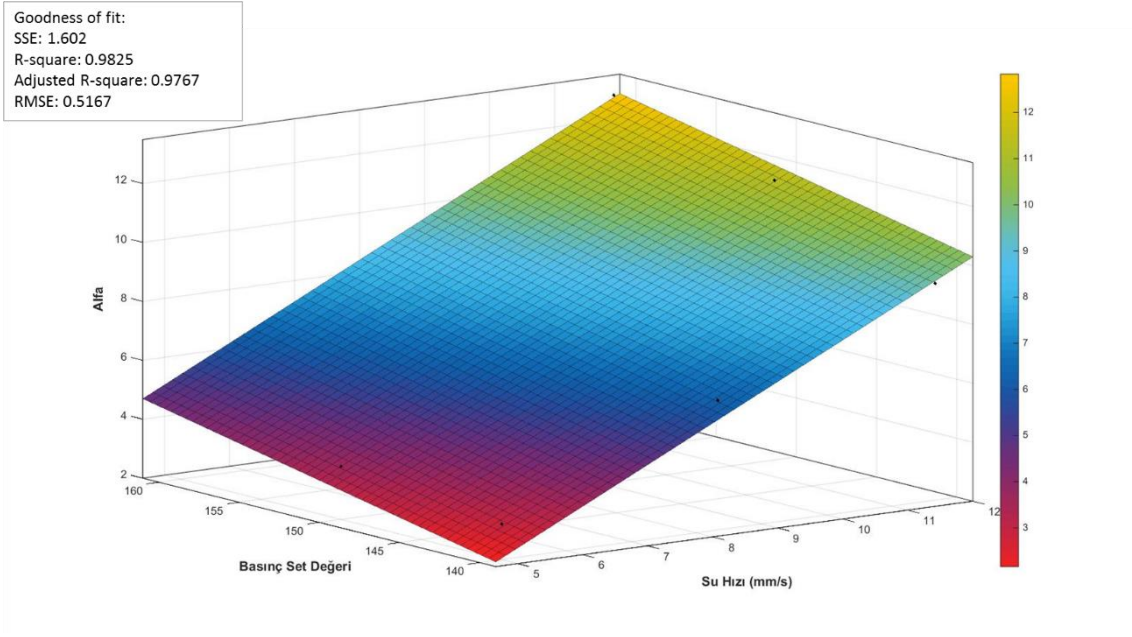
C (1-Kaçak) parametresinin belirlenmesi amacıyla madde denkliği çalışmalarından elde edilen kaçak değerleri ile işletim parametreleri ilişkilendirilerek programda çözümü yapılmıştır. Daha sonra bu değerlerden C değerine geçiş yapılmıştır. kaçak değerinin işlem değişkenleri ile ilişkisi şekil 5.2'de verilmektedir.



Şekil 5.2 Kaçak değerleri ve işlem değişkenleri arasındaki ilişki

Şekil 5.2 incelendiğinde alt akıma kaçak miktarının en düşük su hızı ve basınç değerinde maksimum, en yüksek su hızı ve basınç değerinde minimum değerini aldığı görülmektedir. Ayrıca kaçak değerinin su hızı ile daha belirgin bir şekilde değiştiği de açıkça görülmektedir.

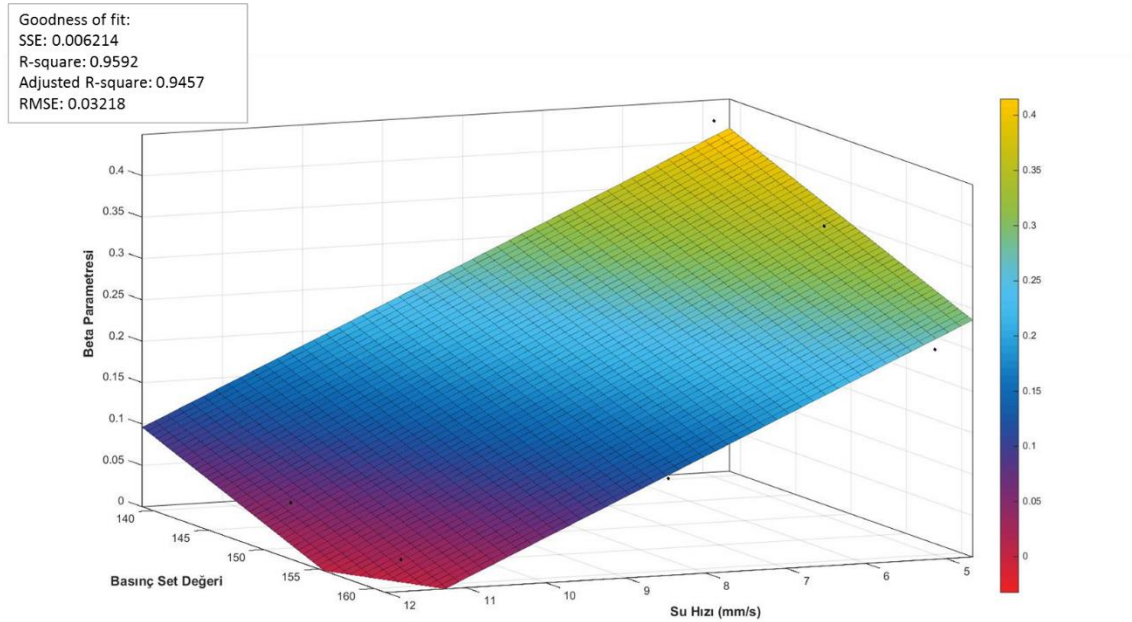
Düzeltilmiş kesme boyu d_{50c} ve C (100-kaçak) parametrelerinin belirlenmesinin ardından her koşul için bu değerler sabit tutularak diğer parametreler belirlenmiş ve işlem değişkenleri ile ilişkileri incelenmiştir. Alfa parametresi ile işlem değişkenleri arasındaki ilişki Şekil 5.3'te verilmektedir.



Şekil 5.3 Alfa parametresi ve işlem değişkenleri arasındaki ilişki

Şekil 5.3 incelendiğinde sınıflandırıcı ayırım keskinliğini ifade eden alfa parametresinin su hızı ile birlikte yükseldiği görülmektedir. Alfa değerinin yükselmesi ise sınıflandırıcının daha verimli bir ayırım yaptığını göstermektedir.

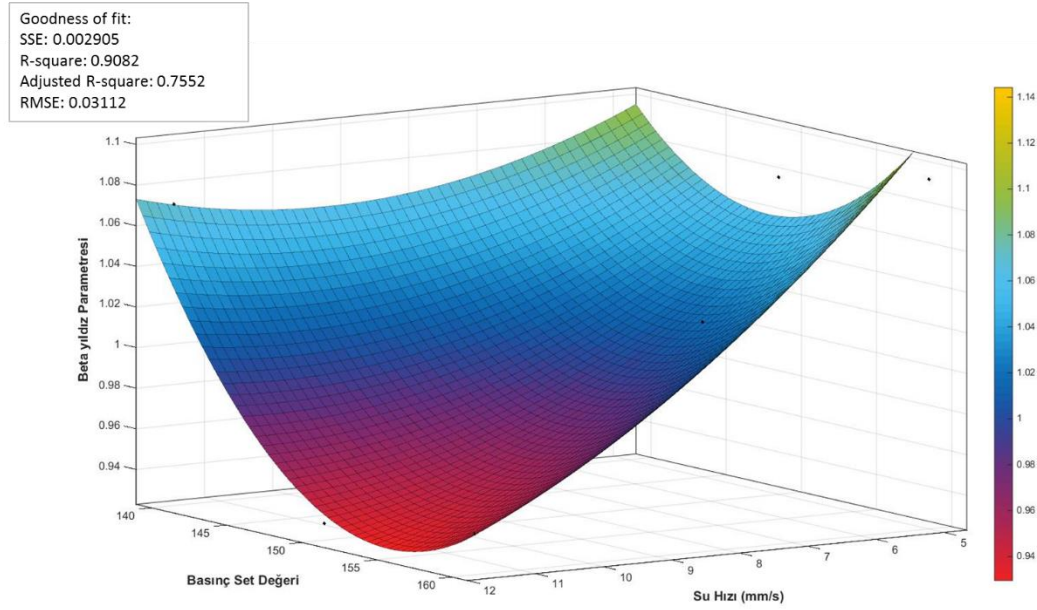
Beta parametresinin işlem değişkenleri ile ilişkisi Şekil 5.4'te verilmektedir.



Şekil 5.4 Beta parametresi ve işlem değişkenleri arasındaki ilişki

Şekil 5.4 incelendiğinde beta parametresi yüksek su hızı ve basınç koşullarında en düşük değerini alırken düşük su hızı ve basınç koşullarında ise en yüksek değerini almaktadır.

β^* parametresinin işlem değişkenleri ile ilişkisi Şekil 5.5'te verilmektedir.



Şekil 5.5 β^* parametresi ve işlem değişkenleri arasındaki ilişki

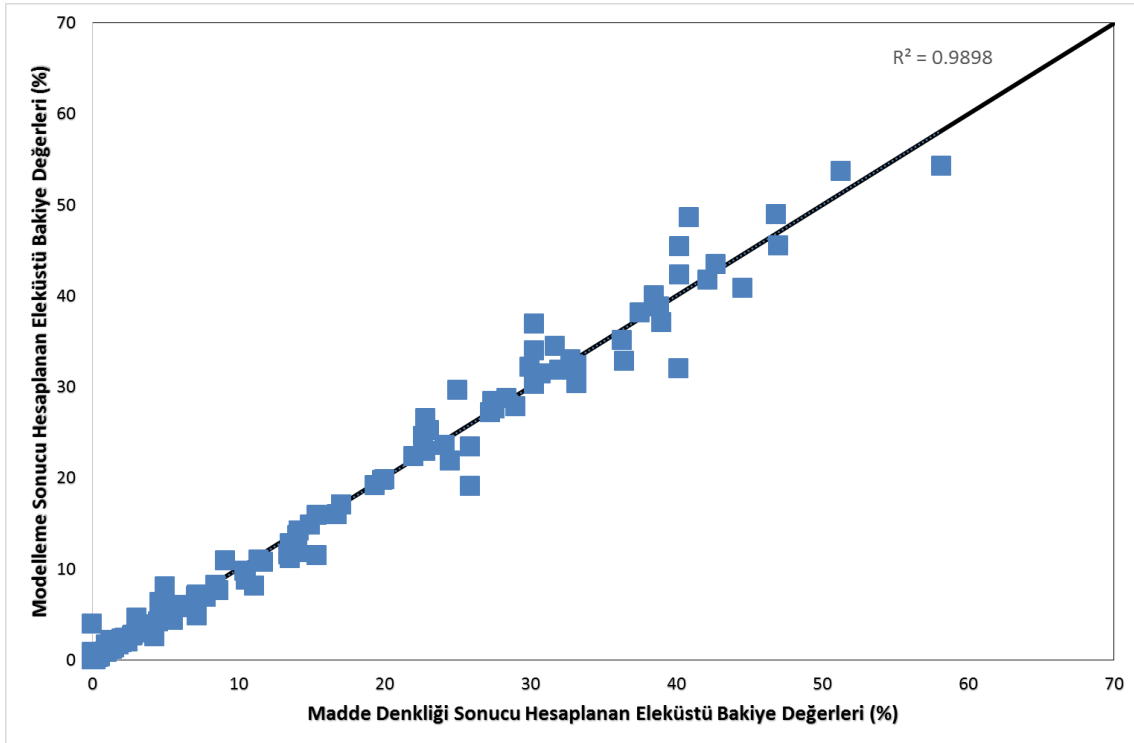
Şekil 5.5 incelendiğinde β^* parametresinin işlem değişkenleri ile karmaşık bir ilişkisi olduğu görülmektedir. Bu ilişki ikinci dereceden polinom kullanılarak çözülmüştür.

Kuvars numunesi için hesaplanan model parametreleri, güven aralıkları ve hata değerleri Çizelge 5.1'de verilmektedir.

Çizelge 5.1 Kuvars kumu numunesine ait model parametreleri

Model Parametresi	Eşitlik	Güven Aralığı (R^2)	Hatalar Toplamı (SSE)
d_{50c}	$-0.5345 + (0.01334 \cdot Su) + (0.004283 \cdot Basınç)$	0.9894	0.0002462
C	$100 - (29.3 - (0.6872 \cdot Su) - (0.1102 \cdot Basınç))$	1	0.001119
α	$(1.108 \cdot Su) + (0.1153 \cdot Basınç) - 19.04$	0.9825	1.602
β	$1.428 - (0.04343 \cdot Su \text{ Hızı}) - (0.005833 \cdot Basınç)$	0.9592	0.006214

Kuvars kumu için oluşturulan modelin ardından herbir koşulun kendini ve diğer koşulları tahmini için model denenmiş ve madde denklığı sonucunda hesaplanan performans eğrilerine çok yakın değerler elde edilmiştir. Modelin tahmin gücünün anlaşılabilmesi için madde denklığı sonucunda hesaplanan ekipman etafı tane boyu dağılımları ile model ile hesaplanan değerler eleküstü bakiye olarak karşılaştırılmıştır. Hesaplama ve model değerlerinin “y=x” doğrusu üzerinde birleştiği net bir şekilde görülmektedir. Bu değerlerin birbirine çok yakın olması modelin tahmin gücünün yüksek olduğunu göstermektedir (Şekil 5.6).

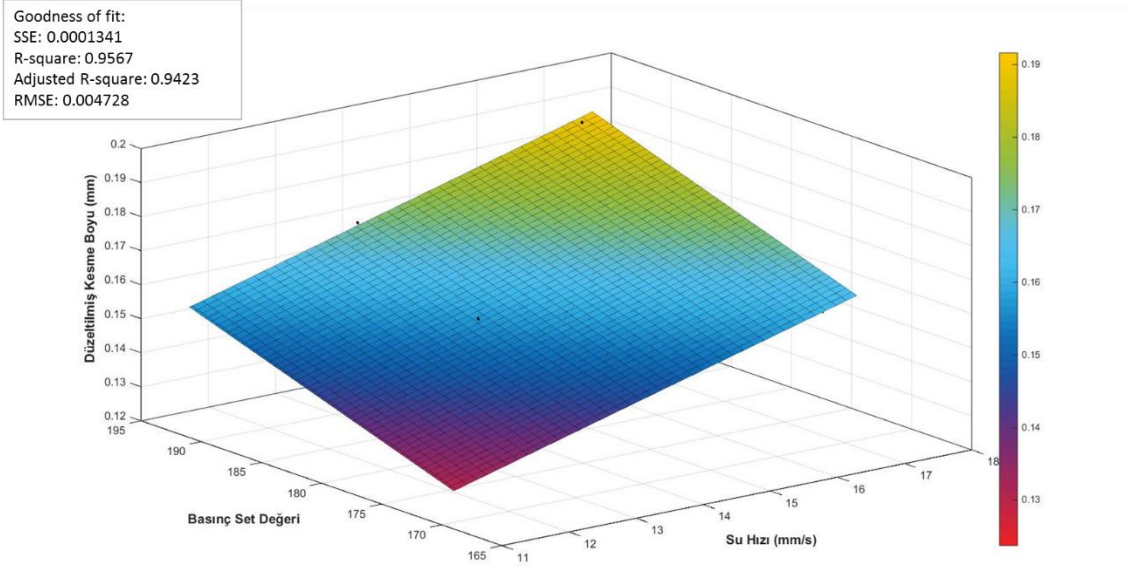


Şekil 5.6 Madde denklığı ve modelleme sonucu hesaplanan eleküstü bakiye değerlerinin karşılaştırılması

5.2. Manyetit Konsantresi Modelleme Çalışmaları

Manyetit konsantresi sınıflandırma işleminin modellenmesi için kuvars kumu ile aynı yöntem kullanılmıştır.

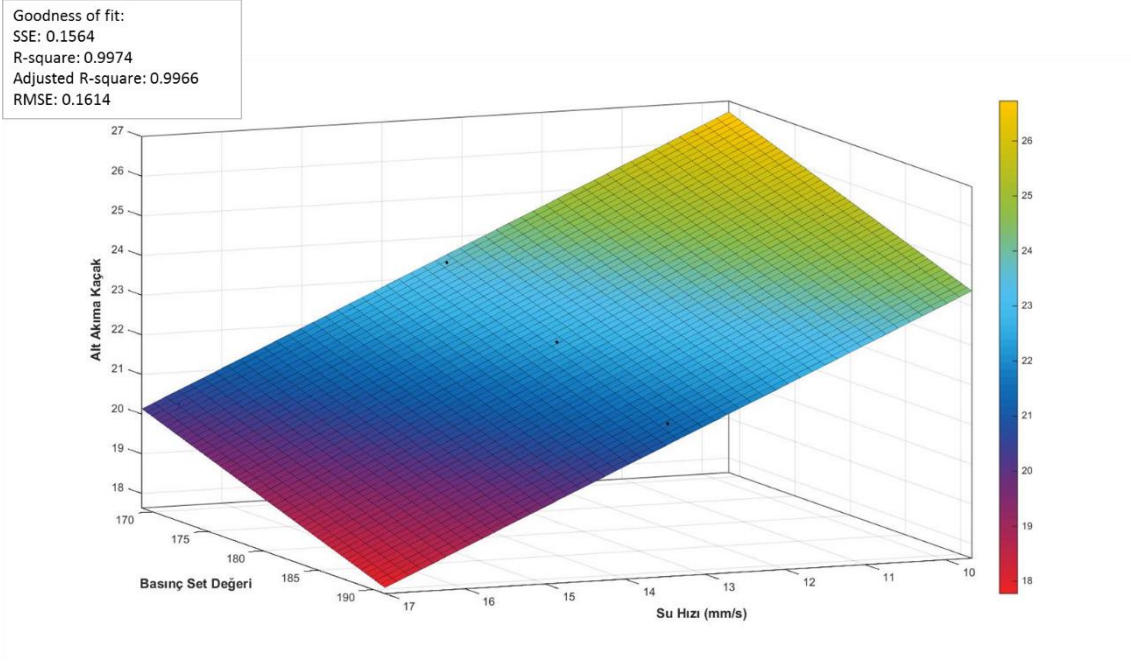
Sınıflandırıcının ayırım performansının tahmini için en uygun d_{50c} parametresinin belirlenmesi amacıyla madde denklığı çalışmalarından elde edilen düzeltilmiş kesme boyu değerleri kullanılmıştır. Düzeltilmiş kesme boyu değerlerinin işlem değişkenleri ile ilişkisi Şekil 5.7’de verilmektedir.



Şekil 5.7 Düzeltilmiş kesme boyu ve işlem değişkenleri arasındaki ilişki

Şekil 5.7 incelendiğinde d_{50c} değerinin en düşük su hızı ve basınç değerinde minimum, en yüksek su hızı ve basınç değerinde maksimum değerini aldığı görülmektedir. Ayrıca d_{50c} parametresinin su hızı ile daha belirgin bir şekilde değiştiği de açıkça görülmektedir.

C (1-Kaçak) parametresinin belirlenmesi amacıyla madde denkliği çalışmalarından elde edilen kaçak değerleri ile işletim parametreleri ilişkilendirilerek programda çözümü yapılmıştır. Daha sonra bu değerlerden C değerine geçiş yapılmıştır. kaçak değerinin işlem değişkenleri ile ilişkisi Şekil 5.8'de verilmektedir.

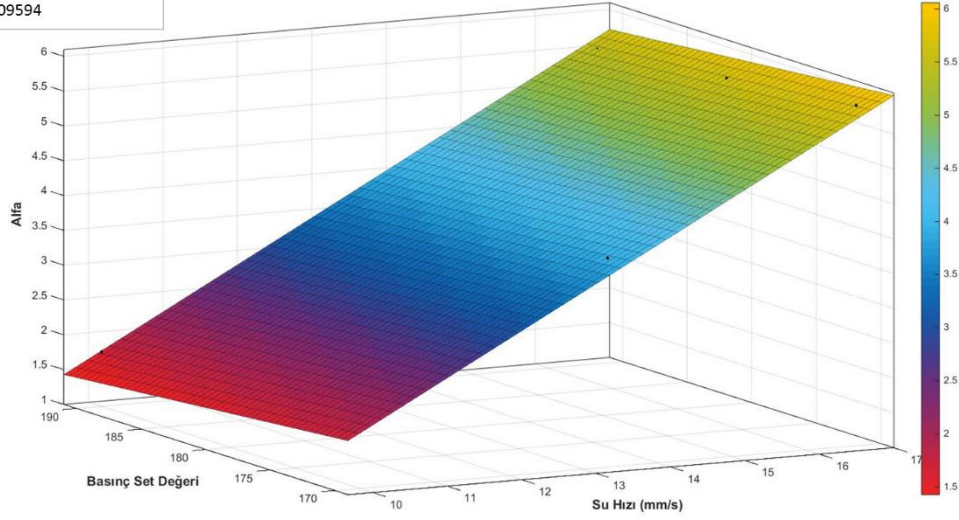


Şekil 5.8 Kaçak değerleri ve işlem değişkenleri arasındaki ilişki

Şekil 5.8 incelendiğinde alt akıma kaçak miktarının en düşük su hızı ve basınç değerinde maksimum, en yüksek su hızı ve basınç değerinde minimum değerini aldığı görülmektedir. Ayrıca kaçak değerinin su hızı ile daha belirgin bir şekilde değiştiği de açıkça görülmektedir.

Düzeltilmiş kesme boyu d_{50c} ve C (100-kaçak) parametrelerinin belirlenmesinin ardından her koşul için bu değerler sabit tutularak diğer parametreler belirlenmiş ve işlem değişkenleri ile ilişkileri incelenmiştir. Alfa parametresi ile işlem değişkenleri arasındaki ilişki Şekil 5.9'da verilmektedir.

Goodness of fit:
SSE: 0.05523
R-square: 0.9976
Adjusted R-square: 0.9968
RMSE: 0.09594

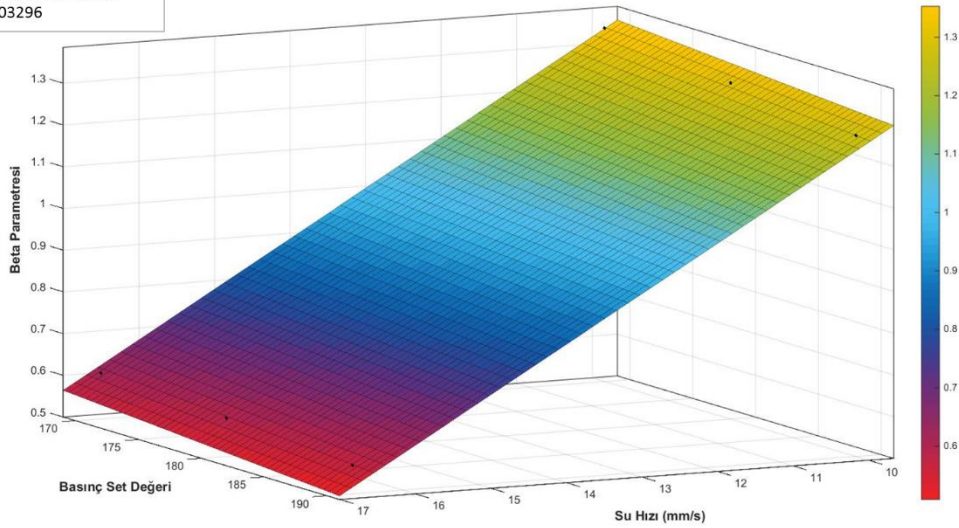


Şekil 5.9 Alfa parametresi ve işlem değişkenleri arasındaki ilişki

Şekil 5.9 incelendiğinde sınıflandırıcı ayırım keskinliğini ifade eden alfa parametresinin su hızı ile birlikte yükseldiği görülmektedir. Alfa değerinin yükselmesi ise sınıflandırıcının daha verimli bir ayırım yaptığını göstermektedir.

Beta parametresinin işlem değişkenleri ile ilişkisi Şekil 5.10'da verilmektedir.

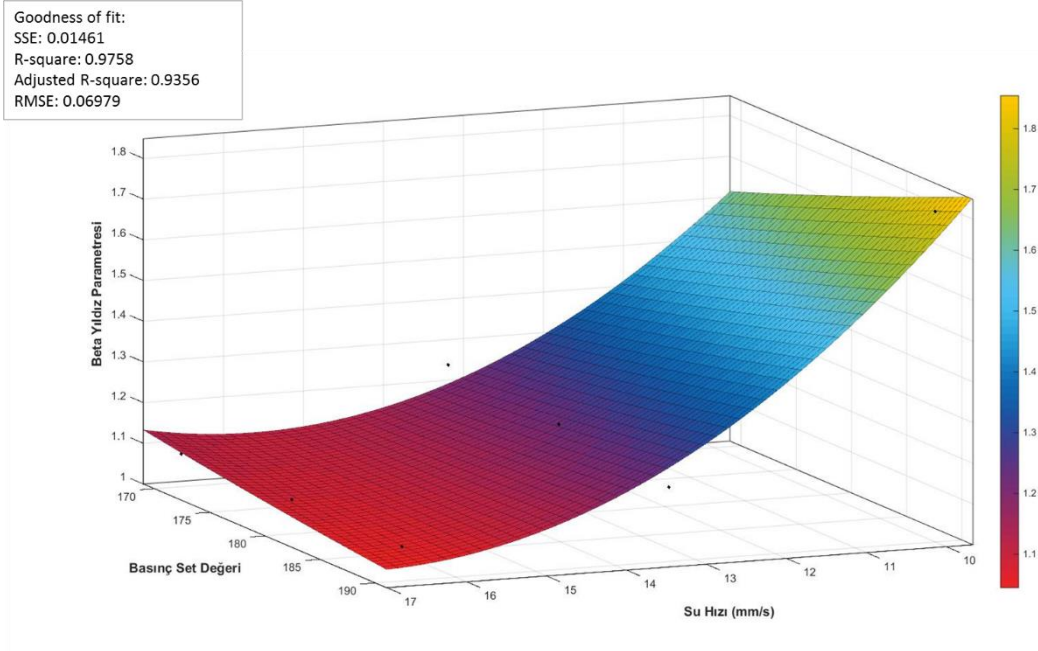
Goodness of fit:
SSE: 0.00652
R-square: 0.9917
Adjusted R-square: 0.9889
RMSE: 0.03296



Şekil 5.10 Beta parametresi ve işlem değişkenleri arasındaki ilişki

Şekil 5.10 incelendiğinde beta parametresi yüksek su hızı ve basınç koşullarında en düşük değerini alırken düşük su hızı ve basınç koşullarında ise en yüksek değerini almaktadır.

β^* parametresinin işlem değişkenleri ilişkisi' Şekil 5.11'de verilmektedir.



Şekil 5.11 β^* parametresi ve işlem değişkenleri arasındaki ilişki

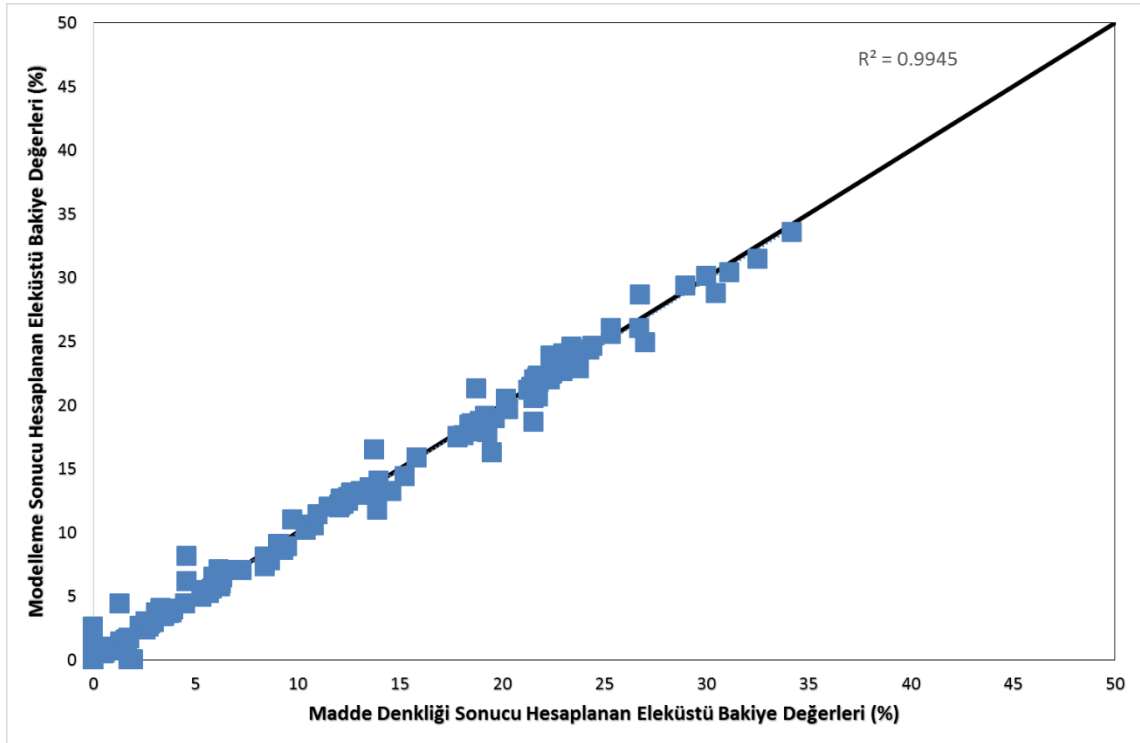
Şekil 5.11 incelendiğinde β^* parametresinin işlem değişkenleri ile karmaşık bir ilişkisi olduğu görülmektedir. Bu ilişki ikinci dereceden polinom kullanılarak çözülmüştür.

Manyetit konsantresi için hesaplanan model parametreleri, güven aralıkları ve hata değerleri Çizelge 5.2'de verilmektedir.

Çizelge 5.2 numunesine ait model parametreleri

Model Parametresi	Eşitlik	Güven Aralığı (R^2)	Hatalar Toplamı (SSE)
d_{50c}	$-0.1383+(0.005547*Su)+(0.001233*Basınç)$	0.9567	0.0001341
C	$(100-(53.49-(0.8986*Su)-(0.107*Basınç)))$	0.9974	0.1564
α	$(0.5838*Su)-(0.01573*Basınç)-1.209$	0.9976	0.05523
β	$2.818-(0.1075*Su)-(0.002517*Basınç)$	0.9917	0.00652

Manyetit konsantresi için oluşturulan modelin ardından herbir koşulun kendini ve diğer koşulları tahmini için model denenmiş ve madde denkliği sonucunda hesaplanan performans eğrilerine çok yakın değerler elde edilmiştir. Modelin tahmin gücünün anlaşılabilmesi için madde denkliği sonucunda hesaplanan ekipman etafı tane boyu dağılımları ile model ile hesaplanan değerler eleküstü bakiye olarak karşılaştırılmıştır. hesaplama ve model değerlerinin “ $y=x$ ” doğrusu üzerinde birleştiği net bir şekilde görülmektedir. Bu değerlerin birbirine çok yakın olması modelin tahmin gücünün yüksek olduğunu göstermektedir (Şekil 5.12).



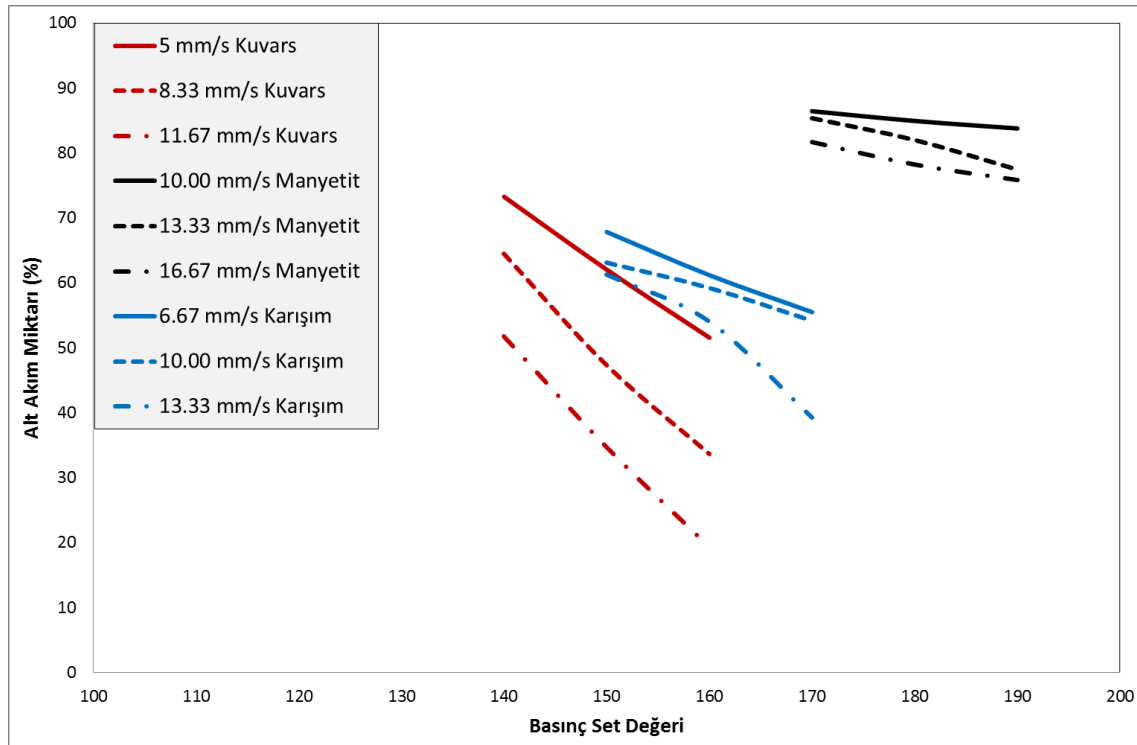
Şekil 5.12 Madde denkliği ve modelleme sonucu hesaplanan eleküstü bakiye değerlerinin karşılaştırılması

6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Madde denkliği ve performans değerlendirme çalışmalarından elde edilen tüm veriler ve yorumları bu bölümde sunulmaktadır. Ayrıca 2. bölümde anlatılan engelli çökeltme eşitlikleri ile hesaplanan kesme boyu değerlerinin gerçek kesme boyu değerleri ile karşılaştırılması da bu bölümde verilmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ekipmanın ayırım verimini kontrol eden basınç değeri ve su hızı ile alt akıma gitme yüzdesi, kaçak oranı (bypass), gerçek ve düzeltilmiş kesme boyu ve ayırım verimsizliği (I) parametrelerinin ilişkileri kuvars manyetit ve karışım numuneleri için ayrı ayrı belirlenmiştir.

Ekipmanın basınç set değeri ve su hızına bağlı olarak değişen alt akıma giden malzeme miktarı Şekil 6.1’de verilmektedir.



Şekil 6.1 Basınç ve su hızına bağlı olarak alt akıma giden malzeme miktarındaki değişim

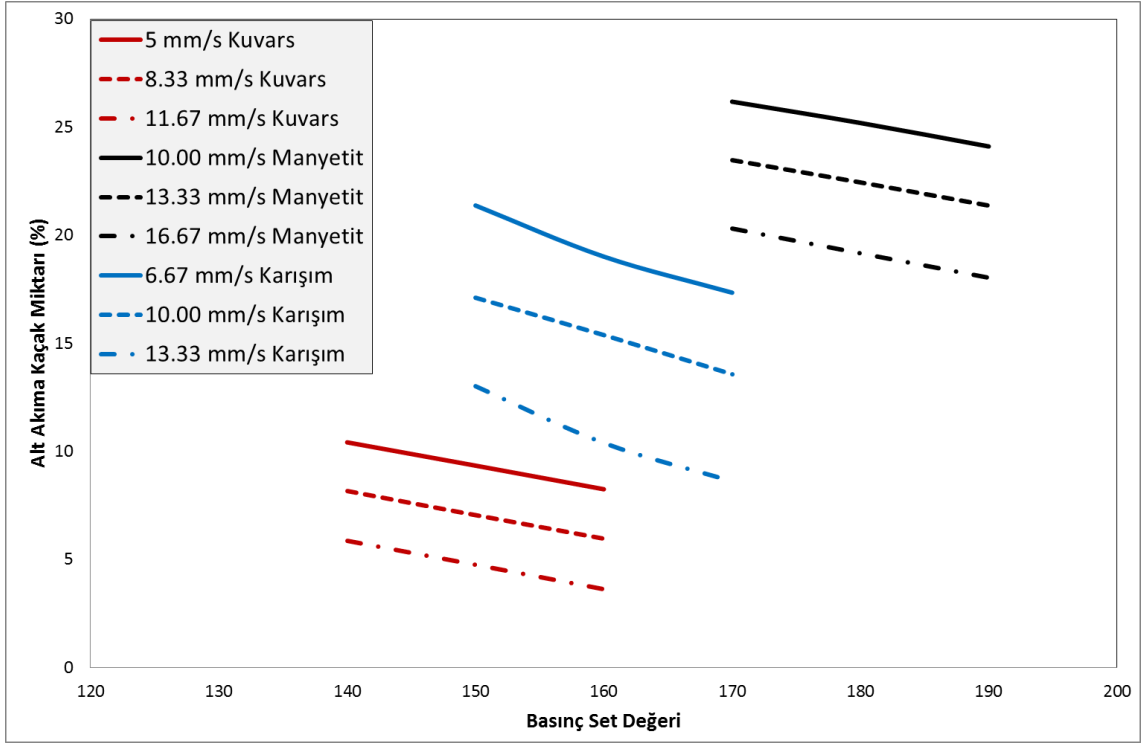
Şekil 6.1’den de açıkça görüldüğü üzere alt akım miktarı tüm numuneler için en düşük su hızı ve en düşük basınç değerlerinde en yüksek değerine ulaşmaktadır. Su hızı ve basıncın artması ise alt akıma giden malzeme miktarını azaltmaktadır.

Tanelerin aşağı y6nl6 6kelme hızına ters y6nde hareket eden yukarı y6nl6 su hızı, yıkama suyu miktarının ve kolon kesit alanının bir fonksiyonudur. Ayrım b6lgesine giren tanelerin 6kelme hızları yukarı y6nl6 su hızından d6ř6k olduğu takdirde taneler 6st akıma gitmektedir. Bu nedenle yıkama suyu miktarının arttırılması sonucu daha fazla tane 6st akıma gitmekte ve bu nedenle alt akım miktarı da d6şmektedir. Yıkama suyu hızı arttıkka alt akım miktarı kuvars numunesi için 6nemli derecede d6ř6ř g6stermekte ancak manyetit konsantresi ve karışım numunesinde çok b6y6k bir değişim g6zlenmemektedir. Yalnızca karışım numunesinin en y6ksek su hızında basıncın artmasıyla alt akıma giden malzeme miktarında 6nemli bir d6ř6ř olmaktadır. Bu durumun malzemelerin yoğunlukları ile ilişkili olduğu d6ř6n6lmektedir.

Aynı şekilde kolon içerisinde basınç set değerinin arttırılması sonucu yatak y6ksekliği ve yoğunluğu da artmaktadır. Yoğunluğu artması sonucu daha baskın hale gelen engelli 6kelme koşulları sonucunda tanelerin 6kelme hızları artan s6rt6nme kuvvetleri sonucu d6şmekte ve sıkışan yatak içerisinden geçen su hızı da artmaktadır. Ayrıca yatağın y6kselmesi beslemeden 6st akıma kaçağı da arttırmakta ve bu nedenle alt akım miktarı d6şmektedir.

şekil 6.1 alt akım miktarını belirleyen ana unsurun yıkama suyu hızı olduğunu da açıkça g6stermektedir. Literat6rde yapılan benzer çalışmalarda da yukarı y6nl6 su hızı ve basınç set değerinin alt akım miktarını d6ř6rd6đ6 belirlenmiştir [78], [2], [79].

Ekipmanın basınç set değeri ve su hızına bağlı olarak değişen kaçak (bypass) miktarı şekil 6.2'de verilmektedir.

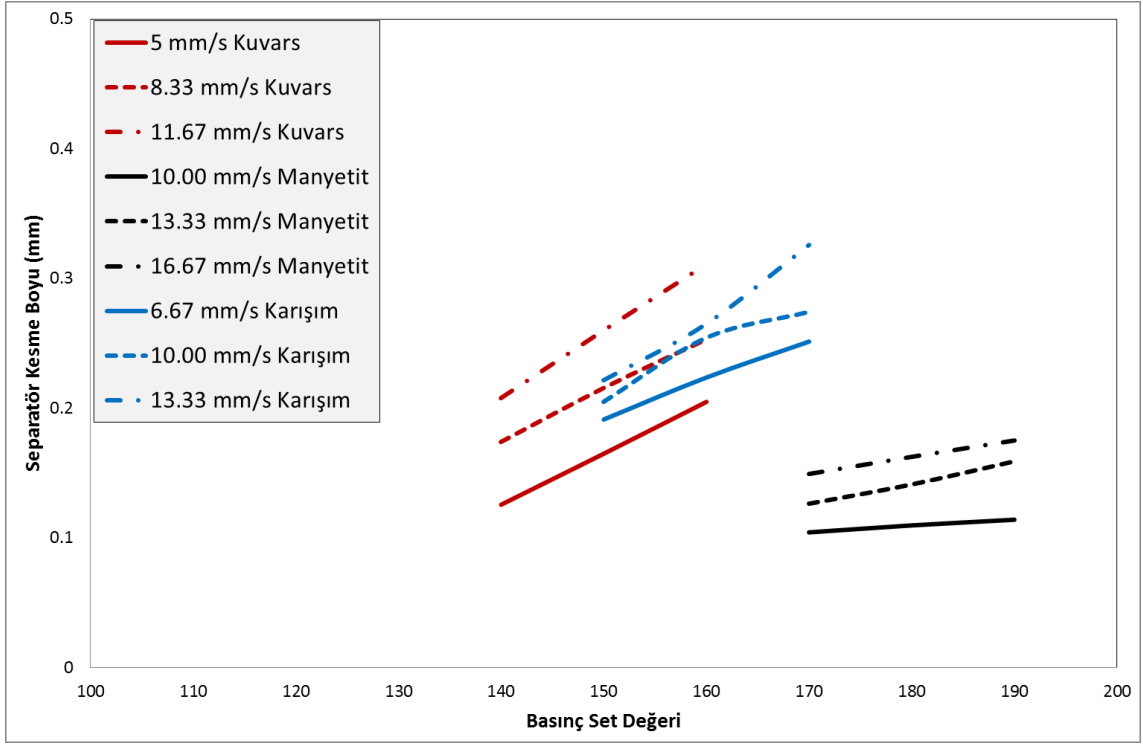


Şekil 6.2 Basınç ve su hızına bağlı olarak kaçak (bypass) miktarındaki değişim

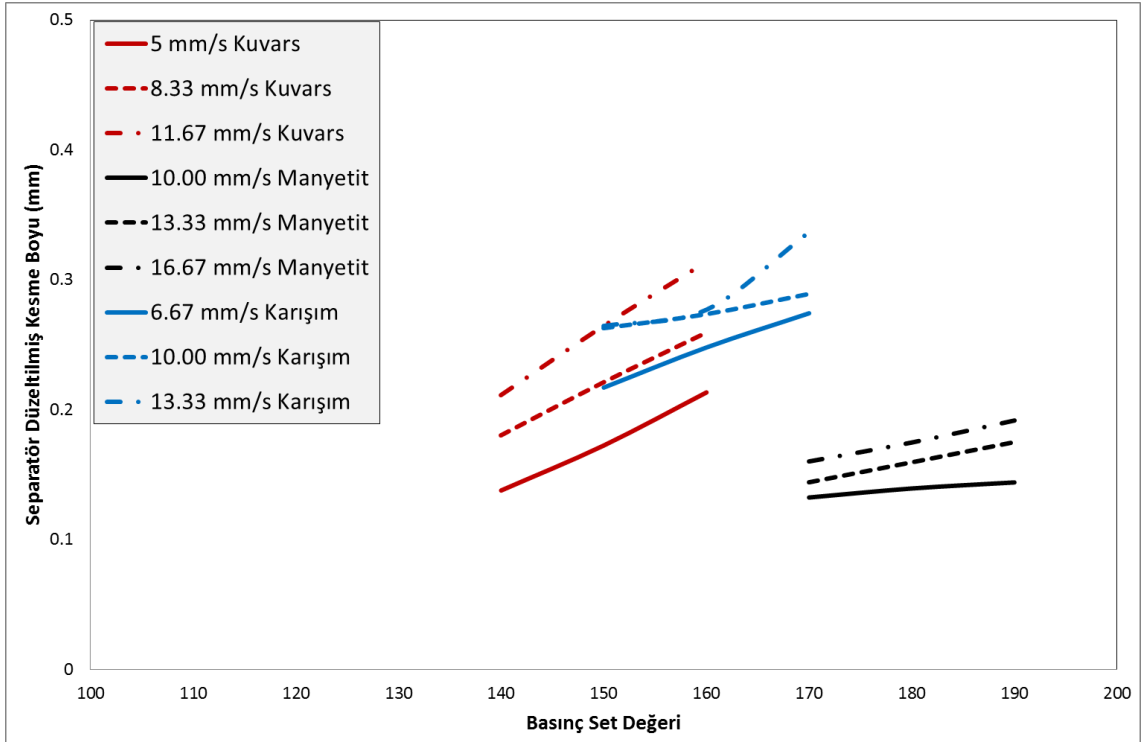
Şekil 6.2’de su hızı ve basınç değerlerinin artması sonucu sınıflandırmaya uğramadan alt akıma giden malzeme miktarının tüm numunelerde azaldığı ve bu azalmanın birincil olarak su hızına bağlı olduğu görülmektedir. Manyetit cevherinin yüksek yoğunluğu nedeniyle kaçak miktarının fazla olduğu, en düşük kaçak miktarının ise düşük yoğunluklu kuvars numunesinde olduğu da görülmektedir.

Basınç ve su hızının artması sonucu kaçak miktarındaki azalmanın en temel sebebi yatak yoğunluğunun ve bu yoğunluğa bağlı olarak yatak içi su hızının artması ve tanelerin aşağı yönlü bağıl hızının düşmesi olarak gösterilebilir. Yatak içi su hızının artması sonucunda ince tanelerin sınıflandırmaya maruz kalmadan alt akıma gidişleri engellenebilmektedir.

Ekipmanın basınç set değeri ve su hızına bağlı olarak değişen gerçek ve düzeltilmiş kesme boyları sırasıyla Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’te verilmektedir.



Şekil 6.3 Basınç ve su hızına bağlı olarak kesme boyları

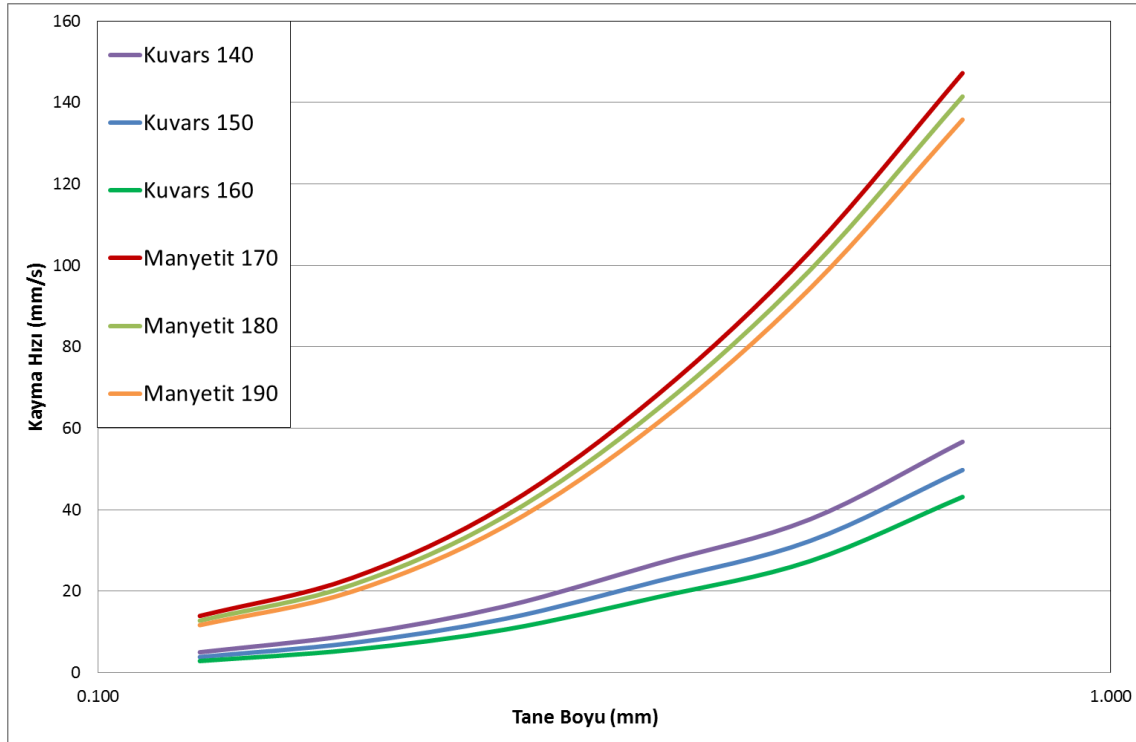


Şekil 6.4 Basınç ve su hızına bağlı olarak düzeltilmiş kesme boyları

Şekil 6.3 incelendiğinde su hızı ve basıncın artması sonucunda ekipmanın kesme boyunun irileştiği gözlenmektedir. Yıkama suyu miktarının artması sonucu ayırım

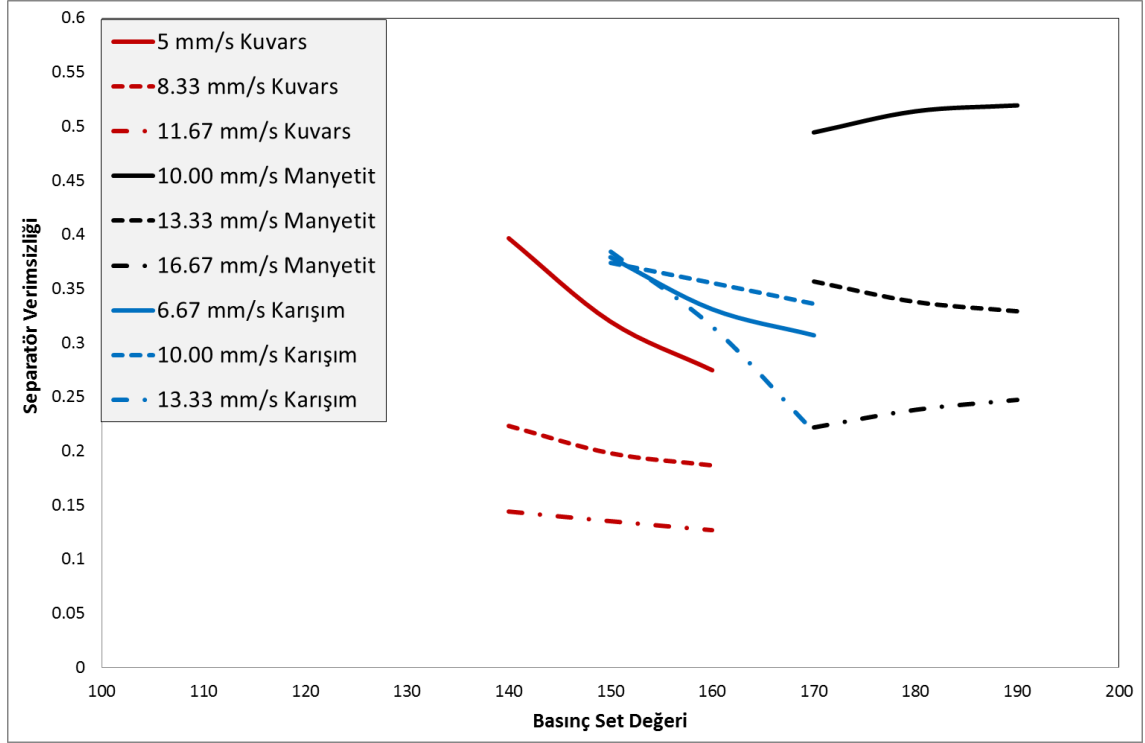
bölgesine giren su miktarı da artmaktadır. Yukarı yönlü taşıma kuvveti artan yıkama suyu ayırım bölgesinde yer alan daha iri tanelerin de üst akıma gitmesine olanak sağlanmaktadır. Şekil 6.3 incelendiğinde ekipmanın kesme boyunun birincil olarak yıkama suyu hızına bağlı olduğu da açıkça görülmektedir.

Basınç değerinin artması sonucu ise akışkan yatak daha yoğun hale gelmekte ve yatağın kalınlığı da artmaktadır. Bu durumda ise tanelerin kayma hızları düştüğünden alt akıma gidebilecek taneler daha yoğun ve daha iri olmak zorundadır. Bu nedenle basınç değerinin artması sonucu tanelerin kayma hızlarındaki azalma da kesme boyunu irileştirmektedir. (Şekil 6.5). Şekil 6.5 incelendiğinde basınç set değerine bağlı olarak kolon içerisindeki malzeme miktarının artması sonucu tanelerin kayma hızları düşmekte ve üst akıma taşınmaları kolaylaşmaktadır ve bu nedenle kesme boyu irileştirmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda en çok ilgilenilen alanlardan bir tanesi de işletim parametreleri ile kesme boyu arasındaki ilişki olmuştur. Bu yönde yapılan tüm çalışmalar su hızı ve basınç set değerinin artışı ile yukarı yönlü kuvvetlerin etkisinin arttığını ve tanelerin kayma hızlarının düşmesi ile birlikte kabaran yataklı sınıflandırıcıların kesme boyunun irileştiğini bildirmektedir [2], [80], [81].



Şekil 6.5 Basınç set değeri ile kayma hızlarının değişimi

Ekipmanın basınç set değeri ve su hızına bağlı olarak ayırım verimsizliğinde (I) meydana gelen değişimler Şekil 6.6'da verilmektedir.



Şekil 6.6 Basınç ve su hızına bağlı olarak ekipman verimsizliği (I)

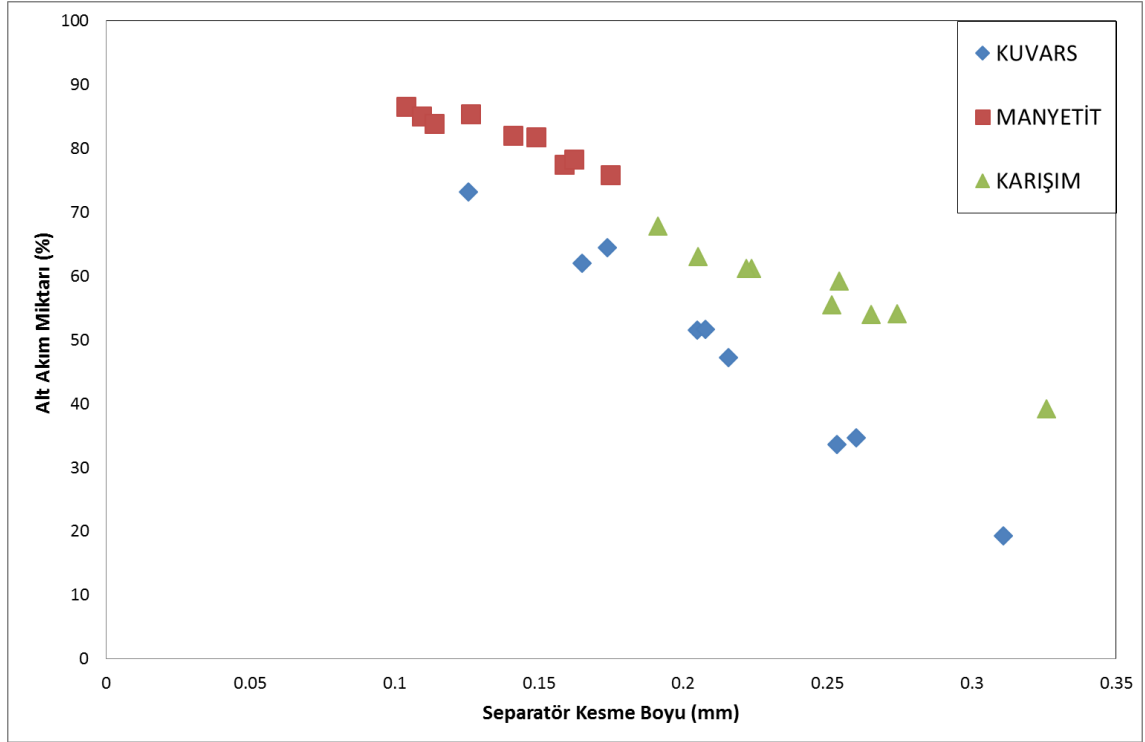
Şekil 6.6 incelendiğinde özellikle kuvars numunesi ve manyetit konsantresinde ekipman verimsizliğinin su hızı ile büyük ölçüde düştüğü, karışım numunesinde ise verimsizliğin belli bir basınç değeri ve yüksek su hızında düşebildiği görülmektedir.

Su hızının artması yukarıda da bahsedildiği üzere hem ince tanelerin alt akıma kaçak yapmasını engellemekte hem de yatak içerisini daha iyi yıkayarak ekipman performansını arttırmaktadır. Yüksek su hızı ve yüksek basınç değerlerinde akışkan yatağın daha yoğun olması sonucu ince tanelerin üst akıma daha kolay ilerleyebildiği ve bu nedenle alt akıma daha az miktarda geldiği düşünülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda da yukarı yönlü su hızının artması sonucu hidrolik taşıma kuvvetinin arttığı ve bu nedenle ince tanelerin alt akıma daha düşük oranlarda gittiği bildirilmektedir [78], [2], [82], [80].

Manyetit numunesinde düşük ve yüksek su hızında yapılan çalışmada basıncın artması ile verimsizliğin de arttığı görülmektedir .

Sınıflandırma performansı ele alındığında sınıflandırıcının kesme boyunda meydana gelen değişimlerin performans üzerine etkileri de önem arz etmektedir.

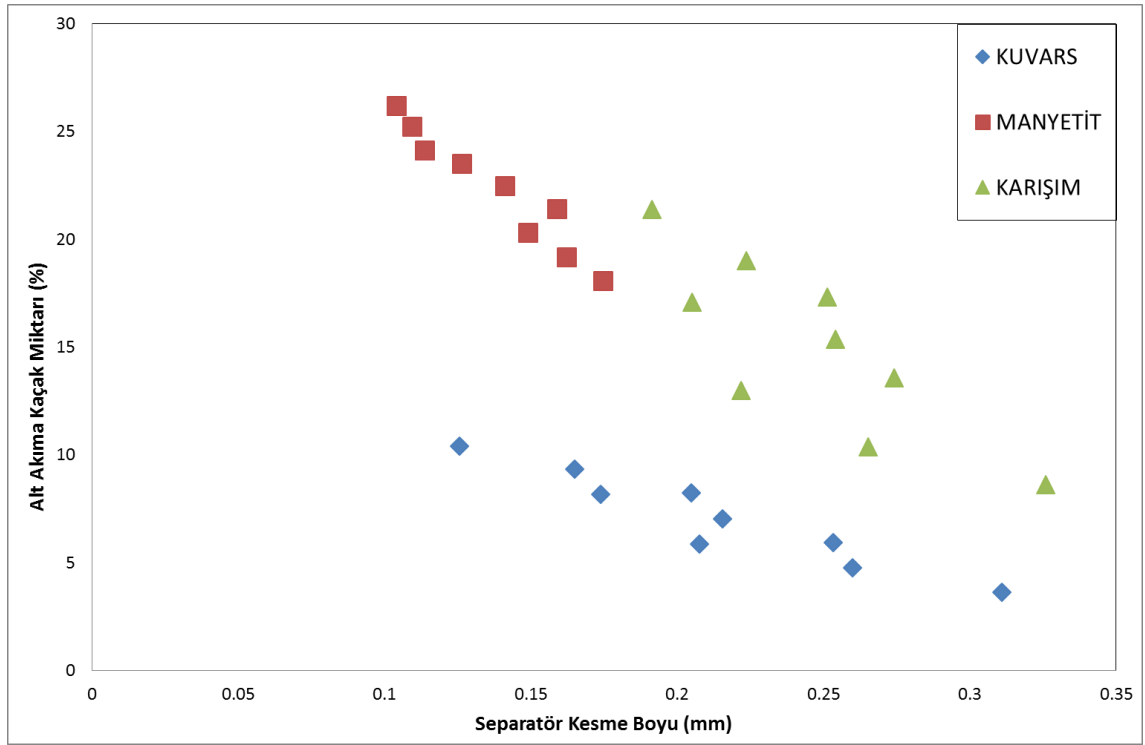
Kabaran yataklı sınıflandırıcıda kesme boyundaki değişime karşı performansın nasıl değiştiği de gözlenmiş ve yorumlanmıştır. Kesme boyuna karşı çizilen alt akım değerleri Şekil 6.7’de verilmektedir.



Şekil 6.7 Kesme boyu değerleri ve alt akım miktarı arasındaki ilişki

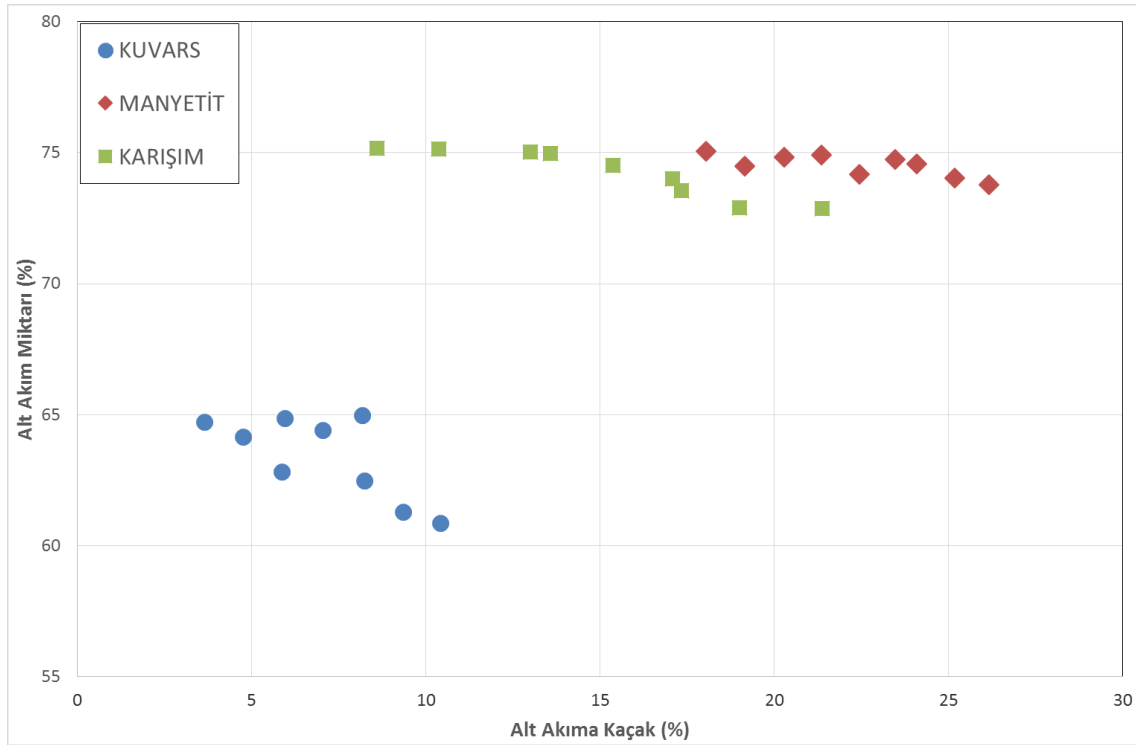
Şekil 6.7 incelendiğinde ekipmanın kesme boyunun irileşmesi sonucu alt akım miktarında azalma görülmektedir. Kesme boyunu irileştirmek için gerekli su miktarının ve basınç değerinin artmasıyla beraber tanelerin yukarı yönlü su hızına karşı bağıl hızının düştüğü ve bu nedenle alt akıma gelmelerinin zorlaştığı düşünülmektedir.

Kesme boyuna karşı çizilen kaçak (bypass) değerleri Şekil 6.8’de verilmektedir.



Şekil 6.8 Kesme boyu değerleri ve kaçak miktarı arasındaki ilişki

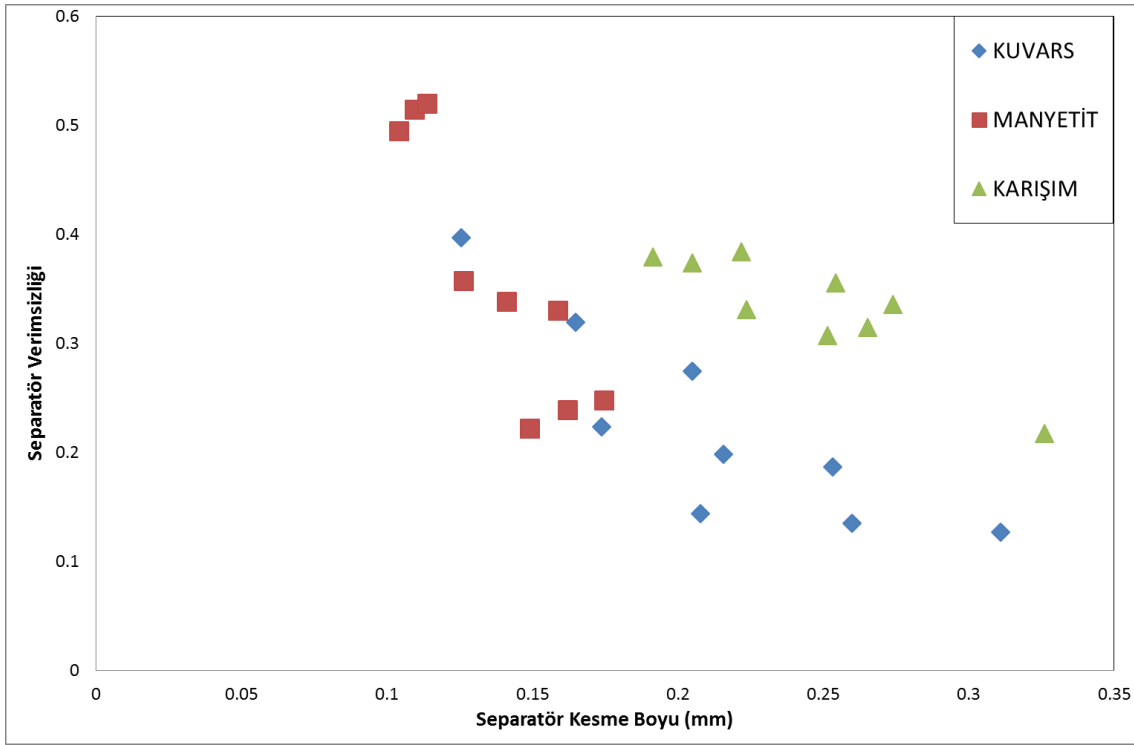
Şekil 6.8 incelendiğinde kesme boyunun irileşmesi sonucu alt akıma kaçak miktarlarında önemli derecede düşüş görülmektedir. Kaçak miktarının azalması sınıflandırmaya uğramadan alt akıma giden malzeme miktarının da azalması anlamına gelmektedir. Bu durum ekipman performansını olumlu yönde etkilemektedir. Alt akıma kaçak miktarının azalması aynı zamanda alt akıma gelen su miktarının da azalması anlamına gelmektedir. Alt akıma kaçak miktarı ile alt akım katı miktarı arasında bir ilişki olup olmadığı incelenmiştir. Alt akım kaçak miktarı ve alt akım katı miktarı arasındaki ilişki Şekil 6.9'da verilmektedir.



Şekil 6.9 Alt akım kaçak miktarı ile alt akım katı miktarı arasındaki ilişki

Şekil 6.9 incelendiğinde kaçak miktarının azalması alt akım katı miktarında ufakta olsa bir artışa neden olmaktadır. Kaçak miktarının azaltılması ekipman içerisinde alt akıma gelen su miktarının da azalmasına ve ayırım suyunun etkin şekilde kullanılmasına olanak verecektir. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda da alt akım % katı içeriğinin artması ve alt akım kaçak miktarı arasında benzer ilişkiler saptanmıştır. Ayrıca yapılan bir çalışmada alt akım su içeriğinin azalması ile ince tanelerin alt akıma gelme olasılığının düştüğü de belirlenmiştir [3].

Kesme boyuna karşı çizilen ayırım verimsizliği (I) değerleri Şekil 6.10'da verilmektedir.

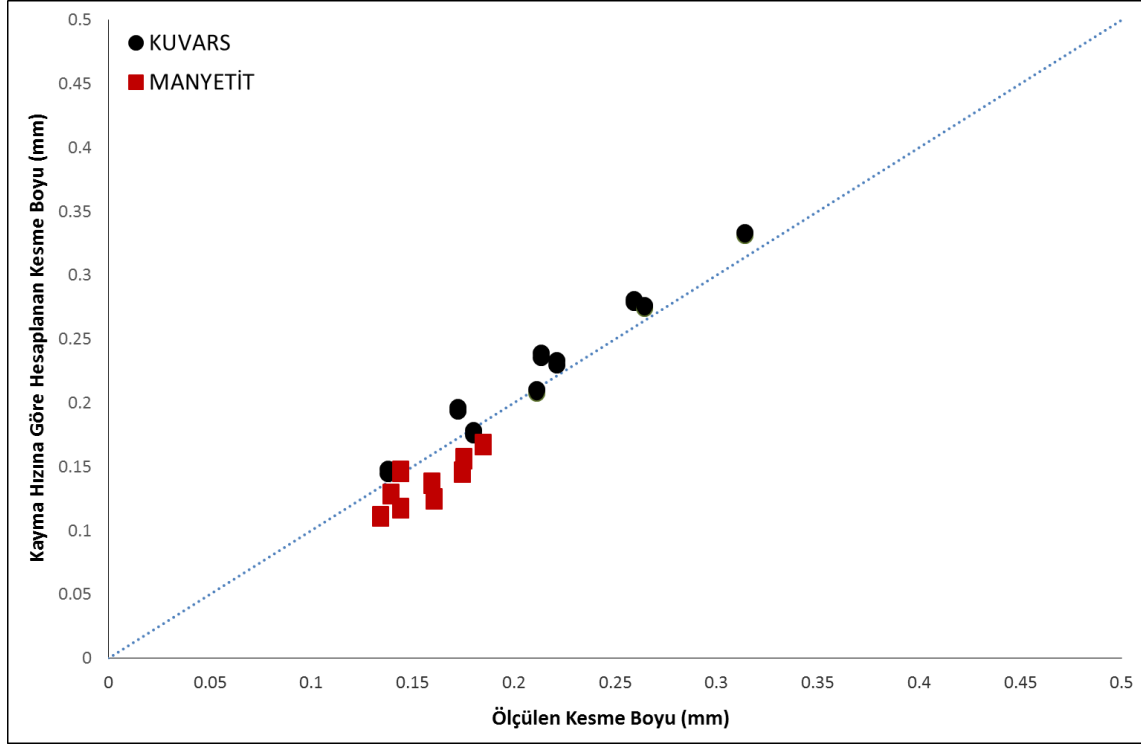


Şekil 6.10 Kesme boyu ve verimsizlik (I) arasındaki ilişki

Şekil 6.10 incelendiğinde kesme boyundaki artışın ekipman verimsizliğini düşürdüğü görülmektedir. Yukarıda yorumlanan diğer parametrelerle paralel olarak kesme boyunu irileştirmek için ekipmana beslenen yıkama suyunun ve bu sayede hidrolik taşıma kuvvetinin arttırılması, bu duruma ek olarak engelli çökeltme koşullarının daha etkin kullanımı için yatak yoğunluğunun basınç set değeri ile yükseltilmesi sonucu ekipman daha verimli şekilde çalışmaktadır.

Kabaran yataklı sınıflandırıcıdaki ayırım tanelerin kayma hızlarındaki değişim ile sağlanmaktadır. Bu nedenle literatürde kayma hızına bağlı kesme boyunun tahmini için birçok korelasyon geliştirilmiş ve kullanılmıştır. 2. bölümde detaylı olarak verilen bu eşitlikler içerisinde en geçerli olanları ise sırasıyla Eşitlik 2.40 ve Eşitlik 2.43'te verilen Asif ve Galvin eşitlikleridir [46], [8] [37], [43], [11]. Bu eşitliklere göre yatak içi su hızının tanenin kayma hızından büyük olması durumunda tane üst akıma aksi takdirde ise alt akıma gitmelidir. Kayma hızı yatak içi su hızına eşit olan tanelerin ise alt ya da üst akıma gitme olasılıkları eşit görülmektedir. Bu nedenle kabaran yataklı sınıflandırıcının kesme boyu, kayma hızı yatak içi su hızına eşit olan tane boyudur. Eşitliklerin tahmin gücünün sınanması amacıyla eşitlikler tarafından hesaplanan kesme boyu değerleri ve deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin

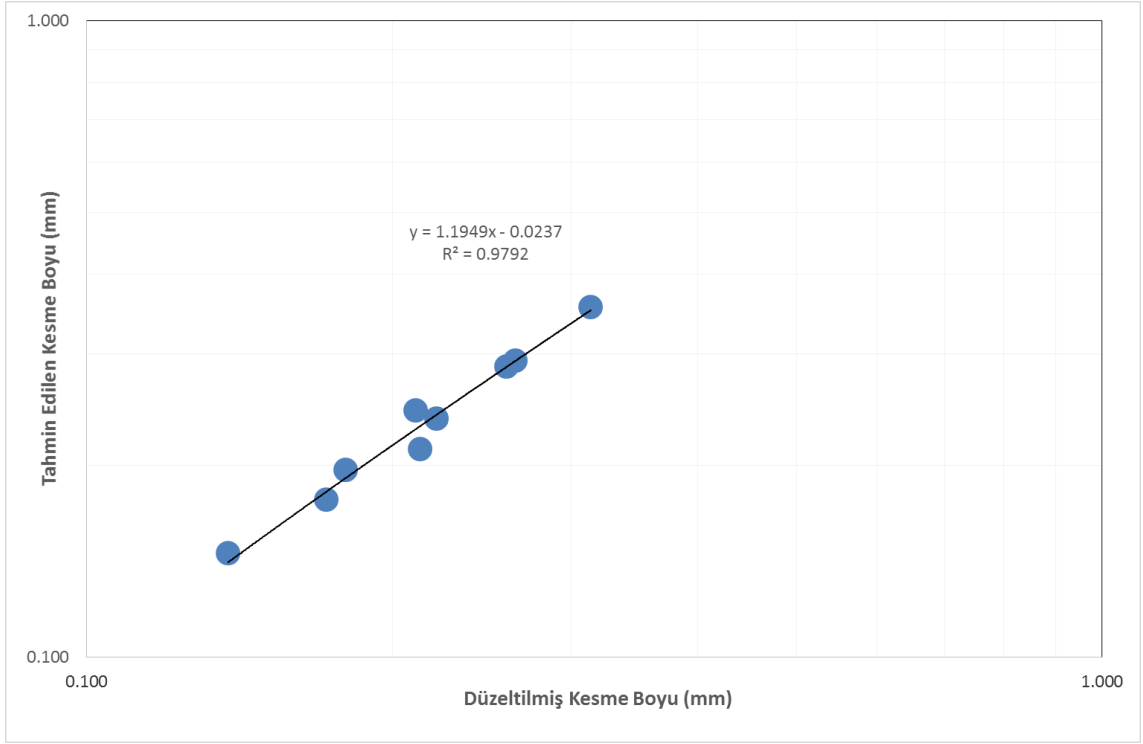
madde denkliği tamamlandıktan sonra hesaplanan düzeltilmiş kesme boyu değerleri “ $y=x$ ” doğrusu üzerinde karşılaştırılmıştır (Şekil 6.11).



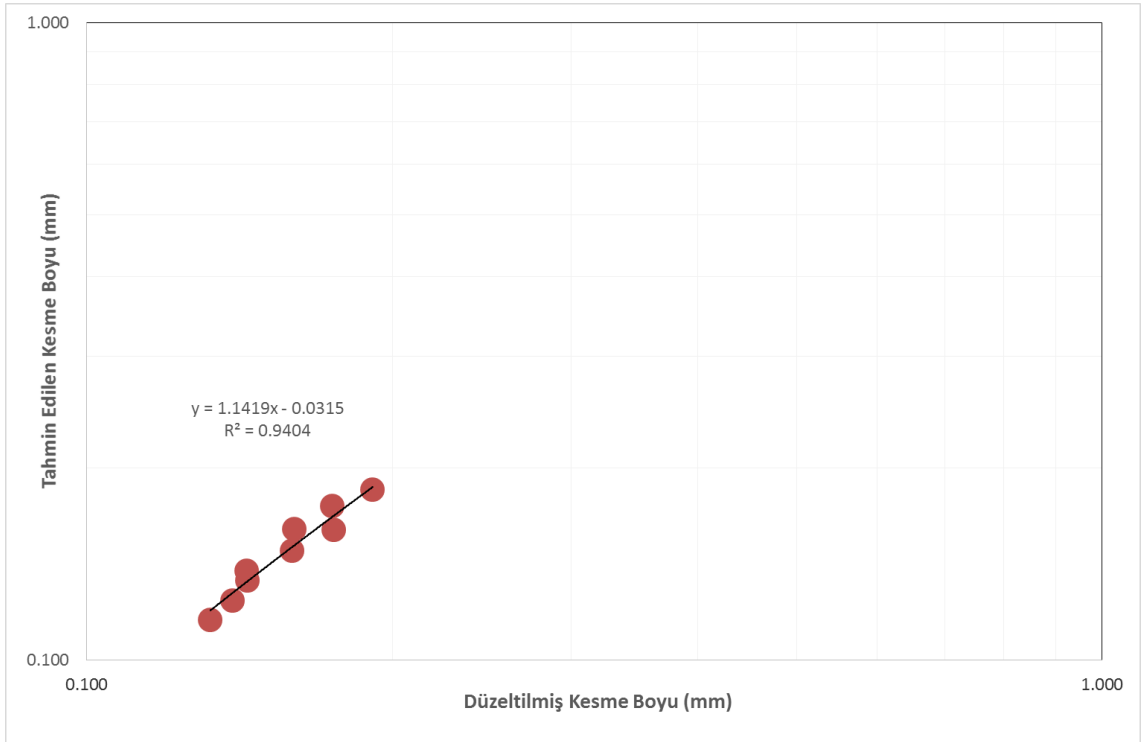
Şekil 6.11 Kayma hızına göre Asif ve Galvin eşitlikleri ile hesaplanan kesme boyu değerlerinin gerçek kesme boyu değerleri ile karşılaştırılması

Şekil 6.11 incelendiğinde Asif ve Galvin eşitlikleri ile hesaplanan kesme boyu değerlerinin gerçek değerlerle “ $y=x$ ” doğrusu üzerinde yakın noktalarda kesiştiği görülmektedir. Bu durum her iki eşitliğinde farklı tane boyu aralığı ve yoğunluktaki malzemelerin farklı işletim koşullarındaki kesme boylarını başarı ile tahmin edebildiğini göstermektedir.

2. bölümde detaylı şekilde verilen kayma hızı eşitlikleri ile hesaplanan kesme boyları ile deneysel çalışmalar sonucunda hesaplanan düzeltilmiş kesme boyları arasındaki ilişki kuvars numunesi ve manyetit konsantresi için sırasıyla Şekil 6.12 ve Şekil 6.13’te verilmektedir.



Şekil 6.12 Kuvars numunesine ait ölçülen ve tahmin edilen kesme boyları arasındaki ilişki



Şekil 6.13 Manyetit konsantresine ait ölçülen ve tahmin edilen kesme boyları arasındaki ilişki

Kuvars kumu ve manyetit konsantresi için tahmin edilen ve ölçülen düzeltilmiş kesme boyu değerleri sırasıyla Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2'de verilmektedir

Çizelge 6.1 Kuvars kumu için ölçülen-hesaplanan tahmini kesme boyları

Yıkama Suyu Hızı (mm/s)	Basınç Set Değeri	Basınç (kPa)	Yatak içi Su Hızı (mm/s)	Hesaplanan Kesme Boyu (mm)	Düzeltilmiş Kesme Boyu (mm)
5.00 (3 l/dk)	140	5.494	6.61	0.146	0.138
	150	5.886	7.19	0.177	0.172
	160	6.278	7.88	0.212	0.213
8.33 (5 l/dk)	140	5.494	11.02	0.197	0.180
	150	5.886	11.99	0.237	0.221
	160	6.278	13.14	0.286	0.259
11.67 (7 l/dk)	140	5.494	15.43	0.244	0.211
	150	5.886	16.78	0.292	0.265
	160	6.278	18.40	0.355	0.314

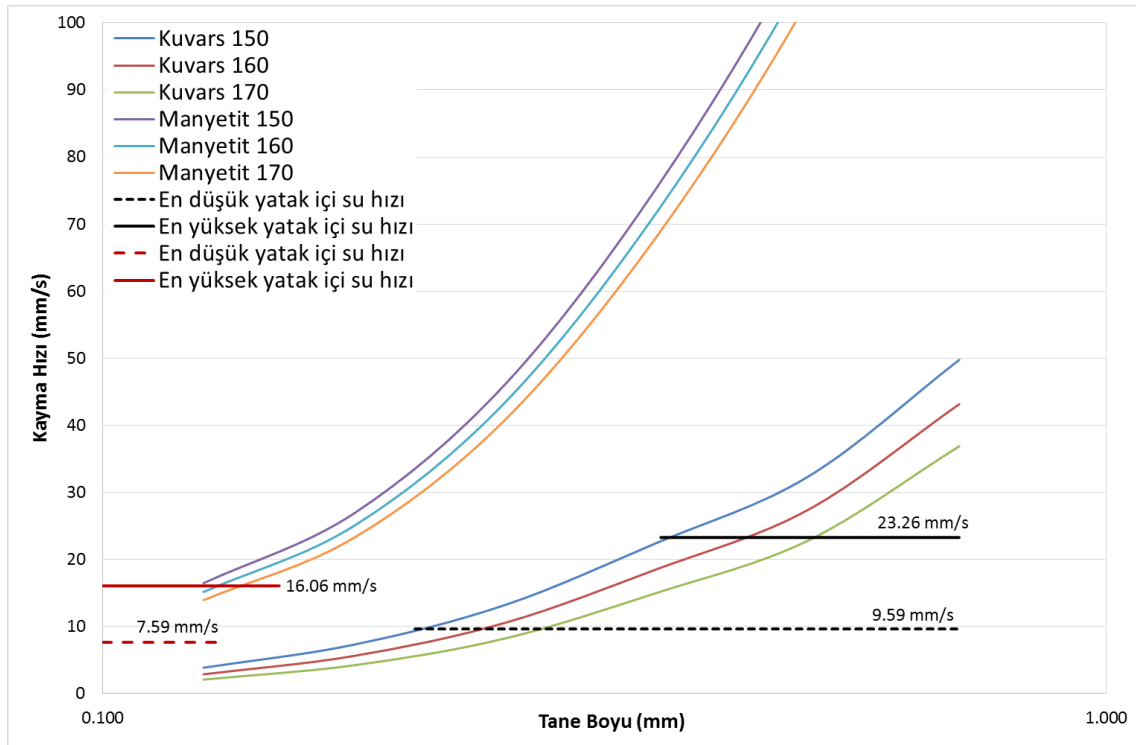
Çizelge 6.2 Manyetit konsantresi için ölçülen-hesaplanan tahmini kesme boyları

Yıkama Suyu Hızı (mm/s)	Basınç Set Değeri	Basınç (kPa)	Yatak içi Su Hızı (mm/s)	Hesaplanan Kesme Boyu (mm)	Düzeltilmiş Kesme Boyu (mm)
10.00 (6 l/dk)	170	6.671	12.05	0.116	0.132
	180	7.063	16.06	0.124	0.139
	190	7.456	20.08	0.133	0.144
13.33 (8 l/dk)	170	6.671	12.41	0.138	0.144
	180	7.063	16.55	0.149	0.159
	190	7.456	20.68	0.160	0.175
16.67 (10 l/dk)	170	6.671	12.80	0.160	0.160
	180	7.063	17.06	0.174	0.175
	190	7.456	21.33	0.185	0.191

Şekil 6.12 ve Şekil 6.13 incelendiğinde her iki numune içinde kesme boylarının başarılı şekilde ($R^2 > 0.9$) tahmin edilebildiği görülmektedir.

Tanelerin kayma hızlarının bilinmesi özellikle farklı tane boyu dağılımı ve yoğunluktaki tanelerin aynı ortamdaki davranışlarının tahmin edilebilmesi açısından

önem arz etmektedir [21]. Yapay karışım numunesi ile yapılan deneysel çalışmalar sırasında kuvars ve manyetit taneleri aynı ortalama yatak yoğunluğu altında farklı kayma hızlarına sahip oldukları için her koşuldaki performans eğrileri ve demir tenörü değerleri farklılık göstermiştir. Bu durum aynı ortalama yatak yoğunluğunda kuvars ve manyetit tanelerinin kayma hızları incelendiğinde daha net şekilde anlaşılmaktadır. Yapay karışım numunesi içerisindeki kuvars ve manyetit tanelerinin aynı basınç set değerindeki kayma hızlarının karşılaştırılması Şekil 6.14'te verilmektedir.



Şekil 6.14 Aynı basınç set değerlerinde kuvars kumu ve manyetit konsantresine ait kayma hızları

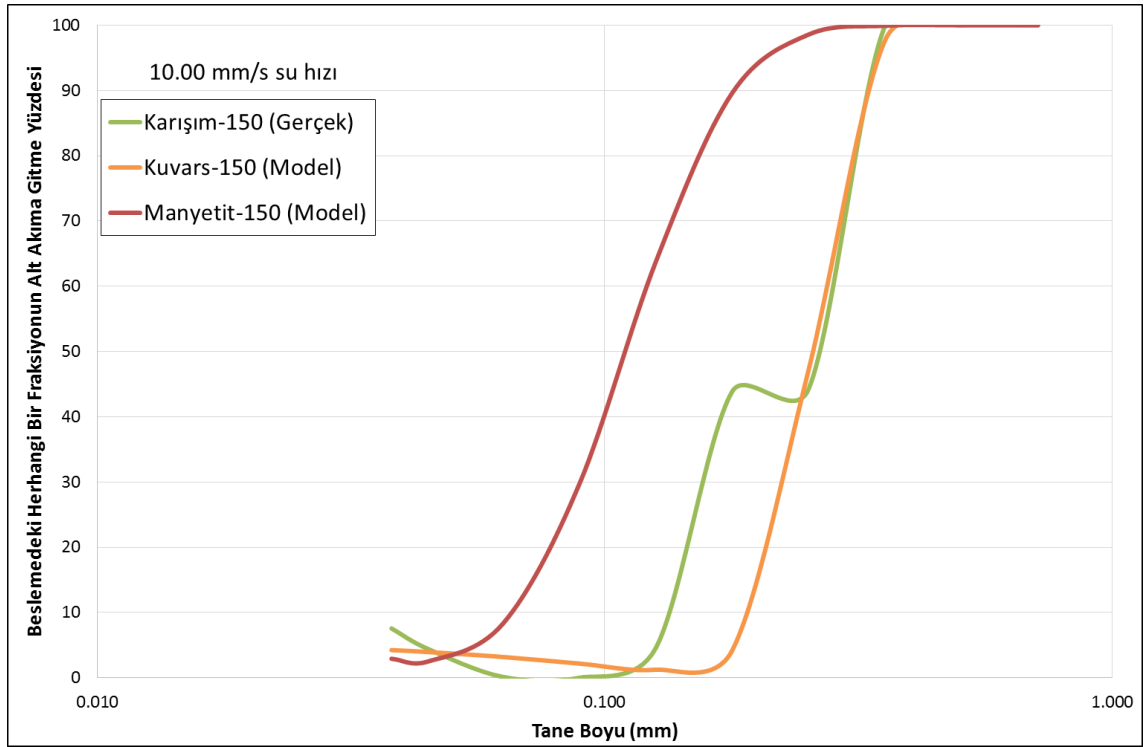
Şekil 6.14 incelendiğinde en düşük basınç set değeri olan 150 değerinde manyetit konsantresinin kayma hızı aynı boyut aralığındaki kuvars kumuna göre çok daha yüksek bir değer almaktadır. Bu durum manyetit konsantresinin yüksek yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. Manyetit konsantresinin yüksek yoğunluğu aynı yukarı yönlü su hızında üzerine etkiyen yatak içi su hızının kuvars kumuna göre daha düşük bir değerde kalmasına neden olmaktadır. Bir başka deyişle, 150 basınç set değeri ve 6.67 mm/s yukarı yönlü su hızında kuvars tanelerine etkiyen yatak içi su hızı 9.59 mm/s olurken, manyetit tanelerine etkiyen yatak içi su hızı 7.59 mm/s'de kalmaktadır. Kuvars kumunun kayma hızının düşük olması ve aynı zamanda

üzerine etkiyen yatak içi su hızı değerinin de yüksek olması sonucu ise kuvars tanelerinin üst akıma gitme olasılıkları manyetit tanelerine göre daha yüksek olmaktadır. Bu durumun başka bir ispatı ise yapay karışım numunesi ile yapılan testlere ait demir tenörlerinden elde edilmektedir (Çizelge 4.24). Yukarıda verilen işletim koşullarında üst akım demir tenörünün % 5.75, üst akım demir veriminin de % 4.80 olması demirin yüksek kayma hızı sonucunda üst akıma çok ince demir tanelerinin gittiğinin bir göstergesidir.

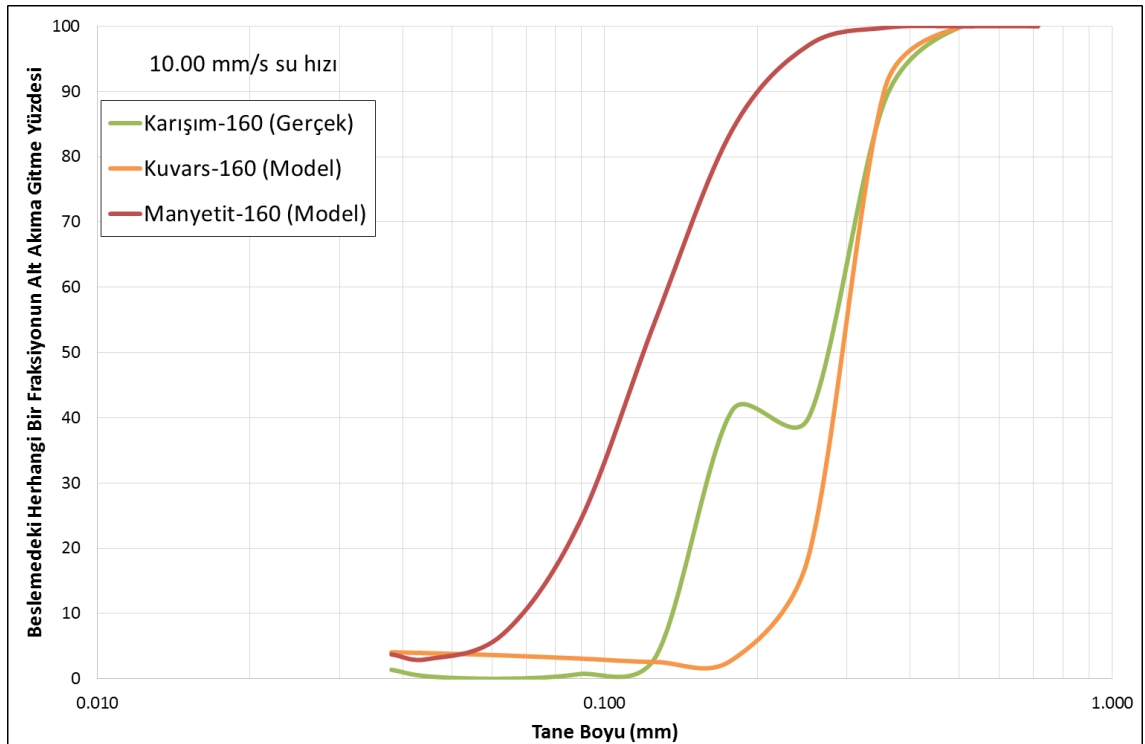
Yapay karışım numunesi ile yapılan deneysel çalışmalarda en yüksek basınç set değeri 170 en yüksek yukarı yönlü su hızı ise 13.33 mm/s'dir. Bu koşullar altında kuvars numunesine etkiyen yatak içi su hızı 23.26 mm/s değerine kadar ulaşmış ve neredeyse tüm kuvars tanelerinin üst akımdan alınmasına neden olmuştur. Aynı koşulda manyetit taneleri üzerine etkiyen yatak içi su hızı ise 16.06 mm/s değerinde kalmıştır. Bu koşuldaki alt akım demir tenörü %67.58, alt akım demir verimi ise %77.86 olmuştur. Alt akımdaki yüksek demir tenörü kuvars tanelerinin tamamına yakınının kayma hızına bağlı olarak üst akıma gittiğini göstermektedir. Üst akım demir tenör ve verim değerleri ilk koşulla karşılaştırıldığında ise sırasıyla % 12.41 tenör ve % 22.14 verim olarak gerçekleşmiştir. Bu durum yoğunluğu yüksek kayma hızı nispeten düşük ince manyetit tanelerinde en yüksek su hızı ve basınç değerinde üst akıma taşınabildiğini açıkça göstermektedir.

Farklı yoğunluk ve tane boyu dağılımındaki tanelerin davranımı modelleme çalışmalarından elde edilen veriler yardımıyla da açıklanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla oluşturulan model ile kuvars ve manyetit tanelerinin yapay karışım koşullarındaki davranımı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Ancak kuvars kumu ve manyetit konsantresi arasındaki yoğunluk farkının fazla olması nedeniyle ortak bir koşulda tahmin yapma durumu kısıtlı kalmıştır. 10.00 mm/s yukarı yönlü su hızının bazı basınç değerlerinde kuvars kumu, manyetit konsantresi ve yapay karışım numunesine ait deneysel veriler bulunmaktadır.

10.00 mm/s su hızı, 150 ve 160 basınç set değeri için modelleme ve simülasyon çalışmaları ile tahmin edilen kuvars kumu ve manyetit konsantresine ait performans eğrilerinin aynı koşuldaki yapay karışım numunesine ait gerçek performans eğrileri ile karşılaştırılması sırasıyla Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da verilmektedir.



Şekil 6.15 Yapay karışım numunesi performans eğrisinin model yardımıyla tahmini



Şekil 6.16 Yapay karışım numunesi performans eğrisinin model yardımıyla tahmini

Şekil 6.15 ve Şekil 6.16 incelendiğinde yapay karışım numunesine ait performans eğrisinin kendini oluşturan bileşenlerle uyumlu olduğu görülmektedir. Yapay karışım

numunesinin performans eğrisi ince tane boylarında yoğunluğu yüksek manyetit ve yoğunluğu düşük kuvars tanelerinin performans eğrilerinin ortalaması şeklinde davranmaktadır. Tane boyunun irileşmesi ile birlikte yüksek yoğunluklu manyetit taneleri tamamen alt akıma gittiklerinden yapay karışım numunesinin davranımı kuvars tanelerinin davranımı ile birebir benzerlik göstermektedir. Bu durum hem yapay karışım numunesinin performans eğrisindeki değişimin nedenini açıklamakta hem de modelin farklı tane boyu ve yoğunluk dağılımına sahip sistemlerdeki tahmin gücünün yüksek olduğunu göstermektedir.

7. YORUM VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kabaran yataklı sınıflandırıcının temel işletim değişkenleri olan basınç set değeri ve su hızı ile ekipman performansı arasındaki ilişkiler belirlenmiştir.

Yukarı yönlü su hızı tanelerin hareketlerini belirlediğinden ekipman performansını etkileyen birincil değişkendir. Ekipmanın alt akım yüzdesi, alt akıma kaçak, kesme boyu, ayırım keskinliği ve verimsizliği su hızı ile ilişkilidir. Basınç set değeri ise ekipman içerisinde oluşturulan malzeme yatağının yoğunluğu ve kalınlık/yüksekliğini belirlemektedir. Malzeme yatağının kalınlığı da su hızının yanında ikincil olarak performansı etkilemektedir. Basınç set değerinin artması ekipmanın ayırım keskinliğini düşürmektedir. Ekipman iri kesme boylarında ince kesme boylarına oranla daha yüksek verim değerlerinde çalışmaktadır. İri kesme boylarında çalışıldığında alt akıma kaçak değerlerinde de azalma görülmektedir.

Ekipman içerisindeki tanelerin çökme hızının yukarı yönlü su hızına oranı olarak tanımlanan kayma hızı, farklı su hızları ve basınç set değerlerinde ekipmanın kesme boyunun belirlenmesinde önem arz etmektedir. Literatürde verilen kayma hızı korelasyonlarından Asif ve Galvin'e ait korelasyonlar gerçek kesme boyu değerlerini tahminde başarı göstermiştir.

Yapay karışım ile yapılan deneysel çalışmalarda ekipmanın yüksek su hızı ve yüksek basınç değerlerinde ve uygun tane boyu dağılımında yoğunluğa göre zenginleştirme yapabileceğini göstermiştir. Farklı yoğunluktaki tanelerin kayma hızlarının belirlenmesi ayırım performansı kadar tenör verim ilişkilerini de açıklamaktadır.

Ekipmanın yoğunluğa göre zenginleştirme veriminin artırılması için daha dar bir tane boyu aralığında çalışılması önerilmektedir.

Yukarı yönlü su hızı ve basınç set değeri kullanılarak oluşturulan model hem tek yoğunluklu malzemelerin deneysel koşullarını hem de yapay karışım numunesi içindeki davranışlarını tahminde başarılı olmuştur.

Ekipmanın daha detaylı bir modelinin oluşturulması için besleme hızı, besleme katı miktarı, bağlı tanelerin davranımı, tane şekli gibi diğer önemli parametrelerinde değerlendirilerek modele eklenmesi ve daha geniş su hızı ve basınç set değerlerinde çalışma yapılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] C. R. Kumar, S. Tripathy ve D. S. Rao, «Characterisation and Pre-concentration of Chromite Values from Plant Tailings Using Floatex Density Separator,» *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, cilt 8, no. 5, pp. 367-378, **2009**.
- [2] C. R. Kumar, S. K. Tripathy, S. Mohanan, T. Venugopalan ve N. Suresh, «Evaluation Of Floatex Density Separator Performance Using Silica Sand,» %1 içinde *Proceedings of the XI International Seminar on Mineral Processing Technology (MPT-2010)*, India, **2010**.
- [3] B. Sarkar, A. Das, S. Roy ve K. Kai, «In depth analysis of alumina removal from iron ore fines using teetered bed gravity separator,» *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, cilt 117, no. 1, pp. 48-55, **2008**.
- [4] G. H. Luttrell, R. Q. Honaker, R. C. Bratton, T. C. Westerfield ve J. N. Kohmuench, «In-Plant Testing Of High-Efficiency Hydraulic Separators,» Virginia Polytechnic Institute & State University (Virginia Tech), Virginia, **2006**.
- [5] A. Das, B. Sarkar, P. Biswas ve S. Roy, «Performance prediction of floatex density separator in processing iron ore fines – a relative velocity approach,» *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, cilt 118, no. 2, pp. 78-84, **2009**.
- [6] C. Kari, G. Kapure, S. M. Rao ve N. D. Rao, «Predicting the Chromite Mineral Upgradation in Floatex Density Separator Using Hindered Settling Models,» *ISIJ International*, cilt 46, no. 7, pp. 966-973, **2006**.
- [7] S. K. Tripathy, M. M., V. Singh ve R. M., «Preliminary studies on teeter bed separator for separation of manganese fines,» *Powder Technology*, no. 239, pp. 284-289, **2013**.

- [8] A. Das, B. Sarkar ve S. P. Mehrotra, «Prediction of separation performance of Floatex Density Separator for processing of fine coal particles,» *Int. J. Miner. Process.*, cilt 91, pp. 41-49, **2009**.
- [9] A. Litter, «Automatic Hindered-Settling Classifier for Hydraulic Sizing and Mineral Beneficiation,» *Transactions, Institute of Mining and Metallurgy*, cilt 95, pp. 133-138, **1986**.
- [10] H. S. Law, R. S. MacTaggart, K. Nandakumar ve J. H. Masliyah, «Settling Behaviour of Heavy and Buoyant Particles from a Suspension in an Inclined Channel,» *J. Fluid Mech.*, no. 187, pp. 301-318, **1988**.
- [11] K. Galvin, «Particle classification in the reflux classifier,» *Minerals Engineering*, cilt 14, pp. 1081-1091, **2001**.
- [12] S. K. Tripathy, S. K. Bhoja, C. R. Kumar ve N. Suresh, «A short review on hydraulic classification and its development in mineral industry,» *Powder Technology*, cilt 270, pp. 205-220, **2015**.
- [13] H. Breuer, A. Jungmann ve T. Neumann, «A Successful System for the Production of High Quality Sand,» *Aufbereitungs-Technik*, cilt 35, no. 12, pp. 636-642, **1994**.
- [14] M. L. Young, «Evaluation of a Hindered-Settling Column for Size/Density Separations,» The Pennsylvania State University, Pennsylvania, **1999**.
- [15] P. Dunn, S. Stewart, J. Kohmuench ve C. Cadena, «A Hydraulic Classifier Evaluation: Upgrading of Heavy Mineral Concentrates,» %1 içinde *SME Annual Meeting*, Salt Lake City, Utah, 2000.
- [16] K. P. Galvin, B. Belcher, A. Callen, N. Lambert, E. Doroodchi, G. Nguyentranlam ve S. Pratten, «Gravity separation and hydrosizing using the reflux classifier,» School of Engineering, University of Newcastle, Avustralya, **2010**.

- [17] G. Nguyentranlam ve K. P. Galvin, «Particle Classification in the Reflux Classifier,» *Minerals Engineering*, cilt 14, no. 9, pp. 1081-1091, **2001**.
- [18] Y. A. Çengel ve J. M. Cimbala, *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*, İzmir: Güven Kitabevi, **2008**.
- [19] S. A. Miedema ve W. J. Vlasblom, «Theory for Hopper Sedimentation,» Delft University of Technology, Delft, **2000**.
- [20] K. Anon, «Determination of particle size distribution by gravitational liquid sedimentation methods». England Patent: ISO 13317-1: 2001, **2001**.
- [21] T. B. Lewis ve L. E. Nielsen, «Settling Rheology of Solid Particles,» *Transactions of the Society of Rheology*, cilt 12, p. 421, **1969**.
- [22] C. Lee, «Modeling of Batch Hindered Settling,» The Pennsylvania StateUniversity, USA, **1989**.
- [23] J. Grace, «Contacting modes and behaviour classification of gas-solid and othe rtwo-phase suspensions,» *Can. J. Chem. Eng.*, cilt 64, pp. 353-363, **1986**.
- [24] K. Heiskanen, «Particle Classification,» %1 içinde *Powder Technology Series*, Chapmanand Hall, **1993**.
- [25] «Eriez flotation,» Eriez, 15 01 2015. [Çevrimiçi]. Available: http://www.eriezflotation.com/pdfs/HydrofloatSeparatorBroch_FGB-105.pdf.
- [26] K. Heiskanen ve H. Laapas, «On the Effects of Fluid Rheology and Flow Properties in the Wet Gravitational Classification,» %1 içinde *Proceedings, 13th International Mineral Processing Congress*, Amsterdam, **1979**.
- [27] P. T. John ve V. K. Goyal, «An Empirically Modeled Stokes Equation for Mean Particle Size from Hindered Settling Experiment at Any One Concentration,» *Indian Journal of Technology*, cilt 13, pp. 69-71, **1975**.

- [28] L. R. Plitt, «A Mathematical Model of the Hydrocyclone Classifier,» *CIM Bulletin*, cilt 6, pp. 114-122, **1976**.
- [29] A. B. Yu ve N. Standish, «A Study of the Packing of Particles with a Mixture Size Distribution,» *Powder Technology*, cilt 76, pp. 113-124, **1993**.
- [30] A. E. R. Westman ve H. R. Hugill, «Packing of Particles,» *Journal of the American Ceramic Society*, cilt 13, no. 10, pp. 767-779, **1930**.
- [31] C. C. Furnas, «Grading Aggregates: I, Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density,» *Ind. Eng. Chem.*, cilt 23, no. 9, pp. 1052-1058, **1931**.
- [32] R. K. McGeary, «Mechanical Packing of Spherical Particles,» *Journal of the American Ceramic Society*, cilt 44, no. 10, pp. 513-522, **1961**.
- [33] G. S. Low ve S. N. Bhattacharya, «On the Study of Maximum Solids Concentration in Suspension Rheology,» %1 içinde *The Twelfth Australian Chemical Engineering Conference*, Melbourne, **1984**.
- [34] J. V. Robinson, «Rheology of Solid Particles,» *Transactions of the Society of Rheology*, cilt 1, p. 15, **1957**.
- [35] V. F. Swanson, «Settling Equation for Minerals Process Application,» *Minerals and Metallurgical Processing*, cilt 16, no. 3, pp. 8-13, **1999**.
- [36] J. F. Richardson ve W. N. Zaki, «Sedimentation and Fluidization: Part I,» *Transact of Institution of Chemical Engineers*, cilt 32, pp. 35-53, **1954**.
- [37] L. Maharaj, «An Investigation Of The Hydrodynamics Of The Teetered Bed Separator For Fine Coal Recovery,» University of Kwazulu-Natal, Durban, **2005**.

- [38] M. J. Lockett ve H. M. Al-Habbooby, «Differential Settling by Size of two Particle Species in a Liquid,» *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, no. 10, pp. 281-292, **1973**.
- [39] M. J. Lockett ve H. M. Al-Habbooby, «Relative Particle Velocities in Two Species Settling,» *Powder Technology*, no. 10, pp. 67-71, **1974**.
- [40] J. H. Masliyah, «Hindered Settling in a Multi-Species Particle System,» *Chem. Eng. Sci.*, no. 34, pp. 1166-1168, **1979**.
- [41] M. A. Al-Naafa ve S. M. Selim, «Sedimentation of Polydisperse Concentrated Suspensions,» *Can. J. Chem. Eng.*, no. 39, pp. 256-264, **1989**.
- [42] E. Barnea ve J. Mizrahi, «A Generalized Approach to the Fluid Dynamics of Particulate Systems: Part 1. General Correlation for Fluidization and Sedimentation in Solid Multi-Particle System,» *The Chemical Engineering Journal*, no. 5, pp. 171-189, **1973**.
- [43] F. Concha ve E. Almendra, «Settling Velocity of Particulate Systems,» *International Journal of Mineral Processing*, cilt 5, pp. 349-369, **1979**.
- [44] J. F. Richardson ve R. A. Meikle, «Sedimentation of Uniform Fine Particles and of Two Component Mixtures of Solids,» *Transact of Institution of Chemical Engineers*, no. 39, pp. 348-356, **1961**.
- [45] M. Asif, «Modelling of Multi-Solid Liquid Fluidized Bed,» *Chemical Engineering Technology*, cilt 20, pp. 485-490, **1997**.
- [46] K. P. Galvin, S. J. Pratten ve S. K. Nicol, «Dense medium separation using a teetered bed separator,» *Miner. Eng.*, cilt 12, no. 9, pp. 1059-1081, **1999**.
- [47] V. S. Patwardhan ve C. Tien, «Sedimentation and liquid fluidization of solid particles of different sizes and densities,» *Chemical Engineering Science*, cilt 7, no. 40, pp. 1051-1060, **1985**.

- [48] B. Sarkar ve A. Das, «A comparative study of slip velocity models for the prediction of performance of floatex density separator,» *International Journal of Mineral Processing*, no. 94, pp. 20-27, **2010**.
- [49] M. Hartman, V. Havlin, O. Trnka ve M. Carsky, «Predicting the free fall velocities of spheres,» *Chem. Eng. Sci.*, cilt 8, no. 44, pp. 1743-1745, **1989**.
- [50] R. O. Burt ve C. Mills, «Gravity Concentration – Still Alive and Doing Well,» *CIM Bulletin*, cilt 78, pp. 51-54, **1985**.
- [51] D. A. Hyde, K. P. Williams, A. N. Morris ve P. M. Yexley, «The Beneficiation of Fine Coal Using the Hydrosizer,» *Mine and Quarry*, cilt 17, no. 3, pp. 50-54, **1988**.
- [52] M. S. Selim, K. A. C. ve R. M. Turian, «Sedimentation of Multi-sized Particles in Concentrated Suspensions,» *American Institute of Chemical Engineering Journal*, cilt 29, pp. 1029-1038, **1983**.
- [53] R. Q. Honaker ve K. Mondal, «Dynamic Modelling Of Fine Particle Separations In An Hindered Bed Classifier,» *Coal Prepar.*, no. 21, pp. 211-232, **1999**.
- [54] W. W. Schwalbach, «Über die Vorgänge beo der Sedimentations- und Fließbettklassierung,» *Aufbereit.-Tech.*, cilt 6, no. 4, pp. 209-212, **1965**.
- [55] B. A. Wills, *Mineral Processing Technology* 5th Edition, New York: Pergamon Press, **1992**.
- [56] L. Schlesinger ve J. Hutwelker, «Preliminary Desliming Tests w/ NC Phosphate Using a Pilot-Scale Linatex Hydrosizer,» North Carolina State Minerals Research Laboratory, North Carolina, 1992.
- [57] P. P. E. Company, «www.dewater.com/en/equip/class.htm,» [Çevrimiçi]. [Erişildi: 09 08 **2004**].

- [58] P. M. H. HYDROSORT, «PHOENIX Process,» [Çevrimiçi]. Available: www.dewater.com. [Erişildi: 25 10 **2014**].
- [59] J. N. Kohmuench, «Improving Efficiencies in Water-Based Separators Using Mathematical Analysis Tools,» Virginia Polytechnic Institute, Virginia, **2000**.
- [60] N. Murthy ve K. Basavaraj, «Assessing the performance of a floatex density separator for the recovery of Iron from low grade Australian iron ore fines - A case study,» *Feed material characterisation*, cilt 572, pp. 3612-3621, **2012**.
- [61] J. Domenico, «Increasing profitability of industrial mineral operations using complementary processing techniques,» Outokumpu Technology Inc. Carpo Division, Jacksonville, **2004**.
- [62] «Floatex,» **2013**. [Çevrimiçi]. Available: <http://www.floatex.co.uk/brochures/FloatexDensitySeparator05041.pdf>. [Erişildi: 15 Aralık **2014**].
- [63] K. M. Yao, «Design of high-rate settlers,» *J. Environ. Eng. Div.*, pp. 621-637, **1973**.
- [64] P. Ponder, «On sedimentation and Rouleaux formation,» *Q. J. Exp. Physiol*, no. 15, pp. 235-252, **1925**.
- [65] G. Nguyentrang ve K. P. Galvin, «Applications of the Reflux Classifier in solid-liquid operations,» *Int. J. Miner. Process.*, no. 73, pp. 83-89, **2004**.
- [66] «Flsmidth,» Flsmidth, 15 01 **2015**. [Çevrimiçi]. Available: <http://www.flsmidth.com/enUS/Related+content/Brochures/Classification/Basket+Centrifuges+and+Reflux+Classifiers>.
- [67] P. Pienaar, «Allflux twin stage hydrosizer test work on South African hard coals at middelburg mine to ensure recovery of a PSS export product from the -0.5 mm fine coal,» Middelburg Mine, Ingwe Coal, South Africa, **2000**.

- [68] P. Grotjohann ve R. Snoby, «Allflux Separator- A new way to process heavy mineral,» *Minerals and Metallurgical Processing*, cilt 16, no. 2, pp. 25-28, **1999**.
- [69] «Allmineral,» Allmineral, [Çevrimiçi]. Available: http://www.allmineral.com/gb/allflux_base.php. [Erişildi: 2 Şubat **2015**].
- [70] M. J. Mankosa, J. N. Kohmuench, M. D. Eisenmann ve G. H. Luttrell, «Testing of Hydrofloat separator for coal cleaning application,» Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, **1995**.
- [71] S. Ersayın ve I. Iwasaki, «Magnetically Enhanced HydroSeparator,» *Minerals and Metallurgical Processing*, cilt 19, no. 4, pp. 187-197, **2002**.
- [72] P. M. N., «Magnetic Elutriation Technology for Clean and efficient Processing of Iron Ore,» US DEpartment of Energy, USA, **2001**.
- [73] F. F. Pengand ve Y. Xia, «Fluid dynamic modeling of fine particle separation in hindered - settling bed separators by CFD,» *Min. Eng.*, pp. 1-11, **2004**.
- [74] «Webmineral,» [Çevrimiçi]. Available: <http://webmineral.com>. [Erişildi: 3 Şubat **2015**].
- [75] G. Önal ve G. Atesok, Cevher Hazırlama El Kitabı, İstanbul: Yurt Madenciligini Gelistirme Vakfı, **1994**.
- [76] J. A. Finch, «Modelling A Fish-Hook in Hydrocyclone Selectivity Curves,» *Powder Technology*, cilt 36, pp. 127-129, **1983**.
- [77] T. J. Napier-Munn, S. Morrell, R. D. Morrison ve K. T., Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation, Napier-Munn Ed., **1997**.
- [78] C. R. Kumar, S. K. Bhoja, S. K. Tripathy, S. Mohanan, T. Venugopalan ve N. Suresh, «Classification performance evaluation of floatex density separator for coal fines,» *Fuel*, no. 108, pp. 303-310, **2013**.

- [79] B. Sarkar, A. Das ve S. P. Mehrotra, «Study of separation features in floatex density separator for cleaning fine coal,» *Int. J. Miner. Process.*, no. 86, pp. 40-49, **2008**.
- [80] J. N. Kohmuench, E. S. Yan ve M. J. Mankosa, «Design, operation and control of a teeter-bed hydroseparator for classification,» *MINERALS & METALLURGICAL PROCESSING*, cilt 27, no. 3, pp. 166-172, **2010**.
- [81] C. R. Kumar, S. Mohanan, S. K. Tripathy, Y. Ramamurthy, T. Venugopalan ve N. Suresh, «Prediction of process input interactions of Floatex Density Separator performance for separating medium density particles,» *International Journal of Mineral Processing*, no. 100, pp. 136-141, **2011**.
- [82] A. Remes, A. Tuikka ve H. Kivio, «Simulation and pilot experiments on pyrite concentrate separation in a Floatex density separator,» *MINERALS & METALLURGICAL PROCESSING*, cilt 2, no. 28, pp. 62-70, **2011**.

EK

Ek 1: Kuvars konsantresine ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

KUVARS		DENEYSEL																	
		3 l/dk						5 l/dk						7 l/dk					
Tane boyu (mm)	Besleme	140 U/F	150 U/F	160 U/F	140 O/F	150 O/F	160 O/F	140 U/F	150 U/F	160 U/F	140 O/F	150 O/F	160 O/F	140 U/F	150 U/F	160 U/F	140 O/F	150 O/F	160 O/F
1.18	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.85	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.6	100.00	99.99	99.92	99.95	100.00	100.00	100.00	99.92	99.89	99.86	100.00	100.00	100.00	99.95	99.89	99.76	100.00	100.00	100.00
0.425	98.90	98.50	98.23	97.89	100.00	100.00	99.97	98.24	97.46	96.73	100.00	100.00	100.00	97.99	95.96	94.31	100.00	100.00	100.00
0.3	84.84	79.05	75.37	70.33	99.99	100.00	99.97	75.51	64.76	54.55	100.00	99.98	100.00	70.45	43.88	36.14	99.99	99.97	96.35
0.212	54.43	41.64	35.15	27.46	89.48	85.92	83.14	26.95	17.02	10.04	99.98	83.01	75.99	19.14	16.10	16.26	92.21	68.79	63.57
0.15	25.36	14.37	9.24	7.62	61.06	55.60	47.33	6.82	5.94	5.06	60.14	42.86	38.05	5.70	5.89	7.10	49.50	34.69	31.58
0.106	10.58	2.66	2.06	2.05	29.31	22.39	18.04	1.65	1.86	2.02	23.36	15.85	13.79	1.42	2.04	2.52	18.81	12.70	11.52
0.075	5.49	0.63	0.75	0.76	12.57	8.91	7.07	0.58	0.76	0.96	9.24	6.17	5.28	0.53	0.87	1.26	7.36	4.93	4.44
0.053	2.72	0.30	0.37	0.43	4.78	3.38	2.64	0.25	0.38	0.52	3.56	2.34	1.96	0.25	0.46	0.82	2.88	1.89	1.68
0.038	0.99	0.13	0.13	0.16	1.33	0.91	0.70	0.07	0.14	0.18	0.98	0.65	0.52	0.09	0.14	0.32	0.78	0.55	0.48
		BALANS																	
		3 l/dk						5 l/dk						7 l/dk					
Tane boyu (mm)	Besleme	140 U/F	150 U/F	160 U/F	140 O/F	150 O/F	160 O/F	140 U/F	150 U/F	160 U/F	140 O/F	150 O/F	160 O/F	140 U/F	150 U/F	160 U/F	140 O/F	150 O/F	160 O/F
1.18		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.85		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.6	100.00	99.94	99.92	99.91	100.00	100.00	100.00	99.93	99.89	99.86	100.00	100.00	100.00	99.91	99.83	99.76	100.00	100.00	100.00
0.425	98.90	98.50	98.23	97.89	100.00	100.00	99.97	98.29	97.46	96.73	100.00	100.00	100.00	97.87	95.96	94.31	100.00	100.00	100.00
0.3	84.73	79.14	75.37	70.39	100.00	100.00	99.97	76.29	64.73	54.59	100.00	100.00	100.00	70.45	43.89	36.14	100.00	100.00	96.35
0.212	54.43	41.64	35.15	27.46	89.45	85.92	83.14	29.26	17.02	10.04	100.00	83.01	76.94	19.14	16.06	16.26	92.21	68.79	63.57
0.15	25.36	14.37	9.24	7.62	61.04	55.62	47.33	6.60	5.94	5.06	63.53	42.84	37.91	5.70	5.93	7.13	49.50	34.69	31.58
0.106	11.00	2.68	2.06	2.06	29.31	22.44	18.04	1.57	1.88	2.02	24.70	15.85	13.75	1.42	2.06	2.52	18.78	12.70	11.54
0.075	5.52	0.63	0.72	0.78	12.57	8.91	7.07	0.55	0.76	0.96	9.77	6.17	5.28	0.53	0.87	1.26	7.36	4.93	4.44
0.053	2.72	0.30	0.37	0.41	4.78	3.35	2.66	0.25	0.38	0.55	3.76	2.35	1.98	0.27	0.46	0.82	2.82	1.89	1.66
0.038	1.00	0.10	0.13	0.17	1.33	0.92	0.70	0.09	0.13	0.18	1.04	0.65	0.55	0.09	0.16	0.28	0.79	0.53	0.46
TONAJ	400.00	292.96	248.08	206.20	107.04	151.92	193.80	257.68	173.24	134.56	142.32	226.76	265.44	206.80	108.88	77.24	193.20	291.12	322.76

Ek 2: Manyetit konsantresine ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

MANYETİT		DENEYSEL																	
		6 l/dk						8 l/dk						10 l/dk					
Tane boyu (mm)	Manyetit	170 U/F	180 U/F	190 U/F	170 O/F	180 O/F	190 O/F	170 U/F	180 U/F	190 U/F	170 O/F	180 O/F	190 O/F	170 U/F	180 U/F	190 U/F	170 O/F	180 O/F	190 O/F
1.18	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.85	99.08	96.56	96.55	96.45	100.00	100.00	100.00	96.52	96.38	96.16	100.00	100.00	100.00	96.31	96.20	96.08	100.00	100.00	100.00
0.6	85.27	84.31	84.03	83.81	100.00	100.00	100.00	84.10	83.45	83.05	100.00	100.00	98.06	83.17	82.66	82.11	100.00	100.00	100.00
0.425	67.91	62.87	62.21	61.69	100.00	100.00	100.00	62.37	60.84	60.11	100.00	100.00	94.65	60.19	58.95	57.66	99.96	100.00	99.99
0.3	49.50	41.57	40.53	40.01	99.99	99.99	99.99	40.78	38.37	36.33	100.00	100.00	94.65	37.77	35.41	33.37	99.23	99.99	99.97
0.212	34.18	23.44	22.68	22.24	98.69	95.39	92.58	22.21	19.80	17.55	99.99	96.39	88.84	18.14	16.21	14.42	98.23	96.19	93.88
0.15	20.11	10.83	10.56	10.29	79.19	73.90	70.79	8.69	7.79	6.58	86.24	76.03	66.50	5.99	5.41	5.11	78.99	72.78	67.09
0.106	8.35	4.49	4.36	4.21	52.46	48.53	45.99	3.38	3.28	3.27	55.15	46.03	37.51	2.85	2.83	2.82	44.75	40.25	36.61
0.075	2.34	1.72	1.75	1.74	29.45	26.74	25.06	1.63	1.62	1.66	28.10	23.25	18.75	1.47	1.47	1.49	22.36	20.03	18.14
0.053	0.55	0.93	0.92	0.92	14.21	12.87	11.97	0.85	0.88	0.89	13.52	11.20	8.99	0.76	0.79	0.82	10.84	9.62	8.64
0.038	0.10	0.36	0.39	0.43	5.12	4.45	3.89	0.32	0.36	0.39	4.88	3.91	3.09	0.29	0.32	0.36	3.93	3.41	2.97
		BALANS																	
		6 l/dk						8 l/dk						10 l/dk					
Tane boyu (mm)	Besleme	170 U/F	180 U/F	190 U/F	170 O/F	180 O/F	190 O/F	170 U/F	180 U/F	190 U/F	170 O/F	180 O/F	190 O/F	170 U/F	180 U/F	190 U/F	170 O/F	180 O/F	190 O/F
1.18	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.85	97.03	96.56	96.50	96.45	100.00	100.00	100.00	96.52	96.38	96.16	100.00	100.00	100.00	96.31	96.20	96.08	100.00	100.00	100.00
0.6	86.44	84.31	84.03	83.81	100.00	100.00	100.00	84.10	83.45	83.05	100.00	100.00	98.06	83.17	82.66	82.11	100.00	100.00	100.00
0.425	67.91	62.87	62.21	61.69	100.00	100.00	100.00	62.37	60.84	60.11	100.00	100.00	94.65	60.19	58.95	57.66	99.96	100.00	99.97
0.3	49.50	41.57	40.53	39.71	100.00	100.00	100.00	40.78	38.37	36.33	100.00	100.00	94.65	37.77	35.41	33.37	98.23	100.00	99.97
0.212	33.66	23.44	22.69	22.24	98.69	95.44	92.58	22.21	19.84	17.57	100.00	96.36	88.84	18.11	16.21	14.42	98.23	96.19	93.84
0.15	20.11	10.83	10.56	10.29	79.19	73.90	70.77	8.69	7.79	6.58	86.24	76.03	66.50	5.94	5.41	5.09	78.95	72.78	67.09
0.106	8.30	4.49	4.33	4.21	52.46	48.53	46.01	3.38	3.28	3.27	55.11	46.03	37.51	2.87	2.84	2.82	44.75	40.25	36.61
0.075	2.33	1.76	1.75	1.74	29.46	26.76	25.06	1.63	1.62	1.66	28.09	23.23	18.75	1.47	1.47	1.49	22.36	20.03	18.14
0.053	0.45	0.91	0.92	0.92	14.21	12.85	11.98	0.85	0.85	0.89	13.51	11.18	8.99	0.76	0.79	0.82	10.84	9.64	8.64
0.038	0.06	0.35	0.39	0.43	5.15	4.45	3.95	0.34	0.36	0.39	4.85	3.91	3.09	0.30	0.33	0.37	3.91	3.39	2.98
TONAJ	560.00	483.95	475.55	469.11	76.05	84.45	90.89	477.57	458.92	433.55	82.43	101.08	126.45	451.30	437.81	424.37	108.70	122.19	135.63

Ek 3: Yapay karışıma ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

KARIŞIM		DENEYSEL																	
		4 l/dk						6 l/dk						8 l/dk					
Tane boyu (mm)	Besleme	150 U/F	160 U/F	170 U/F	150 O/F	160 O/F	170 O/F	150 U/F	160 U/F	170 U/F	150 O/F	160 O/F	170 O/F	150 U/F	160 U/F	170 U/F	150 O/F	160 O/F	170 O/F
1.18	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.85	99.17	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	97.52	96.71	95.74	100.00	100.00	100.00	96.74	96.13	100.00	100.00	100.00	100.00
0.6	92.86	90.69	89.67	88.18	100.00	100.00	100.00	88.71	85.03	80.59	100.00	100.00	100.00	85.16	82.42	79.70	100.00	100.00	100.00
0.425	81.65	76.29	73.45	69.61	100.00	100.00	100.00	71.03	63.29	57.79	100.00	98.39	95.45	61.88	58.26	55.33	100.00	97.65	95.94
0.3	65.68	53.35	47.73	40.91	100.00	100.00	98.89	42.85	37.63	33.40	100.00	87.76	81.60	39.00	36.15	33.74	86.89	82.80	80.20
0.212	40.23	25.82	21.68	17.80	89.56	81.66	74.41	24.35	21.71	20.51	67.56	57.11	51.68	22.29	20.00	20.19	56.80	54.12	51.08
0.15	21.35	10.17	8.03	6.85	59.67	51.11	43.43	9.43	8.55	9.13	41.90	33.08	28.46	7.28	6.23	5.90	34.40	31.71	29.76
0.106	10.42	3.81	3.12	3.24	33.20	26.85	21.43	3.93	3.74	4.19	21.69	16.57	14.09	3.34	3.24	2.78	17.02	15.37	14.61
0.075	3.89	1.16	1.15	1.27	13.24	10.06	7.86	1.22	1.52	1.67	8.50	6.01	5.18	1.32	1.47	1.11	6.23	5.54	5.39
0.053	2.17	0.63	0.60	0.73	6.62	5.07	3.90	0.69	0.94	0.99	4.22	2.94	2.56	0.80	0.98	0.65	3.08	2.67	2.71
0.038	0.75	0.27	0.25	0.35	2.90	2.15	1.67	0.32	0.39	0.45	1.76	1.29	1.10	0.35	0.44	0.36	1.32	1.18	1.12
		BALANS																	
		4 l/dk						6 l/dk						8 l/dk					
Tane boyu (mm)	Karışım	150 U/F	160 U/F	170 U/F	150 O/F	160 O/F	170 O/F	150 U/F	160 U/F	170 U/F	150 O/F	160 O/F	170 O/F	150 U/F	160 U/F	170 U/F	150 O/F	160 O/F	170 O/F
1.18	100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.85	98.43	97.97	97.73	97.40	100.00	100.00	100.00	97.52	96.71	95.74	100.00	100.00	100.00	96.74	96.13	95.54	100.00	100.00	100.00
0.6	92.86	90.78	89.67	88.18	100.00	100.00	100.00	88.71	85.03	80.61	100.00	100.00	100.00	85.16	82.42	79.70	100.00	100.00	100.00
0.425	81.65	76.30	73.45	69.61	100.00	100.00	100.00	70.99	63.29	57.80	100.00	98.39	95.55	61.88	58.26	55.31	99.98	97.65	95.94
0.3	63.86	53.35	47.73	40.89	99.89	99.92	98.85	42.85	37.63	33.40	100.00	87.76	81.60	39.00	36.15	33.74	86.90	82.80	80.20
0.212	40.23	25.84	21.70	17.80	89.56	81.66	74.41	24.35	21.71	20.54	67.56	57.11	51.70	22.29	19.91	20.22	56.86	54.12	51.08
0.15	21.35	10.17	8.03	6.85	59.67	51.11	43.43	9.40	8.55	9.13	41.90	33.00	28.46	7.28	6.23	5.89	34.38	31.68	29.73
0.106	10.45	3.81	3.12	3.24	33.20	26.84	21.43	3.92	3.74	4.19	21.69	16.57	14.09	3.36	3.24	2.78	17.02	15.37	14.61
0.075	3.89	1.16	1.13	1.27	13.24	10.06	7.86	1.20	1.55	1.67	8.50	6.01	5.18	1.32	1.47	1.11	6.27	5.54	5.39
0.053	1.98	0.63	0.60	0.73	6.62	5.07	3.90	0.69	0.94	0.99	4.22	2.94	2.56	0.80	0.98	0.65	3.08	2.67	2.71
0.038	0.86	0.28	0.27	0.33	2.83	2.18	1.67	0.32	0.41	0.44	1.79	1.27	1.11	0.37	0.43	0.35	1.32	1.15	1.14
TONAJ	424.00	328.26	292.98	255.97	95.74	131.02	168.03	268.14	202.12	156.07	155.86	221.88	267.93	203.94	172.14	149.12	220.06	251.86	274.88

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : ÖZGÜR ÖZCAN

Doğum Yeri : Ankara

Medeni Hali : Bekar

E-posta : ozgozcan@hacettepe.edu.tr

Adresi : Tuzluçayır Mahallesi Tıp Fakültesi Caddesi 601. Sokak
2/12 Feruze Apt. 06620 Mamak / ANKARA

Eğitim

Lise : Abidinpaşa Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi

Lisans : Hacettepe Üniversitesi (Maden Mühendisliği Bölümü)

Yabancı Dil Düzeyi

İngilizce (İleri Seviye)

İş Deneyimi

Araştırma Görevlisi (Hacettepe Üniversitesi)

Deneyim Alanları

Cevher Hazırlama

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi

Proje Numarası: FDK-2015-5957. Bütçe: 909,07 TL.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-