

**ÇOKLU BİLEŞENLİ HAVALI SINIFLANDIRICI  
MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİNDE MALZEMELERİN  
YOĞUNLUK VE AKIŞKANLIK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**CONSIDERING THE DENSITY AND FLUIDITY  
CHARACTERISTICS OF MATERIALS IN MULTI-  
COMPONENT MODELING OF AN AIR CLASSIFIER**

**ÖZGÜN DARILMAZ**

**YRD. DOÇ. DR. OKAY ALTUN  
TEZ DANIŞMANI**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır.

ÖZGÜN DARILMAZ' ın hazırladığı “ÇOKLU BİLEŞENLİ HAVALI SINIFLANDIRICI MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİNDE MALZEMELERİN YOĞUNLUK VE AKIŞKANLIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI' nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

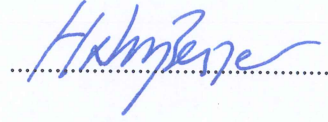
Prof. Dr. Volkan BOZKURT  
Başkan



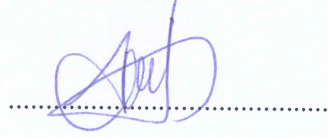
Yrd. Doç. Dr. Okay ALTUN  
Danışman



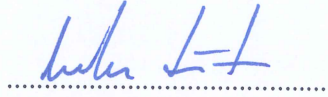
Prof. Dr. A. Hakan BENZER  
Üye



Prof. Dr. Abdullah OBUT  
Üye



Yrd. Doç. Dr. Hakan DÜNDAR  
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/~~raporumun~~ tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenikle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etseniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**



02 / 10 / 2017

Özgün Sarılmaz  
(imza)

Öğrencinin Adı Soyadı

## 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 tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

02/10/2012



Özgün DARILMAZ

## ÖZET

# ÇOKLU BİLEŞENLİ HAVALI SINIFLANDIRICI MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİNDE MALZEMELERİN YOĞUNLUK VE AKIŞKANLIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

**Özgün DARILMAZ**

**Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Okay ALTUN**

**Eylül 2017, 103 sayfa**

Bu tez çalışmasında, malzemelerin yoğunluk ve akışkanlık özelliklerinin havalı sınıflandırıcı performansına etkilerinin incelenmesi ve çoklu bileşenli model yapısının geliştirilmesi ile dinamik havalı sınıflandırıcı modelinin güvenilirliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, öncelikle klinker, bakır cevheri, manyetit ve kömür örneklerinin yoğunlukları ve akışkanlık özellikleri belirlenmiştir. Birbirinden farklı yoğunluk ve akışkanlık özelliğine sahip olan bu dört örnek ile farklı işletim koşullarında laboratuvar ölçekli bir havalı sınıflandırıcı ile deneyler yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar yardımı ile malzeme yoğunluğunun ve akışkanlığının havalı sınıflandırıcı verimlilik eğrisi üzerine etkileri gözlenmiştir. Burada elde edilen bilgiler ışığında, modelleme çalışmaları yürütülerek malzemelerin yoğunluk ve akışkanlık özellikleri ile verimlilik eğrisini tanımlayan ayırım keskinliği, olta etkisi, kesme boyu ve kaçak parametreleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, ayırım keskinliği ve olta etkisi parametrelerinin yoğunluk ile, kesme boyu ve kaçak parametrelerinin ise akışkanlık ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır. Buna göre; bir sınıflandırıcıya beslenen malzemenin yoğunluğu arttığında, sınıflandırıcının verimlilik eğrisindeki kesme boyu parametresi azalmakta, kaçak parametresi ise artmaktadır; sınıflandırıcıya beslenen malzemenin akışkanlığı arttığında, verimlilik eğrisini tanımlayan ayırım keskinliği değeri artmakta, olta etkisi parametresi ise azalmaktadır. Sonuç olarak, bu ilişkiler matematiksel eşitlikler ile ifade edilmiş ve var olan eşitlikler kullanılarak dinamik havalı sınıflandırıcılar için çoklu bileşenli model yapısı önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Havalı sınıflandırıcı, Çoklu bileşenli model, Sınıflandırma, Modelleme, Verimlilik eğrisi, Boyut küçültme

## **ABSTRACT**

# **CONSIDERING THE DENSITY AND FLUIDITY CHARACTERISTICS OF MATERIALS IN MULTI-COMPONENT MODELING OF AN AIR CLASSIFIER**

**Özgün DARILMAZ**

**Master of Science, Department of Mining Engineering**

**Supervisor: Assist. Prof. Okay ALTUN**

**September 2017, 103 pages**

In this thesis study, investigating the effects of density and fluidity properties of materials on air classifier performance and increasing reliability of dynamic air classifier model by developing the multi component model structure were aimed. Within this scope, density and fluidity of clinker, copper ore, magnetite and coal samples were specified primarily. Tests were done with a laboratory scale air classifier at varied operating conditions for these four samples having different density and fluidity. With the help of the results obtained from these tests, effects of density and fluidity of the materials were observed. In light of this information, modeling studies were undertaken and correlations were investigated between density and fluidity of the materials and parameters that are separation sharpness, fish hook, cut size and bypass identifying the efficiency curve. By these investigations, it was concluded that separation sharpness and fish hook parameters are related with density and cut size and bypass parameters are related with fluidity. According to this; when density of a material that is fed to a classifier is increased, cut size parameter on the classifier efficiency curve is decreased and bypass parameter is increased; when fluidity of a material that is fed to a classifier is increased, separation sharpness value, identifying the efficiency curve, is increased and fish hook parameter is decreased. To conclude, these relations were stated as mathematical equations and multi component model structure for dynamic air classifiers was suggested by using existing mathematical equations.

**Keywords:** Air classifier, Multi component model, Classification, Modeling, Efficiency curve, Comminution

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bölüm imkanlarından yararlanmamı sağlayan ve çalışma süresince yardımlarını esirgemeyen Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Başkanı Sayın Prof. Dr. Ahmet Hakan Benzer'e,

Tez çalışmamın başından sonuna kadar her aşamada bana karşı sonsuz desteği, sabrı ve özveriyi gösteren, fikirleri ve bilgisiyle çalışmaya ışık tutan tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Okay Altun'a,

Deneysel çalışmalarda ve tez çalışmamın her aşamasında desteğini hiç esirgemeyen Sayın Dr. Alper Toprak'a,

Her konuda gösterdikleri sınırsız destekleri ve sevgilerinden dolayı annem Cevriye Darılmaz'a, babam Sadık Darılmaz'a,

Başta Eda Sarı, Sadettin Doğan, Onur Dizdar, Gizem Kocausta ve Geylani Çalışkan olmak üzere, çalışmam süresince maddi manevi her konuda destek olan dostlarıma,

En içten duygularıyla teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
1. GİRİŞ .....	1
2. HAVALI SINIFLANDIRICI TİPLERİ .....	3
2.1. Statik Havalı Sınıflandırıcılar .....	4
2.2. Dinamik Havalı Sınıflandırıcılar .....	5
3. HAVALI SINIFLANDIRICILARIN KULLANIM ALANLARI VE UYGULAMALARI .....	9
4. HAVALI SINIFLANDIRICILARIN AYRIM MEKANİZMALARI .....	13
4.1. Besleme Şekli .....	13
4.1.1. Besleme Doğrultusuna Ters Akım.....	14
4.1.3. Merkezkaç-Karşı Akım.....	15
4.1.4. Merkezkaç-Beslemeyi Kesen Akım .....	15
4.2. Sınıflanma İşlemi .....	16
4.3. Ürünün Elde Edilmesi ve Havanın Geri Kazanımı.....	17
5. HAVALI SINIFLANDIRICILARIN VERİMLİLİK EĞRİLERİ VE PERFORMANS DEĞİŞKENLERİ .....	18
5.1. Gerçek Verimlilik Eğrisi.....	19
5.2. Düzeltilmiş Verimlilik Eğrisi.....	20
5.3 İndirgenmiş Verimlilik Eğrisi .....	22
5.4 Sınıflandırıcı Performansı Üzerinde Etkili Olan Değişkenler .....	23
5.4.1 Kesme Boyu.....	23
5.4.2 Tanelerin Sınıflandırıcı İçerisindeki Davranımı .....	24
5.4.3 Tanelerin Topaklanma Yönelimi .....	24
5.4.4 Akışkanın Akmaya Karşı Direnci .....	25
5.4.5 Yüzey Alanı .....	25
5.5 Operasyonel Değişkenlerin Etkileri.....	25



6.	HAVALI SINIFLANDIRICILARIN MODELLENMESİ .....	27
6.1	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (CFD) Yöntemi ile Modelleme .....	27
6.2	Matematiksel Modelleme.....	30
7.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR, MADDE DENKLİĞİ VE MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	32
7.1	Malzeme Özellikleri .....	32
7.1.1	Tane Boyu Dağılımlarının Belirlenmesi .....	32
7.1.2	Yoğunluk Ölçümleri .....	33
7.1.3	Akışkanlık Tayinleri .....	35
7.2	Deney Ekipmanının Tanıtılması .....	40
7.3	Deney Koşulları .....	44
7.4	Madde Denkliği Çalışmaları .....	45
7.5	Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	54
7.6	Modelleme Çalışmaları.....	57
7.6.1	$d_{50c}$ parametresi ilişkisi (Düzeltilmiş kesme boyu).....	61
7.6.2	C parametresi ilişkisi (100 – kaçak).....	62
7.6.3	$\alpha$ parametresi ilişkisi (Ayrım keskinliği) .....	63
7.6.4	$\beta$ parametresi ilişkisi (Olta etkisi).....	64
7.7	Dinamik Havalı Sınıflandırıcı İçin Önerilen Çoklu Bileşenli Model Yapısı.....	65
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	69
8.1	Sonuçlar .....	69
8.2	Öneriler .....	72
	KAYNAKLAR.....	73
	EKLER .....	77
	ÖZGEÇMİŞ.....	89

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 7.1 Tekrarlı yoğunluk ölçüm sonuçları .....	34
Çizelge 7.2 Manyetit örneği için akışkanlık testi sonuçları .....	35
Çizelge 7.3 Manyetit örneği için birim zamanda elek altına geçen ağırlık ölçümleri.....	36
Çizelge 7.4 Manyetit örneği için Dixon testi için küçükten büyüğe sıralanmış veriler .....	36
Çizelge 7.5 Manyetit örneği için t-Testi sonuçları .....	37
Çizelge 7.6 Manyetit örneği için F-Testi sonuçları .....	38
Çizelge 7.7 Malzemelerin akışkanlık indeksleri.....	38
Çizelge 7.8 Alpine 100 MZR havalı sınıflandırıcısının teknik özellikleri .....	40
Çizelge 7.9 Deney planı.....	44
Çizelge 7.10 İri ürüne giden malzeme miktarları .....	53

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Mumford ve Moodie Sınıflandırıcıları .....	5
Şekil 2.2 Sturtevant sınıflandırıcı .....	6
Şekil 2.3 Raymond mekanik sınıflandırıcı .....	6
Şekil 2.4 Üçüncü nesil sınıflandırıcıların sınıflandırma prensibi .....	8
Şekil 3.1 Deney çalışmalarının şematik gösterimi .....	10
Şekil 3.2 Dik değirmende öğütme akım şeması .....	11
Şekil 3.3 Havalı Sınıflandırıcıların YMBD ile kullanıldığı öğütme devreleri .....	12
Şekil 3.4 Kapalı devre akım şeması .....	12
Şekil 4.1 Havalı sınıflandırıcıların ayırım kademeleri .....	13
Şekil 4.2 Besleme doğrultusuna ters akım.....	14
Şekil 4.3 Beslemeyi kesen akım .....	14
Şekil 4.4 Merkezkaç-karşı akım .....	15
Şekil 4.5 Merkezkaç-beslemeyi kesen akım.....	16
Şekil 4.6 Toz tutma siklonları.....	17
Şekil 5.1 İdeal ve gerçek verimlilik eğrileri .....	18
Şekil 5.2 Örnek bir veri setine ait gerçek verimlilik eğrisi.....	20
Şekil 5.3 Kaçak modeli.....	21
Şekil 5.4 Düzeltilmiş verimlilik eğrisi.....	22
Şekil 6.1 Ayırım bölgesi etrafındaki akış hızları .....	28
Şekil 6.2 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle modellenen havalı sınıflandırıcı ..	29
Şekil 6.3 Bir kuvars tanesinin dinamik havalı sınıflandırıcı içerisindeki hareketi.....	30
Şekil 7.1 Lazer kırınımı ile tane boyu dağılımı belirleme cihazı .....	32
Şekil 7.2 Tane boyu dağılımları .....	33
Şekil 7.3 Zamana bağlı olarak akışkanlık tayini sonuçları .....	39
Şekil 7.4 Alpine 100 MZR © Havalı Sınıflandırıcısı .....	40
Şekil 7.5 Besleyici .....	41
Şekil 7.6 Ayırımın gerçekleştiği bölge, rotor ve tane üzerine etki eden kuvvetler .....	41
Şekil 7.7 İri ürün toplama haznesi .....	42
Şekil 7.8 Rotor.....	42
Şekil 7.9 Örnek bir akış şeması .....	45
Şekil 7.10 İri ürünler için gerçekleşen ve hesaplanan madde denkliği sonuçları.....	47

Şekil 7.11 Klinker örneği için tane boyu dağılımları (sabit rotor hızında).....	48
Şekil 7.12 Bakır örneği için tane boyu dağılımları (sabit rotor hızında).....	48
Şekil 7.13 Kömür örneği için tane boyu dağılımları (sabit rotor hızında) .....	49
Şekil 7.14 Manyetit örneği için tane boyu dağılımları (sabit rotor hızında) .....	49
Şekil 7.15 Klinker örneği için tane boyu dağılımları (sabit hava akış hızında) .....	50
Şekil 7.16 Bakır örneği için tane boyu dağılımları (sabit hava akış hızında).....	50
Şekil 7.17 Kömür örneği için tane boyu dağılımları (sabit hava akış hızında) .....	51
Şekil 7.18 Manyetit örneği için tane boyu dağılımları (sabit hava akış hızında) .....	51
Şekil 7.19 Rotor hızının iri ürüne giden malzeme miktarı üzerindeki etkisi.....	52
Şekil 7.20 Hava akış hızının iri ürüne giden malzeme miktarı üzerindeki etkisi.....	52
Şekil 7.21 20 m <sup>3</sup> /sa - 7000 rpm koşulunda gerçek performans eğrileri .....	55
Şekil 7.22 40 m <sup>3</sup> /sa - 7000 rpm koşulunda gerçek performans eğrileri .....	55
Şekil 7.23 20m <sup>3</sup> /saat – 3000 rpm koşulunda indirgenmiş verimlilik eğrileri.....	56
Şekil 7.24 40m <sup>3</sup> /saat – 5000 rpm koşulunda indirgenmiş verimlilik eğrileri.....	56
Şekil 7.25 Klinker için 40 m <sup>3</sup> /sa - 5000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri.....	57
Şekil 7.26 Klinker için 20 m <sup>3</sup> /sa - 3000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri.....	58
Şekil 7.27 Bakır için 30 m <sup>3</sup> /sa - 3000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri .....	58
Şekil 7.28 Bakır için 20 m <sup>3</sup> /sa - 3000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri .....	59
Şekil 7.29 Kömür için 20 m <sup>3</sup> /sa - 5000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri.....	59
Şekil 7.30 Kömür için 30 m <sup>3</sup> /sa - 3000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri.....	60
Şekil 7.31 Manyetit için 30 m <sup>3</sup> /sa - 7000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri.....	60
Şekil 7.32 Manyetit için 40 m <sup>3</sup> /sa - 5000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri.....	61
Şekil 7.33 Hava akış hızı / Rotor hızı oranına karşı d50c ilişkisi.....	62
Şekil 7.34 Hava akış hızı / Rotor hızı oranına karşı C parametresi ilişkisi .....	63
Şekil 7.35 Hava akış hızı / Rotor hızı oranına karşı α parametresi ilişkisi.....	64
Şekil 7.36 Hava akış hızı / Rotor hızı oranına karşı β parametresi ilişkisi.....	65

Şekil 7.37 Yoğunluğa bağlı olan kaçak ve düzeltilmiş kesme boyu modelleri.....	67
Şekil 7.38 Akışkanlığa bağlı olan $\alpha$ (ayrım keskinliği) ve $\beta$ (olta etkisi) modelleri .....	68

# 1. GİRİŞ

Havalı sınıflandırıcılar malzemenin su ile temasının istenmediği koşullarda tercih edilmekte olup temel amacı istenilen ürün boyunun eldesini sağlamak ve bir sonraki işleme uygun hale getirmektir. Havalı sınıflandırıcılar bir çok endüstri tarafından tercih edilmektedir. Bunların arasında çimento, boya, gıda, mineral endüstrileri bulunmaktadır. Günümüze kadar havalı sınıflandırıcıların performansının değerlendirilmesine ve model yapılarının geliştirilmesine yönelik bir çok çalışma yapılmıştır. Literatür incelendiğinde, modelleme çalışmalarının hem akışkanlar mekaniği prensibine dayalı hesaplamalı akışkanlar mekaniği hem de performans eğrisinin matematiksel eşitliğinin kullanıldığı matematiksel modelleme yöntemleri ile gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, literatürde var olan ve dinamik havalı sınıflandırıcılar için geliştirilmiş olan verimlilik eğrisine dayalı modelleme yaklaşımının çoklu bileşenli bir yapıya büründürülmesi amaçlanmıştır.

Literatür incelendiğinde çoklu bileşenli model yapısının farklı tipteki öğütme işlemleri için gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır. Özer vd. [1] kömür öğütme işleminde kullanılan dik değirmenlerin modellenmesi üzerine çalışmışlardır. Yürüttükleri çalışmada farklı kül içeriğine sahip kömürlerin değirmen içerisindeki kırılma dağılımları ve değirmenin öğütme performansı ortaya koyulmuştur. Çalışma kapsamında, dik değirmen içerisinde bulunan sınıflandırıcının davranımı da incelenmiş, ancak sınıflandırıcıya ait etkiler simülasyon yolu ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yoğunluk farkının öğütme üzerindeki etkileri tanımlanabilse de, sınıflandırıcıya ait net bulgulara rastlanamamıştır.

Bir diğer çalışmada Bueno vd. [2], otojen ve yarı otojen değirmenler için çoklu bileşenli model yapısı geliştirmiştir. Yürütülen çalışmada model yapısının geliştirilmesi ile değirmende harcanan özgül enerji tüketiminin daha net hesaplanması, her bir bileşenin kırılma dağılımlarının hesaplanabilmesi, kırılma ve taşınma fonksiyonlarının hesaplanabilmesi ve en önemlisi de farklı karışımdaki bileşenlerin değirmene beslenmesi durumunda değirmenin çektiği gücün daha net bir şekilde hesaplanabilmesi amaçlanmıştır. Yürütülen çalışmalar neticesinde her bir bileşenin kırılma dağılım fonksiyonlarının farklı olduğu hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak da yumuşak ve sert bileşenin değirmen içerisindeki dağılımları tespit edilebilmiş ve daha gerçekçi bir şekilde simülasyon çalışmalarının tamamlanması sağlanmıştır. Geliştirilen model yapısı bir tesiste denenmiş ve modelin geçerliliği sınanmıştır.

Çoklu bileşenli model yapısı geliştirilmesi, çimento öğütme devreleri için de yapılmıştır [3]. Bu çalışmada sadece öğütme işlemi üzerinde durulmuştur. Çimento üretim işlemi incelendiğinde farklı özelliklere sahip bileşenlerin çimento öğütmede kullanıldığı anlaşılmaktadır. Bu bileşenler birlikte öğütülmekte olup, hangi bileşenin daha etkili öğütüldüğü ya da diğerleri üzerinde olumsuz etkiler yarattığı bu çalışma kapsamında anlaşılmaya çalışılmıştır. İlk olarak, öğütme devresinde örnekleme çalışmaları yapılmış ve toplanan örnekler elek fraksiyonlarına ayrılarak bileşenlerin miktarları tespit edilmiştir. Sonrasında, madde denklığı çalışmaları ile değirmen giriş ve çıkış noktalarındaki dağılımlar ve tonaj değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar, çimento öğütme işleminde yer alan bileşenlerin öğütülebilirliklerinden ve yoğunluklarından gelen farklılığın değirmen içerisindeki kırılma davranımlarını da etkilediğini göstermiştir.

Verilen literatür bilgisi, çoklu bileşenli model yapısının farklı öğütme teknolojileri için geliştirilebildiğini, ancak sınıflandırıcılar için böyle bir çalışmanın yürütülmediğini göstermektedir. Dolayısıyla bu tez kapsamında yürütülen çalışmaların bu alandaki eksikliği de kapatacağı düşünülmektedir. Çoklu bileşenli havalı sınıflandırıcı modelinin geliştirilmesinde var olan model temel alınmış [4] ve geliştirilen eşitliklerin modele işlenmesi sağlanmıştır. Bu model yapısı incelendiğinde, Whiten eşitliğinin kullanıldığı ve bu eşitlikte bulunan  $C$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $d_{50c}$  parametrelerinin sınıflandırıcıya ait toz yükü, rotor hızı, hava hızı, besleme inceliği ve dizayn parametreleri ile ilişkilendirildiği anlaşılmaktadır. Geliştirilmiş olan model, sadece çimento malzemesini içermektedir. Bu tez kapsamında ise var olan modelin farklı sektörler için de kullanılabilmesi amacıyla hem yoğunluk, hem de akışkanlık özellikleri farklı olan malzemeler üzerinde çalışmalar yürülmüştür. Bu bağlamda, yoğunlukları  $1,4 \text{ g/cm}^3$  ile  $5,1 \text{ g/cm}^3$  arasında değişen, kömür, bakır, klinker ve manyetit örnekleri kullanılmış ve belirli koşullar altında sınıflandırıcı deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen bulguların detaylı tartışılması ile birlikte var olan modele bazı parametrelerin eklenmesi ve model yapısının iyileştirilmesi önerilmiştir. Böylelikle;

- Yürütülecek olan simülasyon çalışmalarının malzeme özelliklerini de göz önünde bulundurması,
- Çoklu bileşenli model yapısı ile simülasyon sonuçlarının iyileştirilmesi,
- Farklı sektörlerin havalı sınıflandırıcıyı tercih etmeleri durumunda ne gibi sonuçlarla karşılaşacağını tahmin edilmesi,
- Farklı öğütme sistemlerinde, geliştirilecek olan model yapısının kullanılması ile simülasyon sonuçlarının iyileştirilmesi sağlanabilecektir.

## 2. HAVALI SINIFLANDIRICI TIPLERİ

Günümüzde çalışma prensipleri açısından ve teknik özellikler bakımından farklılık gösteren birçok havalı sınıflandırıcı tipi bulunmaktadır. Dolayısıyla, farklı özelliklere sahip olan malzemeler için ortak bir sınıflandırıcı tasarımı önermek oldukça zor olmaktadır. Havalı sınıflandırıcı tipleri, besleme sistemlerine, yapılarına ve birlikte çalıştırıldıkları diğer ekipmanlara göre değişiklik göstermektedir [5].

Fanlar ve toz toplayıcılar gibi harici ekipmanlar havalı sınıflandırıcıların birlikte çalışması için tasarlanmış yardımcı elemanlardır. Havalı sınıflandırıcılar bu yardımcı ekipmanlarla bir bütün olarak kullanılmaktadırlar.

Değişik besleme sistemleri havalı sınıflandırıcılar için farklılık yaratan maddelerden bir tanesidir. Havalı sınıflandırıcılarda sınıflandırılmak istenen malzemeler hava ile birlikte veya ayrı olarak sisteme beslenebilmektedirler. Sınıflandırma işlemi sonunda elde edilen verimlilik, besleme mekanizmalarının farklılığından etkilenebilmektedir. Hava ile birlikte sisteme beslenen malzemelerde yerçekimi kuvvetinin havanın sürüklenme kuvvetini yenmesi iri boyuttaki tanelerin alınma verimliliğini arttırmaktadır. Sınıflandırılmak istenen malzemelerin hava ile ayrı olarak beslenmesi durumunda ise havanın sürüklenme kuvveti yerçekimi kuvvetini yeneceğinden ince tanelerin alınma verimliliği artmaktadır [6].

Havalı sınıflandırıcılarda ayırım mekanizmasına etki eden kuvvetler temelde aşağıdaki gibidir.

- Yerçekimi kuvveti
- Havanın sürüklenme kuvveti
- Hareketli bir parça (dağıtıcı döner tabla) yardımıyla ya da ekipman içinde ortaya çıkan hava hortumu sayesinde tanelere etki eden merkezkaç kuvveti
- Tanelerin yüzeylere ve sisteme beslenen diğer tanelere çarpması ile oluşan çarpışma kuvveti

Çarpışma kuvveti içerisinde rotor (hareketli parça) bulunan ekipmanlarda gerçekleştirilen sınıflandırma işlemlerinde etki eden bir kuvvettir. Yukarıda bahsedilen kuvvetler havalı sınıflandırıcı çeşitlerine göre değişkenlik göstermektedir.



Havalı sınıflandırıcılar yapısal niteliklerine bağlı olarak da değişkenlik göstermektedir. Zigzag sınıflandırıcı adı verilen havalı sınıflandırıcılar havanın veya malzeme-hava birleşiminin yönünü saptıran ve çarpışma alanları sağlayan zigzag yüzeylere sahiptir.

İnce tanelerin biriktiği bölmenin ve fanın yerleşim biçimi de havalı sınıflandırıcılarda değişkenlik göstermektedir. Bu etmenler ayırım mekanizmasını doğrudan etkilemiyor olsa da kontrol ve tasarım bakımından önem arz etmektedir. İnce tanelerin, sınıflandırıcıların dışında bulunan siklon toplayıcılarda biriktirilmesi, ekipmanın içerisinde biriktirilmesinden daha verimli olduğu önceki çalışmalarda açıkça belirtilmektedir [7].

Havalı sınıflandırıcılar mekanik özelliklerine göre temel olarak statik ve dinamik olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar.

### **2.1. Statik Havalı Sınıflandırıcılar**

Statik sınıflandırıcılarda dinamik sınıflandırıcılardan farklı olarak hiç bir hareketli parça bulunmamaktadır. Sınıflandırma işlemi havanın şiddetinin ve yönünün değiştirilmesi ile yapılmaktadır. Çoğunlukla hava emişli değirmenlerin çıkış kısmında kullanılan statik sınıflandırıcılar grit sınıflandırıcılar olarak da adlandırılabilirler.

Hava emişli değirmenlerin çıkışında kullanılan statik sınıflandırıcılar, değirmende nihai ürün boyutuna erişmiş olan tanelerin sistemden çıkarılmasını sağlayarak, ana sınıflandırıcıya giden malzeme miktarının azalmasını ve bu sınıflandırıcının yükünün hafifletilmesi görevini sağlamaktadırlar. Hava ile birlikte hareket eden malzeme sınıflandırıcıya alt bölmeden girmekte ve iç koniğe doğru ilerlemektedir. Malzeme ve hava bileşimi iç konik bölmenin girişinde dairesel olarak hareket edebilen ve ayarlanabilir özellikteki kanatlardan geçmektedir. Statik sınıflandırıcı içerisinde bu kanatların haricinde başka bir hareketli parça yer almamaktadır. Tanelerin üzerine etki eden merkezkaç kuvveti açısı değiştirilebilen kanatlar ile değiştirilebilmektedir. Bu faktör ile birlikte sınıflandırıcı geri dönüşü direkt olarak etkilenmektedir. Kanatların açılarının artırılması ile tanelerin üzerine etki eden merkezkaç kuvveti artmaktadır. Merkezkaç kuvvetinin etkisinin artması ile de daha ince bir ürün alınması sağlanabilmektedir. Bu durum sağlandığında geri dönüş miktarı artış göstermektedir [8]. Temel özellikleri verilen statik havalı sınıflandırıcılar aşağıda sıralanmıştır.

- Dik-karşıt akımlı sınıflandırıcılar
- Havalı kaskat sınıflandırıcılar

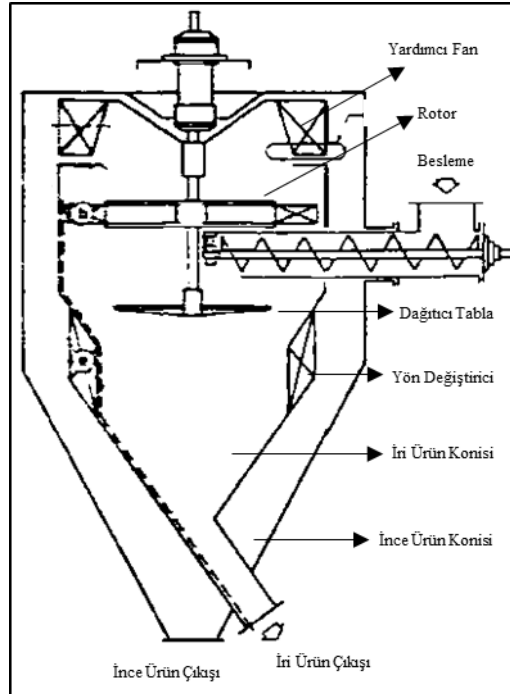
- V sınıflandırıcılar
- Akışkan yataklı sınıflandırıcılar
- Yerçekimsel havalı sınıflandırıcılar

## 2.2. Dinamik Havalı Sınıflandırıcılar

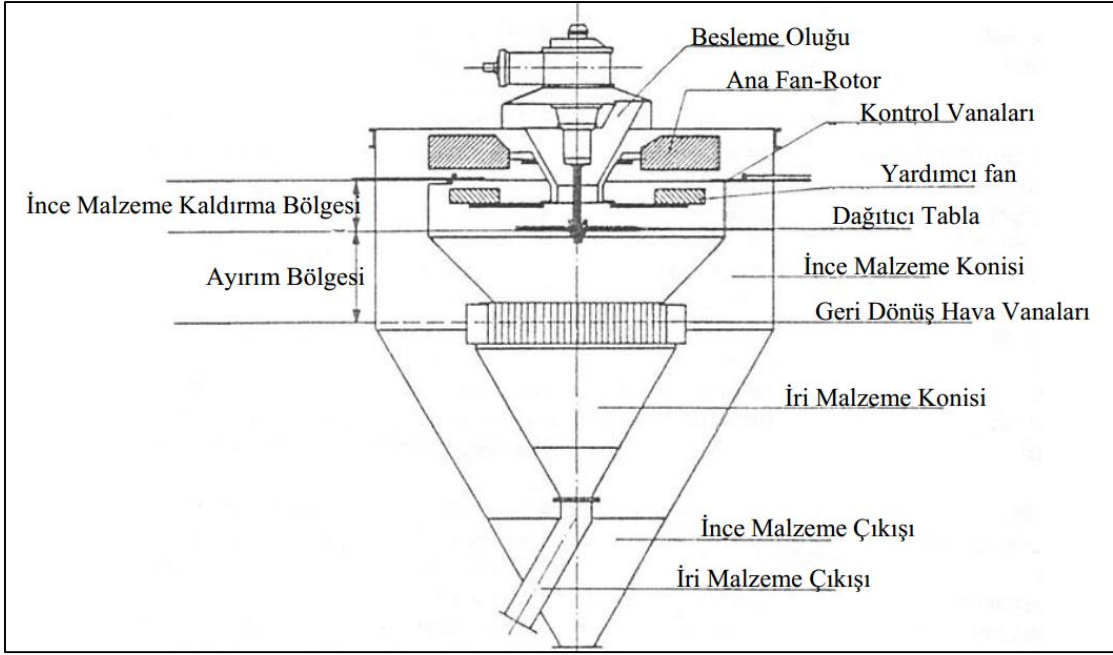
Dinamik havalı sınıflandırıcılar özünde dağıtma ve ayırma işlemlerini sağlayan rotor ile sınıflandırıcıya hava sağlamakta olan harici veya dahili fandan meydana gelmektedir [5]. Bu ekipmanlarda ayırım işlemi, sınıflandırıcıya beslenen malzemelerin özelliklerine göre ince ve iri olmak üzere ayrıştırılması ile gerçekleşmektedir.

Dinamik sınıflandırıcılar temelde birinci, ikinci ve üçüncü nesil olmak üzere üç ana grup altında toplanmaktadır.

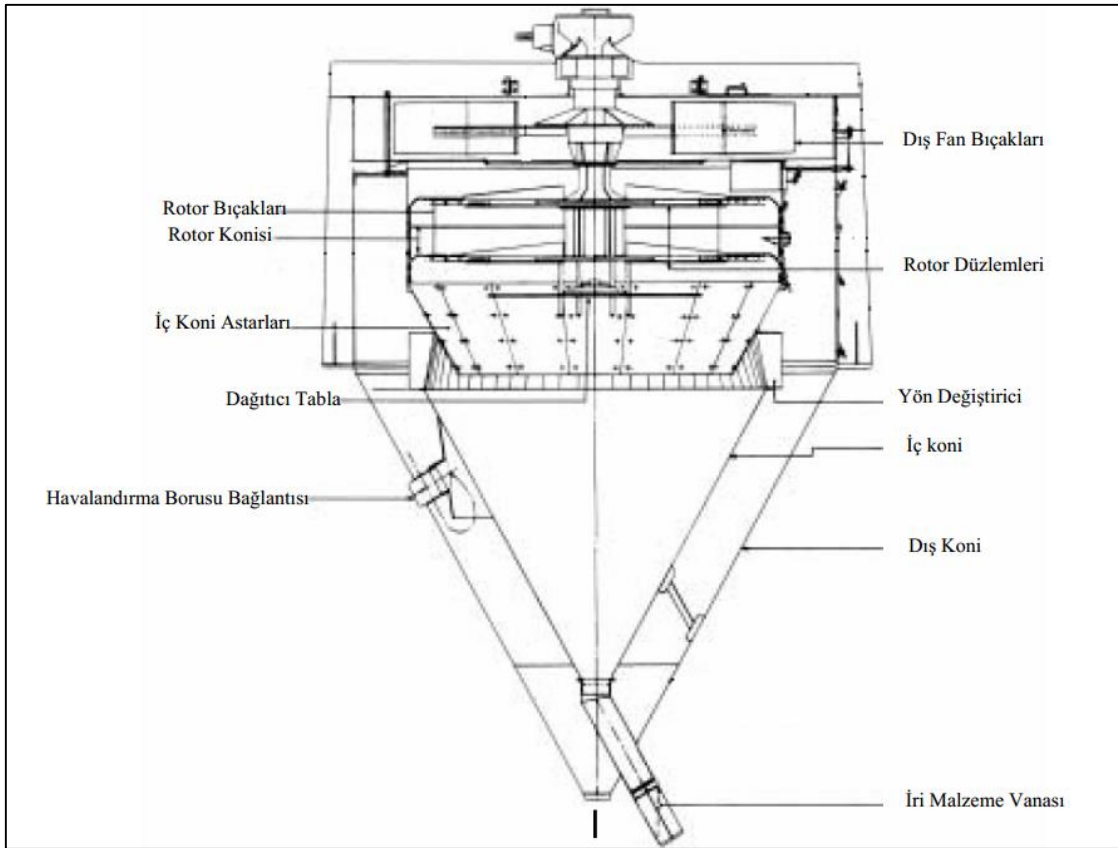
İlk birinci nesil dinamik havalı sınıflandırıcı, 1885 yılında üretilen Mumford ve Moodie sınıflandırıcılarıdır (Şekil 2.1). Bu sınıflandırıcılar en çok çimento alanında kendilerine yer bulabilmişlerdir [9]. Sturtevant sınıflandırıcıları (Şekil 2.2) ve Raymond mekanik sınıflandırıcıları (Şekil 2.3) birinci nesil sınıflandırıcılara verilebilecek diğer örneklerdir.



Şekil 2.1 Mumford ve Moodie Sınıflandırıcıları [9]



Şekil 2.2 Sturtevant sınıflandırıcı [9]



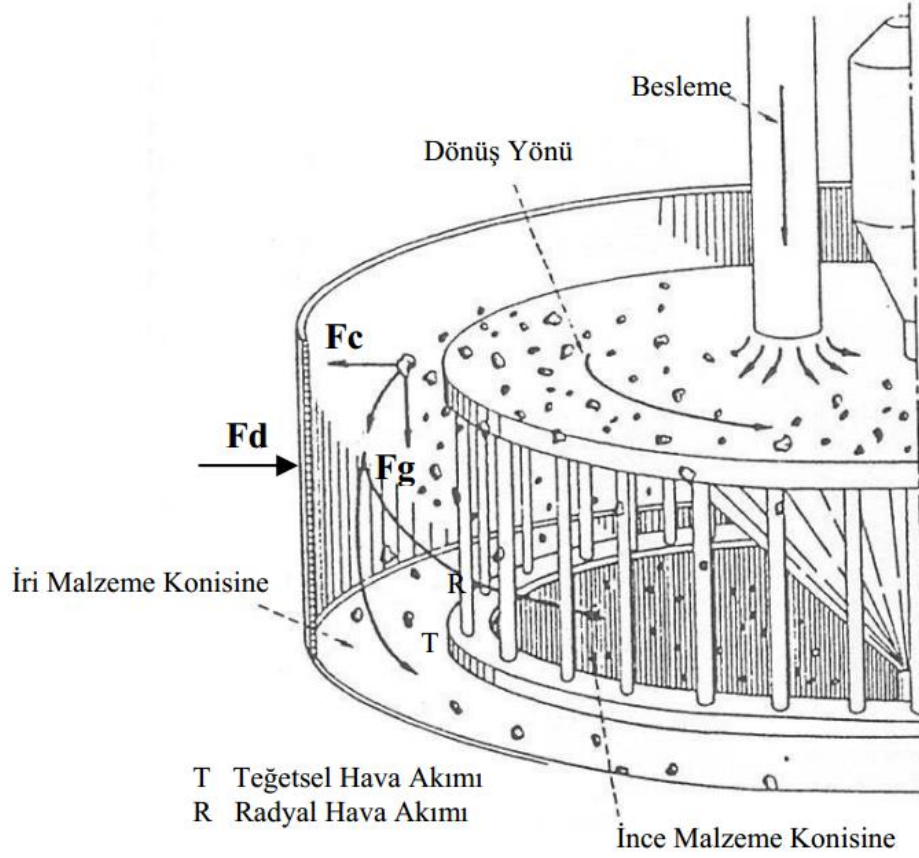
Şekil 2.3 Raymond mekanik sınıflandırıcı [9]

Birinci nesil sınıflandırıcıların düşük maliyetli olmaları bir avantaj olsa da, kaçak miktarlarının yüksek olmasından kaynaklanan düşük verimlilikleri yeni sınıflandırıcı dizaynlarının araştırılmasına sebep olmuştur. İkinci nesil sınıflandırıcıların başında gelen Turbopol sınıflandırıcılarda, sisteme ayrı bir tahrik motoru tarafından kontrol edilen yardımcı bir fan eklemesi yapılmıştır. Bir diğer yenilik ise siklon sınıflandırıcılarda (KHD Humboldt Wedag AG) ince malzemelerin havadan ayrılmasıdır. Bunun için ekipmana toz tutma siklonları eklemesi yapılmış ve ana fan sınıflandırıcının dışına alınmıştır. Bu tasarım ile birlikte toz yükü ve kaçak miktarı azaltılarak ayırım verimliliği iyileştirilmiştir [8].

Birinci ve ikinci nesil sınıflandırıcıların ardından 1980'li yılların başında üçüncü nesil dinamik havalı sınıflandırıcılar (yüksek verimli sınıflandırıcılar) geliştirilmiştir. Bu tip sınıflandırıcılar ile birlikte üretilen çimentoların kalitesi arttırılmış, üretim kapasiteleri iyileştirilmiş ve harcanan enerji miktarı düşürülmüştür [10]. Üçüncü nesil sınıflandırıcılar temelde geleneksel sınıflandırıcılar ile aynı çalışma prensibine sahiptirler. Ancak, üçüncü nesil sınıflandırıcıların kontrolü diğer sınıflandırıcılara göre daha kolay yapılabilmektedir. Bu sınıflandırıcılar hava kaynağı olan harici fanlar, havayı yönlendiren kanatlar ve rotor kafesinden oluşmaktadırlar.

Üçüncü nesil havalı sınıflandırıcılar ile birlikte daha önce havalı sınıflandırıcıların ayırım verimliliklerinde probleme yol açan bazı etmenler giderilmiştir. Bu tip sınıflandırıcılar ile birlikte, ekipmana beslenen taneler çok daha iyi dağıtılabilir. Bu sayede bağlı olan tanelerin tek bir ağır kütle gibi davranıp kaçağa sebep olması durumunun önüne geçilmektedir. Havalı sınıflandırıcıların ayırım performansını etkileyen en önemli faktörlerden bir diğeri olan, tanelerin sınıflandırıcı içerisinde izleyecekleri yolun belirsizliği durumu da üçüncü nesil sınıflandırıcılar ile birlikte ortadan kaldırılmış ve kesme boyu daha kontrol edilebilir hale getirilmiştir.

Üçüncü nesil havalı sınıflandırıcıların sınıflandırma prensibi ve sınıflandırma işleminde etkili olan kuvvetler Şekil 2.4'te verilmektedir [11].



Şekil 2.4 Üçüncü nesil sınıflandırıcıların sınıflandırma prensibi [11]

Bugüne kadar geliştirilen ve çimento sektöründe yaygın olarak kullanılan üçüncü nesil dinamik havalı sınıflandırıcılardan bazıları aşağıdaki listede belirtildiği gibidir.

- TSV © yüksek verimli sınıflandırıcılar
- Sepax © yüksek verimli sınıflandırıcı
- O-Sepa © yüksek verimli sınıflandırıcı
- VSK © sınıflandırıcılar
- Sepol © sınıflandırıcılar
- QDK © sınıflandırıcılar [12]

### 3. HAVALI SINIFLANDIRICILARIN KULLANIM ALANLARI VE UYGULAMALARI

Havalı sınıflandırıcılar çimento, mineral, boya, gıda ve ilaç gibi birçok farklı sektörde kullanılmaktadır. Her bir sektörün ihtiyacına bağlı olarak farklı kullanım amaçlarında ve akım şemalarında havalı sınıflandırıcılar yer alabilmektedirler.

Gıda endüstrisinde yer alan akım şemaları içerisinde nihai üründe istenmeyen iri veya ince tanelerin uzaklaştırılması ve belirli içeriklerin zenginleştirilmesi amacıyla yaygın olarak havalı sınıflandırıcılar kullanılmaktadır. Zenginleştirme amacıyla kullanıma örnek olarak çeşitli tahıl ve baklagillerden protein ve nişastaca zengin fraksiyon üretimi verilmektedir. Protein ve nişastanın ayrımında ideal kesme boyutu 10 µm'dir [13]. Baklagillerden besin harici içeriğin uzaklaştırılmasında da havalı sınıflandırıcıların aktif bir rolü bulunmaktadır [14]. Ayrıca mısırdan protein, nişasta ve mısır lifinde yer alan yağ içeriğinin zenginleştirilmesinde kullanılan ve oldukça pahalı olan yağ yöntemlere bir alternatif olarak, kuru öğütme ve havalı sınıflandırıcılar için çalışmalar yapılmaktadır [15]. Bir diğer çalışma da arpa unu üretiminde yeşil teknoloji olarak havalı sınıflandırıcı kullanımı ile istenmeyen kısımların nihai ürüne karışmasını önlemek üzerinedir [16].

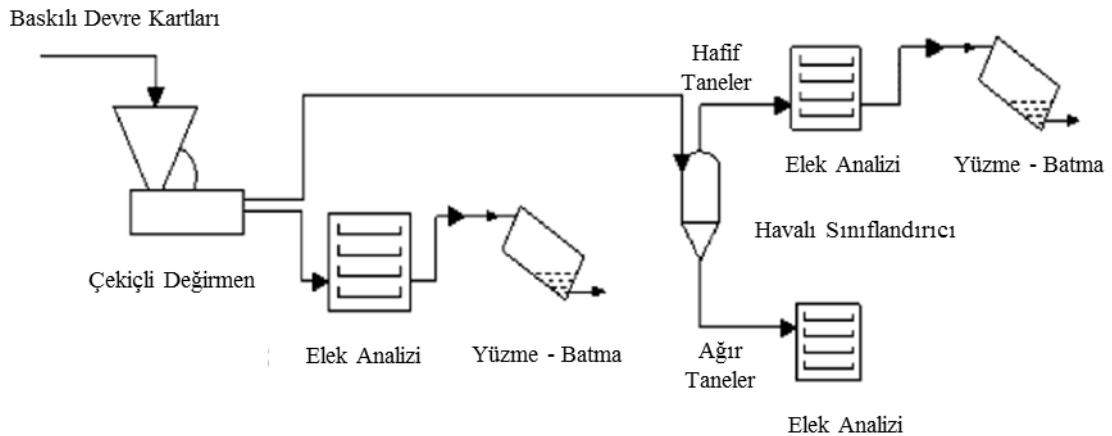
Toner ve toz boya endüstrisinin ihtiyaç duyduğu ince ve dar tane boyu dağılımı için havalı sınıflandırıcılar tercih edilmektedir. Birçok uygulamada 5 ila 10 µm'lik kesme boyu aralığı gereksinimi olmaktadır. Bu sebeple yeni bir teknoloji olan pervane çarklı sınıflandırıcı (MikroCut MC) geliştirilmiştir. Bu sınıflandırıcı ile endüstrinin ihtiyacına göre mikron altı kesme boyutlarına dahi ulaşılabilmektedir [17].

İlaç endüstrisinde ürün inceliği ve özgül yüzey alanı ihtiyacı açısından güvenilir bir ürün kalitesine ulaşmak amacıyla havalı sınıflandırıcılar kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra, işletim parametrelerinin kolay belirlenebilmesi ve birbiriyle etkileşim gösterebilecek iki ayrı malzeme için kullanıldığında temizliğinin kolay yapılabilmesi de havalı sınıflandırıcıların bu endüstride tercih edilmesine sebep olmaktadır. İlaç endüstrisinde çözünmeyi iyileştirmeyi, kimyasal tepkimeyi kolaylaştırmayı ve toz karışımlardaki homojenliği sağlayan ince ürün ihtiyacı yine bu sınıflandırıcılarla sağlanabilmektedir [18, 19]. Xiang Kou ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları bir çalışmada jet değirmen ile havalı sınıflandırıcı kullanarak bu alanda yeni olan yapraksı süt şekeri üretimi yapmışlardır [20].

Toplam piyasa değeri 30 milyar \$ olan fosfat endüstrisi ürünlerinde de havalı sınıflandırıcılar kullanılmaktadır. Madenciliği yapılan fosfatın %85'i fosfat gübresi, %5'i hayvan yemi

katkıları üretiminde ve geri kalan kısmı ise alkolsüz içecek, diş macunu, kabartma tozu, deterjan, haşere ilacı, metal cilası ve su yumuşatıcısı üretiminde kullanılmaktadır [21]. Bir uygulama örneğinde zigzag tipi sınıflandırıcı yardımı ile 25 t/saat kapasite ile 1 mm kesme boyunda fosfat ayrımı gerçekleştirilmiştir. Karatau tesisinde akışkan yataklı sınıflandırıcı kullanılarak 40 t/saat kapasite ve 160 µm kesme boyutu ile fosfat üretimi yapılmaktadır. Bu tesiste %86 saflıktaki fosfat üretiminde ayırım verimi %78 olarak verilmektedir. Bir diğer uygulamada ise yerçekimsel havalı sınıflandırıcı ile 20 t/saat kapasitede, 50-400 µm fraksiyonundaki fosforit %91 saflığa %77 ayırım verimiyle ulaşmaktadır [6].

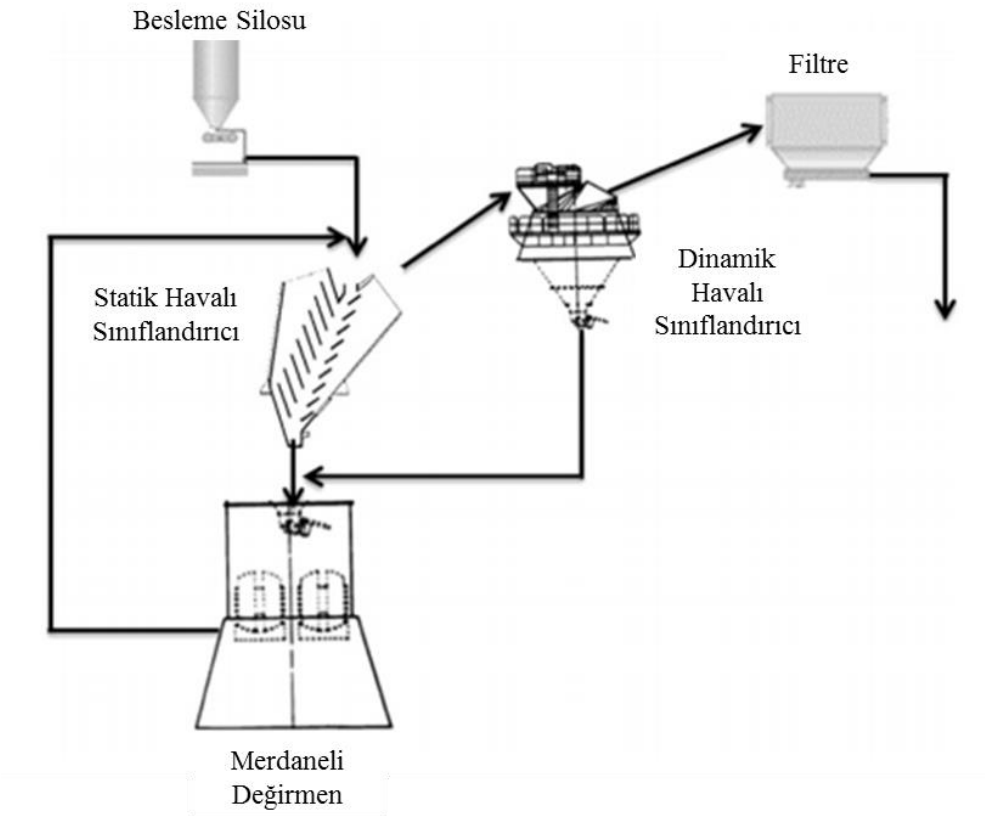
Son yıllarda giderek gelişmekte olan ve yüksek bir üretim kapasitesine sahip olan teknoloji ürünlerinin geri kazanımı büyük bir önem arz etmeye başlamıştır. Yüksek kullanım ve eskiyip hurdaya çıkarılan elektronik cihazların artıkları giderek çok büyük bir ölçüğe sahip olmaktadır. 2004 yılında sadece Amerika’da işe yaramayan 315 milyon adet bilgisayarın çöplüklere, imha fırınlarına ya da tehlikeli atığa gönderildiği tespit edilmiştir. Baskılı devre kartları bu elektronik hurdaların büyük bir çoğunluğunu oluşturmaktadır. Bu parçalarda bulunan plastik ve metal parçaların birbirinden ayrılabilmesi için kullanılan yöntemler çevreye zararlı olan yöntemler olduğundan araştırmacılar yeni yöntemler araştırmaya yönelmişlerdir. Bu kapsamda Eswaraiyah vd. çevreye tamamen zararsız bir yöntem olan havalı sınıflandırıcıyla ayırım yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntemde baskılı devre kartları önce çekiçli değirmende öğütülmekte ve öğütülen malzeme bir havalı sınıflandırıcıya yönlendirilmektedir. Bu çalışmada, sınıflandırıcının performansının belirlenebilmesi için yüzme-batma karakterizasyonu metodu kullanılmıştır (Şekil 3.1.) [22].



Şekil 3.1 Deneysel çalışmalarının şematik gösterimi [22]

Beton üretiminde kullanılan kumun üretiminde de havalı sınıflandırıcılar kullanılmaktadır. Cepuritis vd. bir yerçekimsel havalı sınıflandırıcı kullanarak dik milli kırıcıda (VSI) kırıdıkları malzemeden %90'ı 25 µm altında bir kum elde etmeyi başarmışlardır [23].

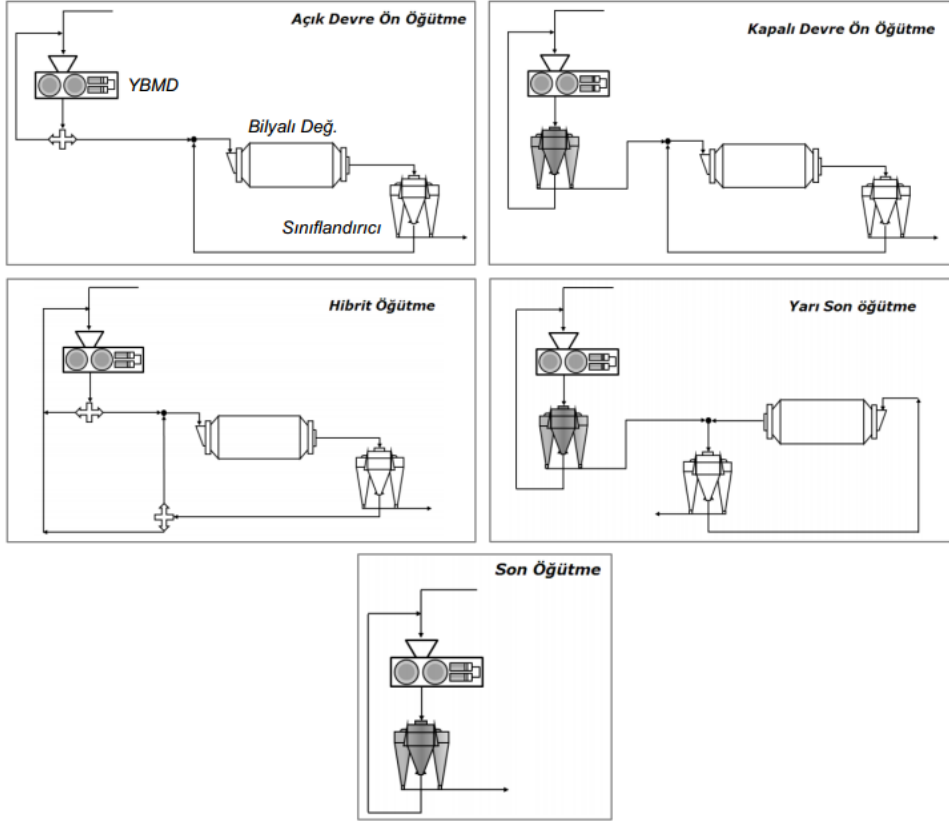
Havalı sınıflandırıcılar mineral endüstrisinde başta çimento endüstrisinin ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kireç taşı ve klinker üretiminde kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra fosfat, mangan, feldspat ve titanyum üretimlerinde de bu sınıflandırıcılar dik değirmenler ile birlikte aktif bir rol almaktadırlar. Şekil 3.2'de Altun vd. kullanmış oldukları bir bakır minerali öğütme devresi verilmektedir [24].



Şekil 3.2 Dik değirmende öğütme akım şeması [24]

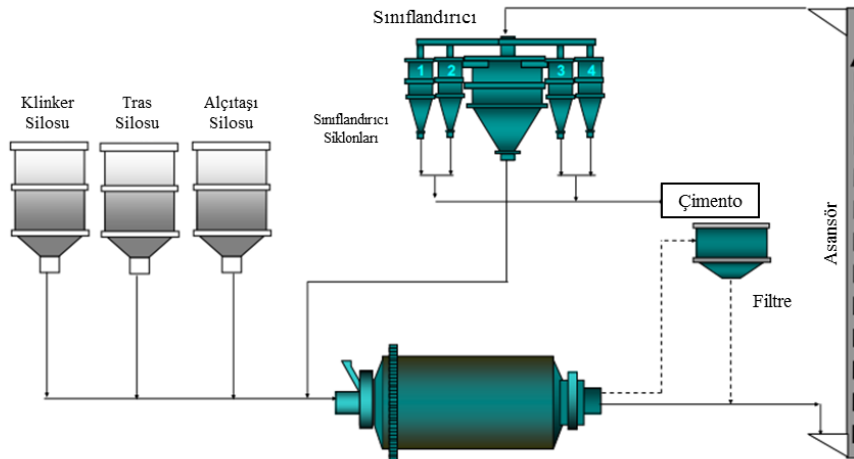
Ülkemizdeki önemli endüstrilerden bir tanesi olan ve Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğinin 2015 yılı verilerine göre yıllık 126 milyon ton kapasiteye sahip olan çimento endüstrisinde, havalı sınıflandırıcı kullanımı oldukça yaygındır [25]. Genellikle yüksek verimli sınıflandırıcıların tercih edildiği çimento endüstrisinde, Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmen (YBMD) öğütme devrelerinde etkin bir yöntem olarak sunulmaktadır. Açık, kapalı, hibrit, ön ya da son öğütme olarak kullanılabilen YBMD'ler, havalı sınıflandırıcılar ile birlikte kullanılmaktadır (Şekil 3.3) [26] [27].





Şekil 3.3 Havalı Sınıflandırıcıların YMBD ile kullanıldığı öğütme devreleri [26]

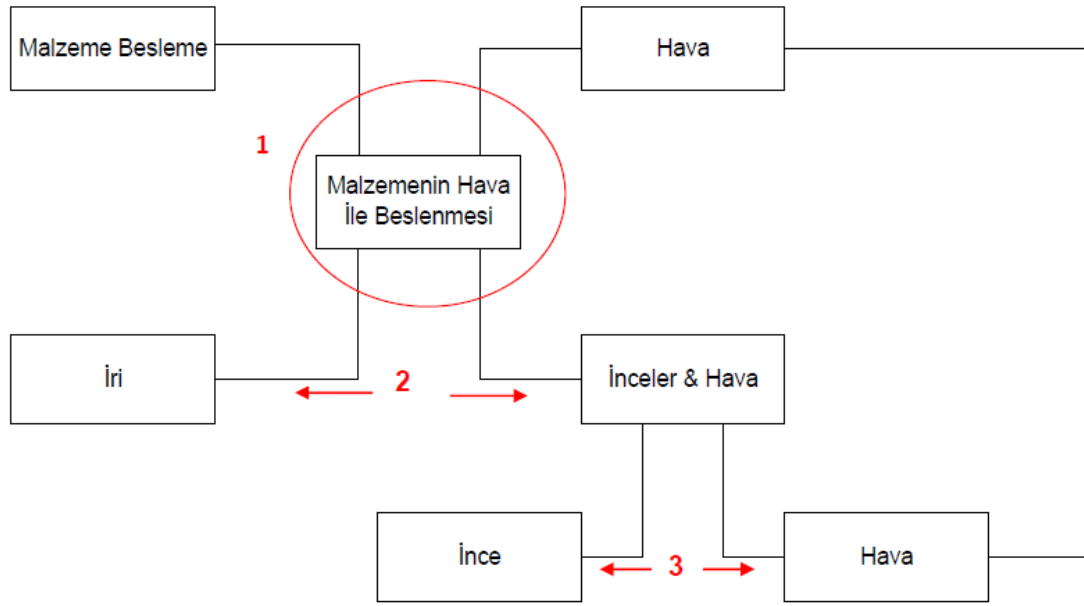
Genellikle çimento endüstrisinde kullanılan değirmenler, bir dinamik sınıflandırıcı ile kapalı ya da açık devre olarak çalıştırılmaktadır. Kapalı devre çalışan öğütme sistemleri, açık devre ile çalışan sistemlere nazaran %15 daha az enerji harcamaktadırlar. Şekil 3.4'te portland çimento üretiminde kullanılan tipik bir kapalı devre akım şeması verilmektedir [28].



Şekil 3.4 Kapalı devre akım şeması [28]

#### 4. HAVALI SINIFLANDIRICILARIN AYRIM MEKANİZMALARI

Havalı sınıflandırıcılar, temelde sisteme beslenen malzemeleri havanın sürüklenme kuvveti, yerçekimi kuvveti, merkezkaç kuvveti ve tanelerin birbirlerine çarpışmalarıyla oluşan çarpışma kuvvetinden yararlanarak iri ve ince olarak ayrıştırma işlemini yapmaktadırlar. Ayrım işlemi, sınıflandırılmak istenen malzemenin sisteme beslenmesi, sınıflandırılması ve iri ve ince ürünün ayrı ayrı toplanması olarak üç kademedede gerçekleşmektedir (Şekil 4.1) [12].



Şekil 4.1 Havalı sınıflandırıcıların ayırım kademeleri [28]

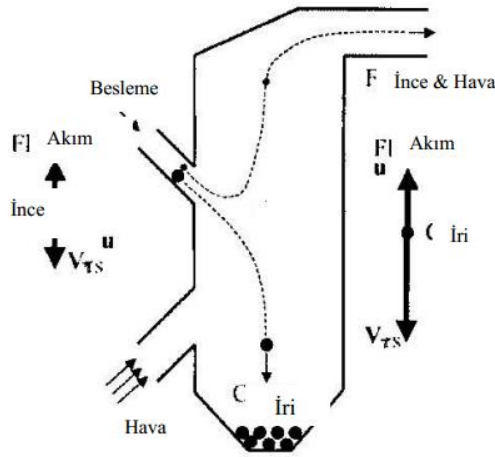
##### 4.1. Besleme Şekli

Sınıflandırılmak istenen malzemenin sisteme hava yardımıyla sınıflandırmanın gerçekleşeceği bölgeye gönderilmesidir. Besleme şekilleri sınıflandırıcının kullanılacağı duruma göre değişkenlik göstermektedir. Birbirinden farklı özelliklere sahip olan besleme şekilleri aşağıda verilmektedir [6].

- Besleme doğrultusuna ters akım
- Beslemeyi kesen akım
- Merkezkaç-karşı akım
- Merkezkaç-beslemeyi kesen akım [6]

#### 4.1.1. Besleme Doğrultusuna Ters Akım

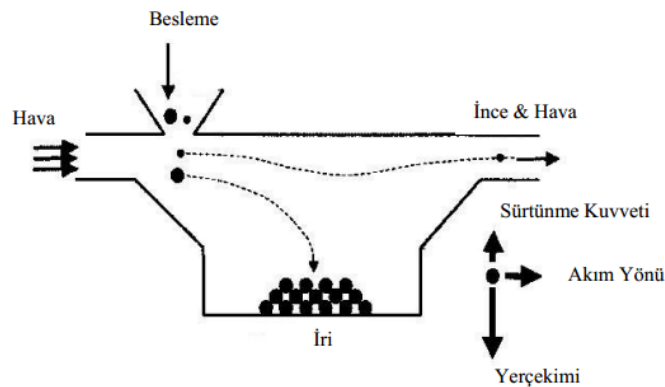
Besleme doğrultusuna ters akımda temel olarak sınıflandırıcıya giren malzeme ve havanın birbirine ters yönde olması durumu bulunmaktadır. (Şekil 4.2) Sisteme beslenen taneciklere etki eden yerçekimi sürüklenme kuvveti ve yerçekimi kuvveti birbirlerine zıt yöndedir. Sınıflandırıcının alt tarafından verilen havanın hızını yenebilecek terminal hıza sahip olan iri taneler sınıflandırıcının aşağısından alınmaktadır. Havanın hızının daha etkin olduğu ince taneler ise hava ile birlikte üst kısımdan sistemi terk etmektedir. Bu durumda kesme boyunu hesaplayabilmek için  $G=F_d$  denkleğinden yararlanılmaktadır [6].



Şekil 4.2 Besleme doğrultusuna ters akım [6]

#### 4.1.2. Beslemeyi Kesen Akım

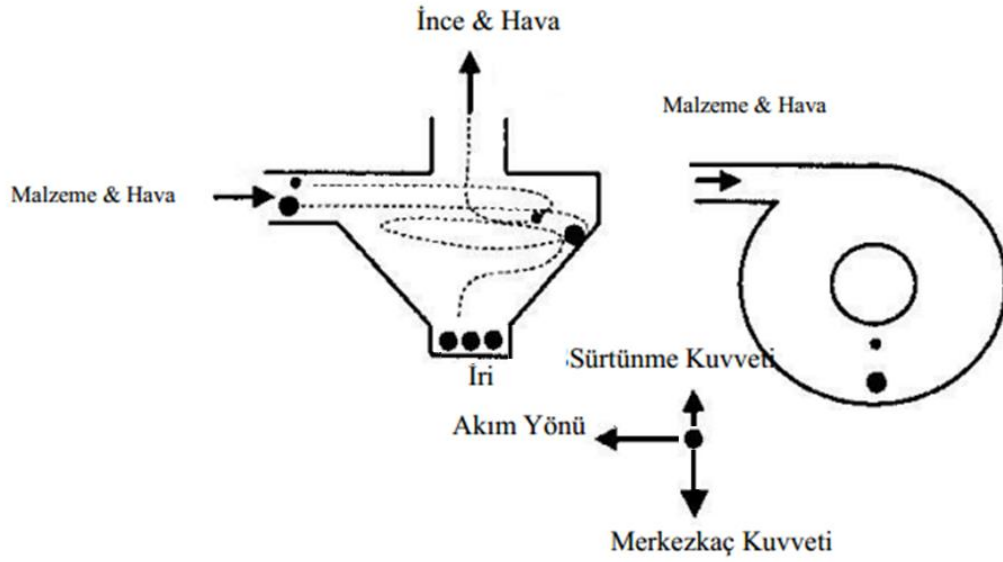
Bu besleme şeklinde sisteme hızı sıfır olarak beslenen malzeme ile hava birbirine 90° olacak biçimdedir (Şekil 4.3). Hava sisteme girdikten sonra genişçe bir bölmeden geçer ve sistemi ince taneler ile birlikte terk eder. Havanın etkili olamadığı iri taneler ise alt bölmede toplanır [6].



Şekil 4.3 Beslemeyi kesen akım [6]

#### 4.1.3. Merkezkaç-Karşı Akım

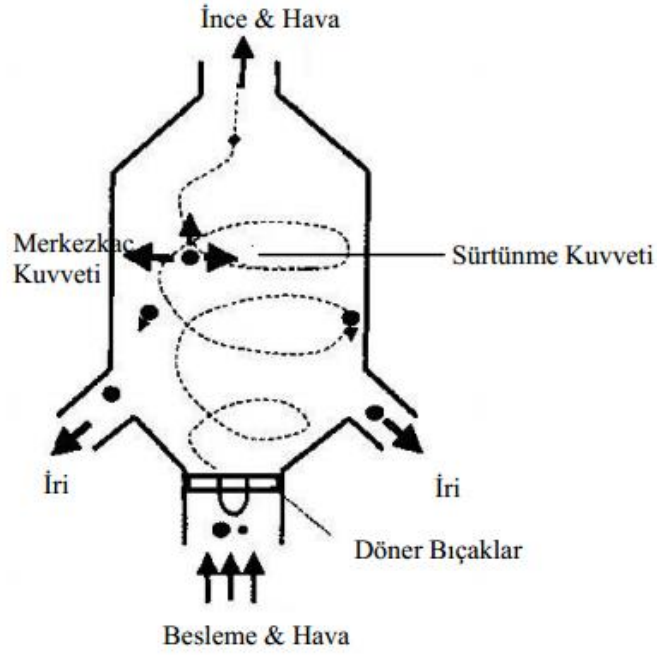
Bu besleme şeklinde sistemde besleme teğetsel olarak yapılmaktadır. Ayrıca sistemde merkezi çıkış ve silindirik bir kısım bulunmaktadır (Şekil 4.4). Hava malzeme ile birlikte sisteme radyal bir şekilde girmektedir. Bu durumun bir sonucu olarak tanelerin ayırım bölgesi oluşmaktadır. Bu ayırım mekanizmasında tanecikler üzerinde sürüklenme kuvveti ve yerçekimi kuvveti etkili olmaktadır [6].



Şekil 4.4 Merkezkaç-karşı akım [6]

#### 4.1.4. Merkezkaç-Beslemeyi Kesen Akım

Bu besleme tipinde hava ile malzeme sisteme döner bıçaklar yardımıyla beslenmektedir (Şekil 4.5). Sistem içerisine bu etkiyle birlikte giren tanecikler döngüsel akıma kapılarak dış çeperlere doğru savrulmaktadır. İri tanelerin çapları daha büyük olduğundan ince tanelere kıyasla daha fazla bir hıza sahip olmaktadır. Dolayısıyla iri taneler çeperlere ince tanelerden daha kısa zamanda varmaktadır. Taneciklerin çapları arasındaki farktan yararlanan bu besleme tipinde, hava hızını yenemeyen ince taneler sistemi üst akımdan terk ederken, iri taneler alt akımdan toplanmaktadır [6].



Şekil 4.5 Merkezkaç-beslemeyi kesen akım [6]

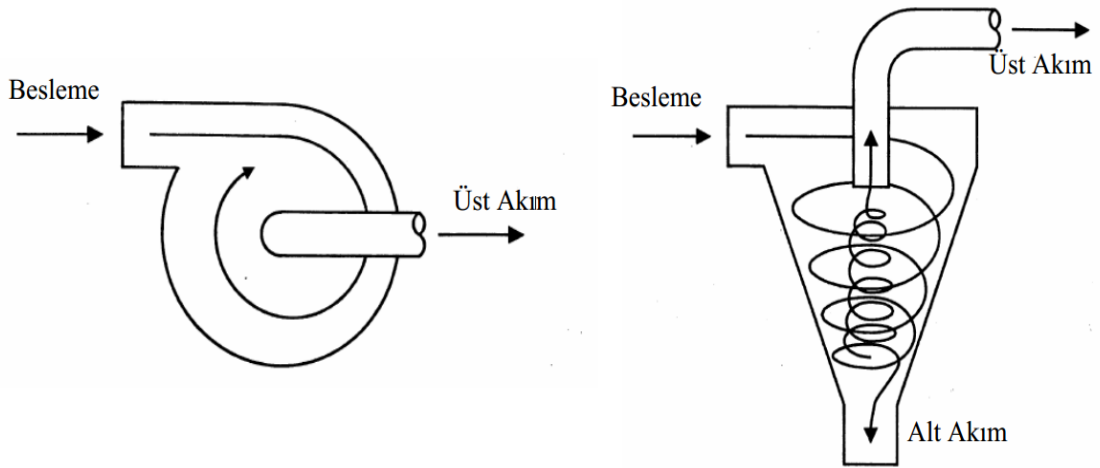
#### 4.2. Sınıflanma İşlemi

İri taneler, hava ve ince tanelerden ayrılırken merkezkaç, yerçekimi ve havanın sürüklenme kuvvetinden yararlanırlar. Bu kuvvetler taneler üzerinde etkili olurlar ve bu kuvvetlerin tane boyuyla arasında doğru orantı bulunmaktadır. Yerçekimi kuvveti ile tanelerin çaplarının küpleri arasında doğru orantı vardır. Buradan yola çıkarak, tanelerin boyutları inceldikçe yerçekimi kuvvetinin azaldığı ve tanelerin daha çok hava akımı ile taşındıkları söylenebilir. Bahsedilen kuvvetlerin birbirine eşit oldukları tane boyundaki malzemeler denge konumunda kalmaktadırlar. Bu tane boyuna kesme boyu adı verilmektedir. Kesme boyu  $d_{50}$  olarak ifade edilmektedir. Ayrırma işlemi bu değer ile değerlendirilmektedir. Bu tane boyundan daha ince olan taneler ince ürüne, daha iri olan taneler ise iri ürüne gitmektedirler. Ancak ince tanelerin bir kısmı, tanelerin birbirleriyle olan çarpışmalarından ve hava türbülansından etkilenerek iri ürüne gitme eğilimi gösterirler. Bu olay kaçak olarak adlandırılmaktadır. Kaçak miktarının düşük ya da yüksek olması ile sınıflandırma işleminin kalitesi belirlenmektedir [6].

### 4.3. Ürünün Elde Edilmesi ve Havanın Geri Kazanımı

Havalı sınıflandırıcıya beslenen malzemeler sınıflandırıldıktan sonra ince taneler havadan ayrıştırılarak toplanmaktadır. İnce malzemelerden ayrılan hava, açık sistemler ile atmosfere geri kazandırılmakta ya da sisteme yeniden verilebilmektedir. Havanın geri kazanımı için endüstride toz tutma siklonları ve filtreler kullanılmaktadır [12].

Toz tutma siklonları, temelde ince taneleri ve havayı birbirinden ayırmak için merkezkaç kuvvetinden faydalanan, düşük maliyete sahip ve basit ekipmanlardır. Hava-malzeme karışımı, ekipmana silindirik bölmenin üstünden teğetsel olarak beslenmektedir. Silindirik bölmede aşağı doğru dairesel olarak ilerleyen bu karışım merkezkaç kuvvetine maruz kalmaktadır. Merkezkaç kuvvetinin etkisiyle katı olan malzeme siklonun çeperlerine doğru yönelmekte ve alt akımdan alınmaktadır. Hava ise üst akımdan siklondan çıkmaktadır (Şekil 4.6) [29].

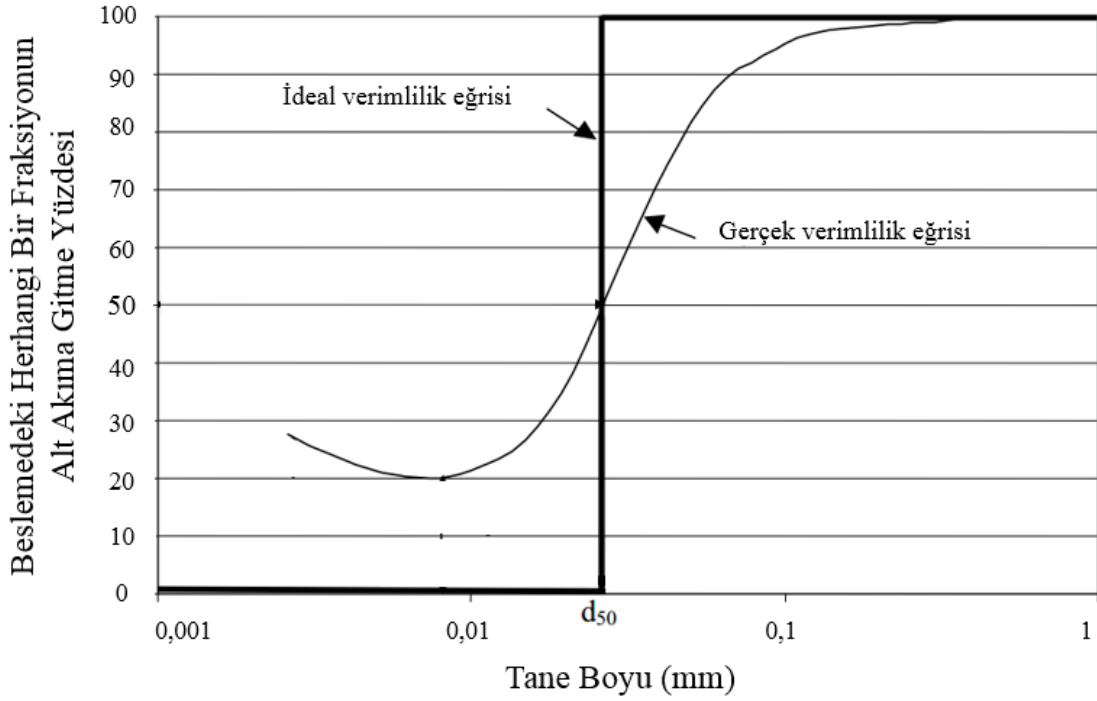


Şekil 4.6 Toz tutma siklonları

Havanın geri kazanımında kullanılan bir diğer ekipman ise filtrelerdir. Filtreler hava-malzeme karışımındaki toz tanelerini tutmakta ve temiz havanın sistemden alınmasını sağlamaktadırlar. Elektrofiltreler günümüzde en çok kullanılan filtre çeşitleridir [30].

## 5. HAVALI SINIFLANDIRICILARIN VERİMLİLİK EĞRİLERİ VE PERFORMANS DEĞİŞKENLERİ

Havalı sınıflandırıcıların performanslarının değerlendirilebilmesi için verimlilik (Tromp) eğrisi adı verilen eğrinin çizilmesi gerekmektedir. Tromp eğrisi genel olarak sınıflandırıcıların verimliliğinin incelenmesinde en yaygın kullanıma sahip yöntemdir. Şekil 5.1'de gösterilmekte olan örnek bir eğriden, bir sınıflandırıcıya beslenen malzeme içerisindeki her bir fraksiyonun iri ya da ince ürüne gitme olasılığı tespit edilebilmektedir. Grafiğin X eksenini tane boyunu ifade ederken, Y eksenini ise her bir fraksiyona denk gelen iri ya da ince üründe olma olasılığını belirtmektedir [31].



Şekil 5.1 İdeal ve gerçek verimlilik eğrileri

Sınıflandırıcıda mükemmel bir ayırımın yapıldığı koşulda belirli bir boyun altındaki malzemenin %100'ü üst akıma gidecek iken, kalan bölüm de alt akımdan ekipmanı terk edecektir. Bu koşulda ideal bir eğri elde edilecektir. Ancak hiçbir sistem tam verimle çalışmadığından, ideal eğriden sapmalar gözlemlenmektedir. Bu noktada Şekil 5.1'den de anlaşılacağı üzere eğrinin şekli değişim göstermekte ve gerçek verimlilik eğrisi elde edilmektedir.

## 5.1. Gerçek Verimlilik Eğrisi

Sınıflandırıcının verimliliğinin düzenli bir şekilde kontrol edilmesi ve işletim değişkenlerinin etkilerinin ortaya konulması amacıyla gerçek verimlilik eğrisi çizilmektedir (Şekil 5.2). Bir tesiste çalıştırılan bir sınıflandırıcının performans kriterleri gerçek verimlilik eğrisinden çıkarılan bilgiler ışığında belirlenir. Bu bağlamda, kaçak, kesme boyu, balık oltası ve ayırım keskinliği (imperfection) değişkenleri bu eğriden saptanabilmekte ve yorum yapılabilmektedir. Burada bahsedilen kesme boyu ( $d_{50}$ ) sınıflandırıcı içerisine beslenen malzeme içerisindeki, iri veya ince ürüne gitme olasılığının eşit olduğu tane boyunu ifade etmektedir. Kaçak ise sınıflandırma işlemine hiç tabi olmadan iri ürüne giden malzeme miktarını belirtmektedir ve gerçek verimlilik eğrisinde minimum Y eksenine değeri kabul etmektedir [32]. Bu minimum değerden ince tane boyuna gittikçe eğrinin tekrardan dikleşmesi balık oltası olarak ifade edilmektedir. Bu etkinin taneciklerin topaklanması ya da sınıflandırıcı duvarından geri sıçramasına bağlı olduğu belirtilmektedir [33]. Sınıflandırıcının ayırım keskinliği gerçek verimlilik eğrisinin orta bölümünün eğimine bağlıdır. Buradaki eğim ne kadar dik olursa, sınıflandırma verimi de o kadar iyi olmaktadır. Eğim üzerindeki %75 ve %25'e denk gelen tane boyu değerleri (sırasıyla  $d_{75}$  ve  $d_{25}$ ) ile Eşitlik 5.1 kullanılarak bir ayırım keskinliği (imperfection) hesaplanabilmektedir [32].

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}} \quad \text{Eşitlik 5.1}$$

I: Ayırım keskinliği (imperfection)

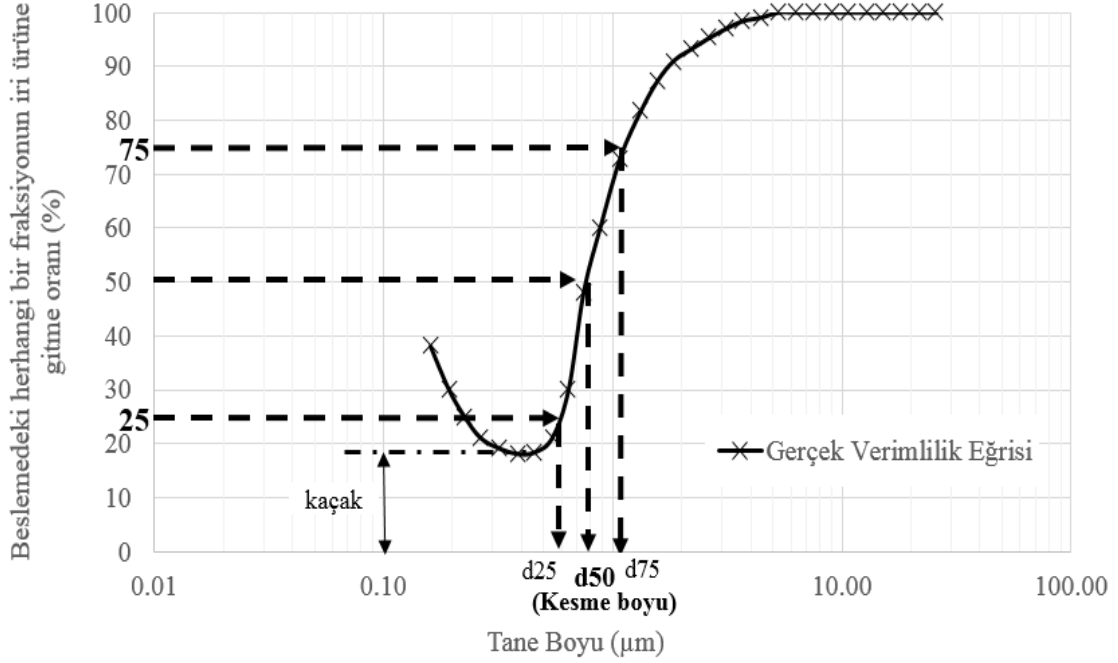
$d_{75}$ : %75 oranında iri ürüne giden tane boyu

$d_{25}$ : %25 oranında iri ürüne giden tane boyu

$d_{50}$ : Kesme boyu

Yukarıdaki eşitlikte (Eşitlik 5.1) bahsedilen I değeri için, 0'a ne kadar yakın bir değer elde edilirse sınıflandırıcının verimi o kadar iyi olacaktır [32].





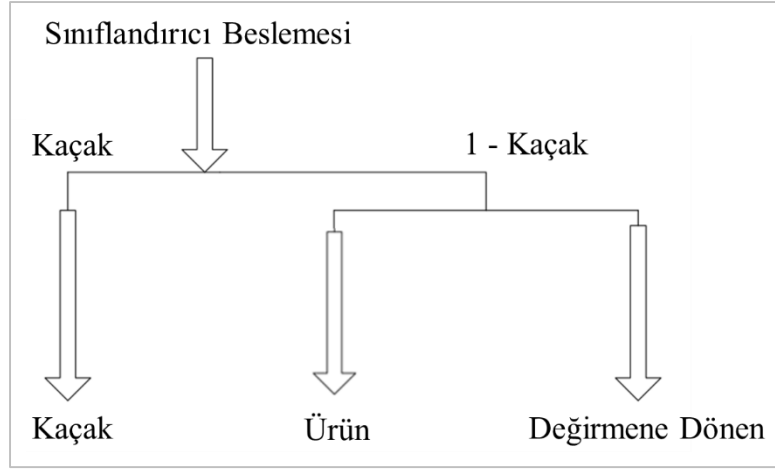
Şekil 5.2 Örnek bir veri setine ait gerçek verimlilik eğrisi

Gerçek verimlilik eğrisi aşağıda belirtilen adımlar izlenerek çizilmektedir.

- Performansı belirlenmek istenen sınıflandırıcının iri akışından, ince akışından ve beslemesinden numune alınır ve her biri için tane boyu dağılımları belirlenir.
- Madde denkliği çalışması yapılarak her bir akışın malzeme miktarı belirlenir ve böylece aynı zamanda deneysel verilerdeki hatalar giderilmiş olur.
- Beslemede yer alan her bir tane boyu fraksiyonunun ince veya iri akışta bulunma oranları hesaplanır [32].

## 5.2. Düzeltilmiş Verimlilik Eğrisi

Şekil 5.2'den de anlaşılacağı üzere gerçek verimlilik eğrisinde y eksenini çoğunlukla 0 değerine ulaşmamaktadır. Eğrinin en düşük y eksenini değeri sınıflandırıcının kaçak miktarını belirtmektedir. Bu sebeple bir kaçak modeli geliştirilmiştir [34]. Bu modelde, sınıflandırıcıya beslenen malzemenin belirli bir kısmının hiç sınıflandırma işlemine tabi olmadan iri akışa gittiği kabul edilmektedir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Kaçak modeli [34]

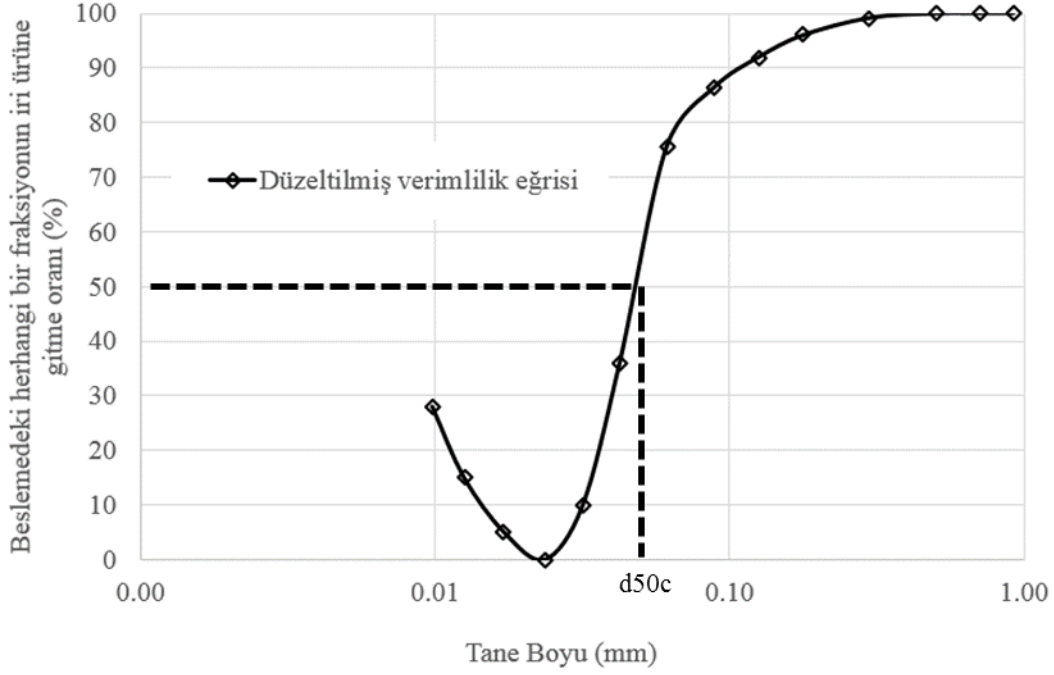
Kaçak modeline göre sınıflandırıcı besleme, kaçak ve kaçak olmayan kısım (1 – kaçak) olmak üzere ikiye ayrılır. Gerçek verimlilik eğrisinde yer alan y eksenı değerleri aşağıdaki eşitlikte (Eşitlik 5.2) kullanılarak ve her bir tane boyu fraksiyonundan kaçak yüzdesi çıkarılarak düzeltilmiş verimlilik eğrisi elde edilmektedir (Şekil 5.4).

$$E_{uc} = \frac{y-R}{100-R} \quad \text{Eşitlik 5.2}$$

$E_{uc}$ : Alt akıma göre bulunan düzeltilmiş verimlilik eğrisi olasılık değeri

R: Kaçak yüzdesi

y: Alt akıma göre bulunan gerçek verimlilik eğrisi olasılık değeri

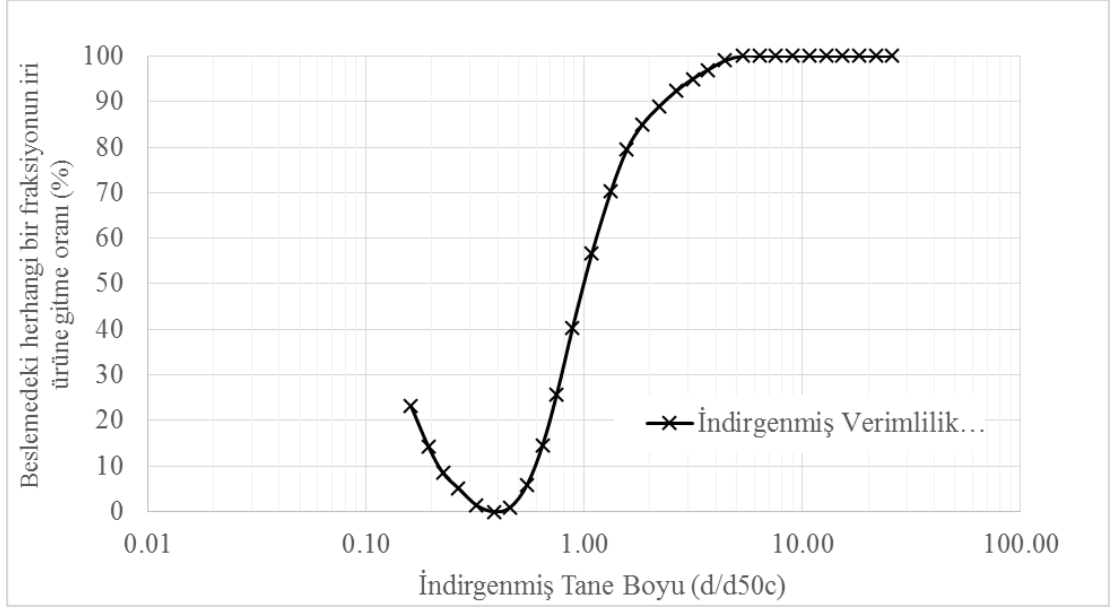


Şekil 5.4 Düzeltilmiş verimlilik eğrisi

Düzeltilmiş verimlilik eğrisinde, beslemedeki malzemelerin her iki akışa da (iri veya ince ürün) gitme ihtimalinin eşit olduğu tane boyu düzeltilmiş kesme boyu ( $d_{50c}$ ) olarak ifade edilir [32].  $d_{50c}$  parametresi bu tez çalışması kapsamında yapılan modelleme çalışmalarında kullanılan Whiten eşitliğinde yer almaktadır. Bu nedenle verimlilik eğrisinin matematiksel olarak değerlendirilmesinde büyük öneme sahiptir.

### 5.3 İndirgenmiş Verimlilik Eğrisi

Düzeltilmiş verimlilik eğrisinde, beslemedeki malzemelerin her iki akışa da (iri veya ince ürün) gitme ihtimalinin eşit olduğu tane boyu düzeltilmiş kesme boyu ( $d_{50c}$ ) olarak ifade edilir. Bu eğride yatay ekseninde bulunan tane boyları  $d_{50c}$ 'ye bölünerek normalize etme işlemi yapılmakta ve buradan da indirgenmiş verimlilik eğrisi elde edilmektedir (Şekil 5.5.)



Şekil 5.5 İndirgenmiş verimlilik eğrisi

İndirgenmiş verimlilik eğrisi sınıflandırıcının ayırma işlemi sırasında her bir tane boyu fraksiyonunun diğer fraksiyonlara göre nasıl davrandığını belirtmektedir. Birden çok sınıflandırıcının performanslarının karşılaştırılmasında bu eğriden faydalanılmaktadır. Her bir sınıflandırıcının verimlilik eğrisi indirgenmiş verimlilik eğrisi haline getirilerek tek bir grafik üzerinde sınıflandırıcılar arası kıyaslama yapılabilmektedir.

İndirgenmiş verimlilik eğrisinin sınıflandırıcıların işletim koşullarına ya da geometrilerine bağlı olmadığını belirten Lynch ve Rao, bu eğrinin yalnızca malzeme özelliklerine göre değişim gösterdiğini bildirmektedirler. Bu çalışmalar ışığında, sınıflandırılmak istenen malzemenin şeklinin ve özgül ağırlığının verimlilik eğrisi üzerine doğrudan etki ettiği sonucuna varılmıştır [35].

## 5.4 Sınıflandırıcı Performansı Üzerinde Etkili Olan Değişkenler

### 5.4.1 Kesme Boyu

Sınıflandırıcı içerisinde sınıflandırmaya tabi tutulan tanelere etki eden merkezkaç ve sürüklenme kuvvetlerinin dengede olduğu durumda tanelerin iri ya da ince akışa gitme olasılıkları eşittir. Bu durumdaki tanelerin boyutları kesme boyunu ifade etmektedir.

Sınıflandırıcıların verimlilik eğrileri sınıflandırma işini nasıl bir verimlilikle ve hangi kesme boyunda yaptıklarını ifade etmektedir. Bu eğriye göre sınıflandırıcıya beslenen malzemenin tane boyu dağılımı irileştikçe malzemenin iri ürüne gitme verimliliği artmaktadır. Yine aynı

şekilde sınıflandırıcıya giren malzeme ince boyutta ise malzemenin ince ürüne gitme verimliliği artacaktır. Buradan yola çıkılarak bir sınıflandırıcının kesme boyuna yapılacak bir etki ile o sınıflandırıcının ayırım verimliliğine doğrudan etki edildiği sonucu çıkarılmaktadır [36].

#### **5.4.2 Tanelerin Sınıflandırıcı İçerisindeki Davranımı**

Tanelerin bir çok özelliğinin havalı sınıflandırıcıda gerçekleşen sınıflandırma işleminde etkili olduğu bilinmektedir. Bunlardan ilki tanelerin hava akımı içerisinde çökme hızları arasındaki farklılıklardır. Bu farka göre sınıflandırma işlemi gerçekleşmektedir. Geçmişte yapılan çalışmalarda bu farklılığın etkili olduğu desteklenmektedir [36].

Bir diğer özellik, uçucu kül gibi gözenekli yapıya sahip tanelerin davranımıdır. Gözenekli yapı tanelerin yoğunluğunu düşürmektedir. Bu da çökme hızına doğrudan etki etmektedir.

Tanelerin küreselliği bir diğer etkidir. Bu noktada tanelerin yüzey alanları değişmekte ve hava akımı tanenin üzerindeki farklı noktalarda değişiklik göstermektedir. Kalınlığı, uzunluğunun altıda biri olan bir mika tanesinin iri ürüne gitmesi beklenirken, bu yapraksı yapısından dolayı ince ürüne gittiği görülebilmektedir.

Sınıflandırma üzerinde etkili olan değişkenlerden bir diğeri ise tanelerin yoğunluğudur. Tane boyu küçük olan bir tanenin yoğunluğunun yüksek olması, bu tanenin iri ürüne gitmesine sebep olabilmektedir. Bunun tam tersi durumda, tane boyu iri olan bir tanenin yoğunluğu düşerse, tane ince ürüne gidebilmektedir [36].

#### **5.4.3 Tanelerin Topaklanma Yönelimi**

Taneler bir araya gelerek topaklanma eğilimi gösterebilmektedirler. Özellikle ince tanelerde görülen bu yönelim, bu tanelerin bir araya gelerek bir topak ya da küme oluşturması durumu olarak ifade edilmektedir. Sınıflandırılmak istenen malzeme içerisindeki 10 µm'den daha küçük tane boyuna sahip olan malzemelerin fazla olması bu eğilimi arttırmaktadır. Bu da sınıflandırıcıya beslenen malzemenin akışkanlık özelliğinin azalmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla malzemenin tane boyu dağılımı da farklılaşmaktadır [29]. Bu farklılık sınıflandırıcının performansının kötü olmasına sebep olmaktadır.

Bir malzeme içerisindeki taneciklerin bir araya gelerek topaklanmasına etki eden nedenler aşağıda verilmektedir [29].

- Yüzey çekimi: 10  $\mu\text{m}$ 'nin altındaki taneler üzerinde Van der Waals gibi yüzey çekim kuvvetleri daha etkili olmakta ve dolayısıyla bu tane boyundaki tanelerin topaklanma eğilimi artmaktadır.
- Nem miktarı: Malzeme içerisinde bulunan nem, taneciklerin arasındaki yüzey gerilimini arttırmakta ve bunun sonucunda da taneciklerin birbirlerine tutunma olasılığı artmaktadır. Nemin bir diğer etkisi ise bir miktar katının çözünmesine sebep olmak ve akabinde çözünen katının bağlayıcı eleman görevi görmesini sağlamaktır.
- Elektrostatik çekim: Sınıflandırıcıya beslenen malzemenin tanecikleri üzerindeki yüzey yükleri taneciklerin birbirlerine tutunmalarına sebep olan bir diğer etmendir [29].

#### **5.4.4 Akışkanın Akmaya Karşı Direnci**

Havalı sınıflandırıcılarda kullanılan akışkan, sıcaklığı yükseltilmiş veya düşürülmüş bir hava olabilmektedir. Bunun yanında nitrojen gibi havadan farklı akışkan özelliğe sahip olan bir gaz da kullanılabilir. Sınıflandırıcılarda kullanılan bu farklı akışkanların farklı akışkanlık özellikleri, sınıflandırıcıya beslenen taneler üzerinde farklı sürüklenme kuvvetleri oluşmasına neden olmaktadır. Bu sebeple farklı özelliklere sahip akışkanlar kullanılan sınıflandırıcılarda aynı kesme boyunu ayarlayabilmek için tanelere etkiyen eylemsizlik, yerçekimsel ve merkezkaç kuvvetlerinin de benzer şekilde düzenlenmesi gerekmektedir [36].

#### **5.4.5 Yüzey Alanı**

Havalı sınıflandırıcıların kapasitelerinin hesaplanmasında en önemli etmenlerden bir tanesi de birim hacim içerisinde yer alan tane sayısıdır. Sınıflandırıcıya beslenen malzeme daha ince taneli oldukça, birim hacme düşen tane sayısı artacaktır ve bu da sınıflandırıcının performansına olumsuz bir etki yapacaktır.

Sınıflandırıcıya beslenecek olan malzeme sınıflandırıcı öncesinde öğütme işlemine tabi tutulmakta ve bu işlem sonucunda malzeme homojen olmayan bir yapıya sahip olduğundan, yüzey alanı belirlenirken Blaine testinden faydalanılmaktadır [12].

### **5.5 Operasyonel Değişkenlerin Etkileri**

Yukarıdaki başlıklarda bahsedilen değişkenlerin bazıları besleme hızı, hava hızı ve rotor hızı gibi operasyonel değişkenlerle kontrol edilebilmektedir.

Bir sınıflandırıcının ayırım verimliliğini etkileyen önemli etmenlerden bir tanesi sınıflandırıcıya beslenen malzemenin sınıflandırıcı içerisinde etkin bir şekilde dağıtılmasıdır. Etkin bir dağıtma işleminin gerçekleşmediği durumda ince taneler iri tanelerin üzerine yapışmakta ve iri ürüne gitmektedirler. Bu sebeple etkin bir dağıtma işlemi yapmak kritik öneme sahiptir [37].

Sınıflandırıcıya beslenen havadaki malzeme miktarı da sınıflandırıcının performansına etki etmektedir. Yüksek katı oranında çalışan bir sınıflandırıcıda ürünün tane boyu dağılımı yatay iken, düşük katı miktarında çalışan bir sınıflandırıcıda ürünün tane boyu dağılımı daha dik olmaktadır. Bu yüzden sınıflandırıcıya beslenen malzeme miktarının artması sınıflandırıcının performansına olumsuz yansımaktadır [37].

Sınıflandırıcıya verilen havanın hızı da bir diğer kritik noktadır. Hava hızının olması gerekenden fazla olması durumunda kaçak miktarında artış gözlenmektedir [36].

Sınıflandırıcı içerisindeki rotorun dönüş hızı arttırıldığında, tanecikler üzerine etki eden merkezkaç kuvveti artmakta ve bu da kesme boyunu düşürmektedir. Sınıflandırıcıya beslenen hava hızı arttırıldığında ise tanecikler üzerinde etkili olan ve merkezkaç kuvvetine ters yönde etki yaratan sürüklenme kuvveti artmaktadır. Bu durumda kesme boyu yükselmektedir [12].

## 6. HAVALI SINIFLANDIRICILARIN MODELLENMESİ

Havalı sınıflandırıcıların performanslarının değerlendirilebilmesi ve daha iyi performans tahminleri yapılabilmesi amacıyla günümüze kadar birçok modelleme yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu modelleme çalışmalarında havalı sınıflandırıcıların verimlilik eğrisinin daha doğru bir şekilde ifade edilmesi ile işletim değişkenleri arasındaki ilişkilerin tanımlanması amaçlanmıştır.

Alt bölümlerde farklı yaklaşımlara göre bugüne kadar gerçekleştirilmiş olan modelleme çalışmalarından bahsedilmektedir.

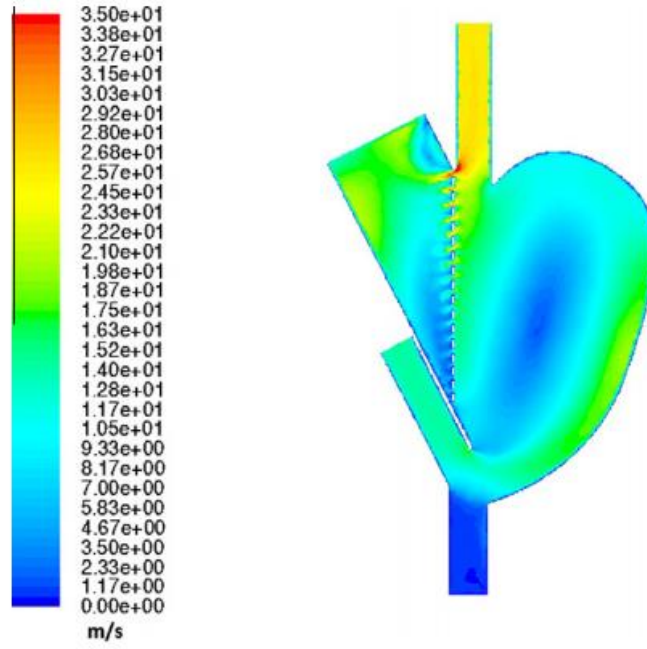
### 6.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Yöntemi ile Modelleme

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, birçok tek fazlı veya çok fazlı akışların modellenmesinde kullanılan bir matematiksel araçtır. Bir dinamik separatörün CFD yöntemiyle simülasyonundaki temel amaç tasarım iyileştirmelerinin yapılabilmesi için doğru bir şekilde ayırma veriminin tahmin edilebilmesidir. Ancak bu noktada böyle bir ekipman içerisindeki akış alanını anlamak gerekmektedir. Çok fazlı akışlar için kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminde dinamik separatörün modellenmesi Lagrangian yaklaşımına göre yapılmaktadır [38].

Statik havalı sınıflandırıcılar kategorisinde bulunan karşıt akımlı havalı sınıflandırıcı üzerinde yapılan bir çalışmada ise hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemini kullanılarak sınıflandırıcı performansı incelenmiştir. Ayırım keskinliğinin irdelendiği bu çalışmada, sınıflandırıcının geometrisinin ve işletim parametrelerinin optimize edilmesi amaçlanmıştır [39].

Bir başka statik havalı sınıflandırıcı tipi olan yerçekimsel havalı sınıflandırıcı, Johansson ve Evertsson tarafından yine hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodu kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışmada, akış alanını kontrol eden değişkenlerin ve bu değişkenlerin ayırım performansı üzerine nasıl bir etkisinin olduğunun daha iyi anlaşılabilmesi hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen çıktılara örnek olarak Şekil 6.1'deki ayırım bölgesi etrafındaki akış hızları dağılımı verilmektedir [40].

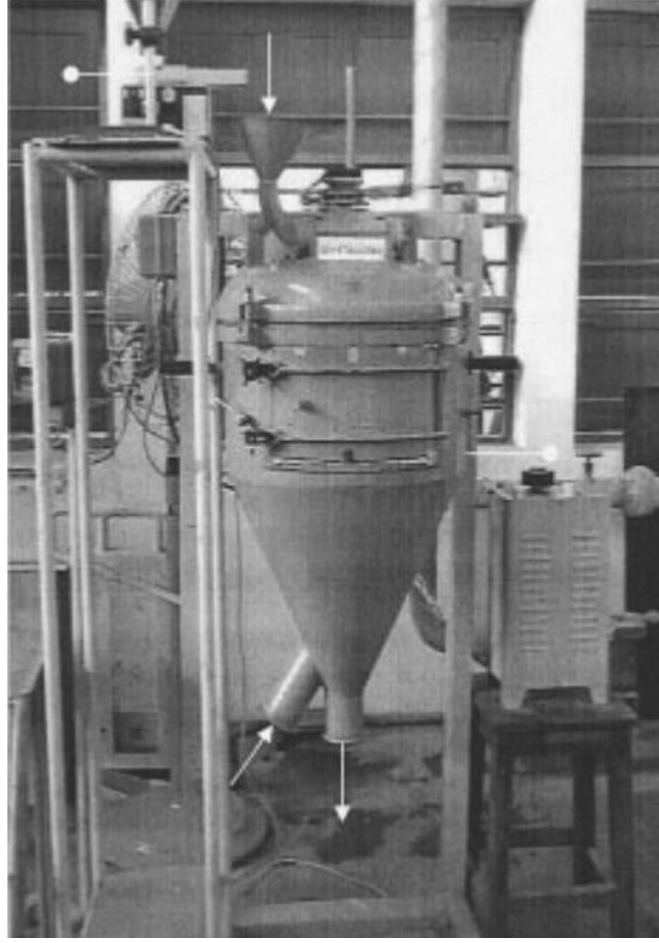




Şekil 6.1 Ayrım bölgesi etrafındaki akış hızları [40]

Geçmişte yapılan araştırmaların bir çoğu statik separatörler üzerinde olmasına karşın, Huang vd. [41] gibi bazı araştırmacılar turbo havalı sınıflandırıcıların iyileştirilmesinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemini kullanmışlardır. Düz bir kılavuz bıçağına sahip olan turbo havalı sınıflandırıcıdan, yeni bir tasarım ile birlikte dar bir tane boyu dağılımına sahip çok ince malzeme elde etmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca, bu sayede ayırım keskinliğinin de iyileşmesi sağlanmıştır. Havalı sınıflandırıcıların bıçaklarında yapılan değişiklik ile birlikte elde edilen sonuçların tahmininde Fluent adı verilen bir bilgisayar yazılımı kullanılmıştır.

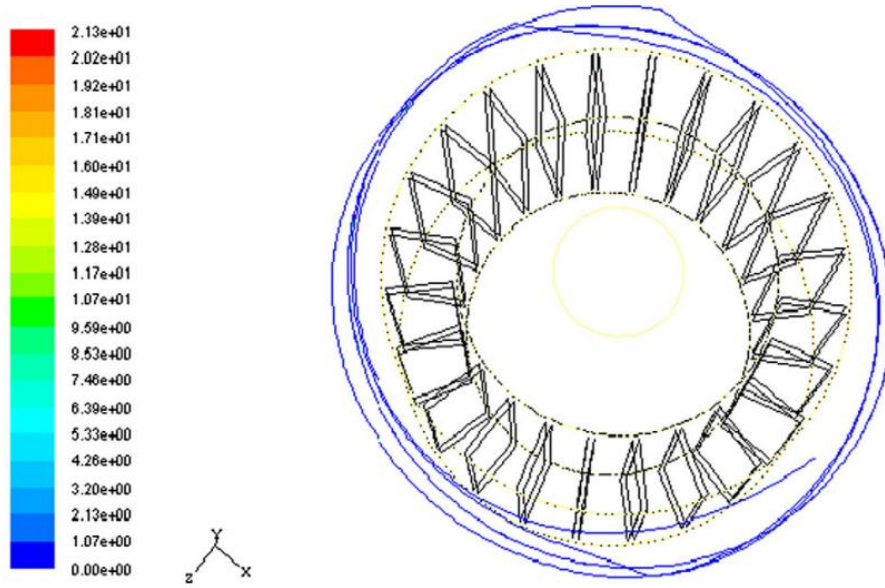
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile modelleme yönteminin akışkan içeren ekipmanlarda kullanılmasıyla birlikte Karunakumari vd. 2005 yılında yaptıkları bir çalışmada rotorlu bir havalı sınıflandırıcıyı modellemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan ekipmanın üst kısmında fan kanatlarının bulunduğu bir rotoru, ayarlanabilir açığa sahip olan yardımcı kanatları ve titreşimli bir besleyicisi bulunmaktadır (Şekil 6.2). Yapılan çalışmaların ardından farklı tane boyuna sahip taneciklerin havalı sınıflandırıcının farklı işletim koşullarındaki davranışları ve sınıflandırılma şekilleri incelenmiştir [42].



Şekil 6.2 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle modellenen havalı sınıflandırıcı [42]

Eswaraiah vd. [33] 2012 yılında dinamik havalı sınıflandırıcılar üzerinde yaptıkları bir çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiğinden yararlanmışlardır. Bu çalışmada temel olarak dinamik havalı sınıflandırıcı performansı üzerinde etkili olan ve kaçak olarak ifade edilen olgunun anlaşılması hedeflenmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda kaçağın rastlantısal olmadığı, havalı sınıflandırıcının işletim ve dizayn parametrelerine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

2013 yılında Liping vd. hesaplamalı akışkanlar dinamiğini kullanan Fluent yazılımından faydalanarak dinamik havalı sınıflandırıcıların kesme boyunu tahmin edebilmişlerdir. Yazılımdan, bir taneciğin dinamik havalı sınıflandırıcı içerisindeki hareketi görsel olarak elde edilebilmektedir (Şekil 6.3) [43].



Şekil 6.3 Bir kuvars tanesinin dinamik havalı sınıflandırıcı içerisindeki hareketi [43]

## 6.2 Matematiksel Modelleme

Matematiksel modelleme bir sınıflandırıcının verimlilik eğrisinin matematiksel bir eşitlik ile ifade edilmesidir. Verimlilik eğrisini tanımlamak üzere bugüne kadar bir çok eşitlik geliştirilmiştir. Bu eşitliklerden bazıları aşağıda verilmektedir [12].

- Finch eşitliği
- Plitt eşitliği
- Whiten eşitliği
- Zhang eşitliği
- Lynch ve Rao eşitliği
- Lippek ve Espig eşitliği
- Molerus eşitliği [12]

Altun [12] yaptığı çalışmada verimlilik eğrisini ifade eden eşitlikleri kullanarak modelleme çalışmaları yapmış, bu eşitliklerin endüstriyel verilerle olan uyumluluğunu incelemiş ve bu eşitlikler arasında çeşitli kıyaslamalar yapmıştır. Bu çalışmada, Finch, Lippek ve Espig, Molerus, Plitt, Lynch ve Rao eşitliklerinin verimlilik eğrisindeki en düşük y eksenini ifade eden kaçak değerine kadarlık kısmını tanımlada başarılı olduğunu, ancak balık oltası etkisini tanımlamada yetersiz kaldığı gözlenmiştir. Bunun nedeni, geçmişte yapılan tane

boyu dağılımı ölçüm yöntemlerinin 38 µm ile sınırlı olması gösterilmektedir. Günümüzdeki ölçüm teknolojileri daha ince tane boylarına kadar tane boyu dağılımı ölçümü yapmaya izin vermekte ve olta etkisinin tanımlanmasını imkanı hale getirmektedir. Zhang eşitliğinin bir çok denemede başarısız sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Whiten eşitliğinin ise bütün denemelerde başarılı sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir. Tüm bu değerlendirmeler göz önünde bulundurularak bu yüksek lisans tezi çalışmasında Whiten Eşitliği (Eşitlik 6.1) kullanılmasına karar verilmiştir.

$$E_{oa} = C \left[ \frac{(1+\beta\beta^*X)(\exp(\alpha)-1)}{\exp(\alpha\beta^*X)+\exp(\alpha)-2} \right] \quad \text{Eşitlik 6.1}$$

Yukarıdaki eşitlikte;

$\beta$  : Olta etkisini belirten değişken

$\alpha$  : Ayrım keskinliğini belirten değişken

$\beta^*$  :  $d_{50c}$ 'nin tanımından gelen bir değişken;  $E = (1/2)C$  iken  $d=d_{50c}$

$X$  :  $d / d_{50c}$

$C$  : Kaçak haricinde kalan ve gerçek sınıflandırmaya maruz kalan fraksiyon (1-kaçak)

$d_{50c}$  : Düzeltilmiş kesme tane boyu

$E_{oa}$  : Üst akıma göre hesaplanmış gerçek verimlilik eğrisini ifade etmektedir [44].

## 7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR, MADDE DENKLİĞİ VE MODELLEME ÇALIŞMALARI

### 7.1 Malzeme Özellikleri

Tez çalışması kapsamında farklı bölgelerden elde edilmiş olan klinker, bakır, kömür ve manyetit örnekleri ile Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan havalı sınıflandırıcı ile deneyler yürütülmüştür. Deney çalışmalarında kullanılmış olan malzemelerin tanımlanması için tane boyu dağılımları, yoğunluk ölçümleri ve akışkanlık tayinleri yapılmıştır.

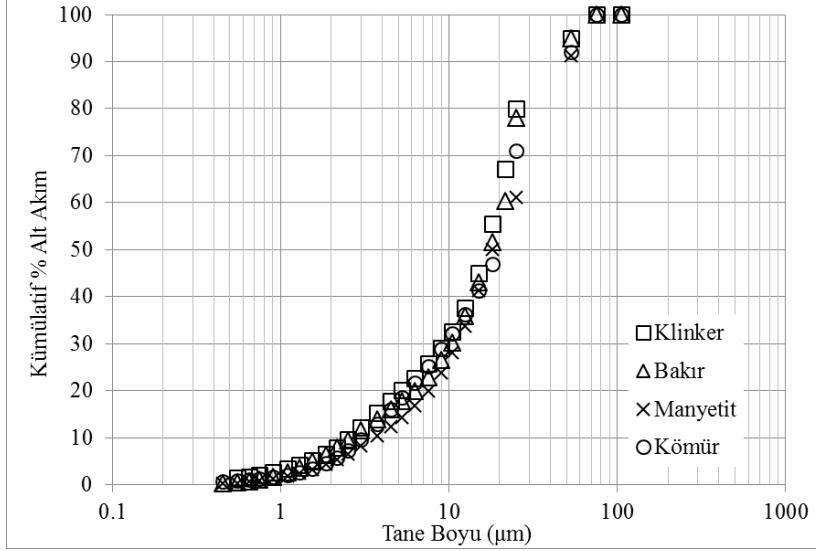
#### 7.1.1 Tane Boyu Dağılımlarının Belirlenmesi

Laboratuvar ölçekli havalı sınıflandırıcı ile yapılmış olan denemelerde kullanılan malzemelerin besleme tane boyu dağılımları kuru olarak lazer kırınımı yöntemiyle tane boyu ölçüm cihazı (Şekil 7.1) kullanılarak belirlenmiştir. Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yer alan Sympatec HDD200 © lazer tane boyu ölçüm cihazı yardımı ile belirlenmiş olan tane boyu dağılımları ölçümleri 0,45  $\mu\text{m}$ 'ye kadar yapılmıştır.



Şekil 7.1 Lazer kırınımı ile tane boyu dağılımı belirleme cihazı

Deney çalışmalarında kullanılan dört farklı malzeme için benzer tane boyu dağılımları elde edilmiştir (Şekil 7.2). Bu sayede tez çalışması kapsamında malzemelerin tane boylarının sonuçlar üzerine etkisi elimine edilerek, malzemelerin sadece yoğunluk ve akışkanlık farklılıklarının incelenebilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 7.2 Tane boyu dağılımları

### 7.1.2 Yoğunluk Ölçümleri

Malzeme tanımlama çalışmaları kapsamında deneysel çalışmalarda kullanılan örneklerin yoğunlukları da ölçülmüştür. Bu bağlamda, tez çalışması sırasında kullanılan kömür, manyetit, klinker ve bakır numunelerinin özgül ağırlıkları piknometre yöntemi [45] kullanılarak belirlenmiş ve suyun yoğunluğu olan  $1 \text{ g/cm}^3$  ile çarpılarak yoğunlukları hesaplanmıştır.

Homojen bir kütleyle sahip olmayan minerallerin yoğunluklarının belirlenmesinde ağırlık ve hacim ölçümü yöntemleri kullanılamamaktadır. Bir yığın halinde veya çok ince toz halinde bulunan bir mineralin yoğunluğunun tam olarak belirlenebilmesi için piknometre adı verilen bir araçtan faydalanılmaktadır.

Piknometre yöntemi ile özgül ağırlık ölçümü yapabilmek için bir piknometreye, hassas bir teraziye ve laboratuvar etüvüne ihtiyaç vardır. Öncelikle özgül ağırlığı ölçülmek istenen malzeme kırıcıda kırılır ve  $2,36 \text{ mm}$ 'lik elekten geçirilir. Elek altına geçen malzemelerden temsili bir numune alınarak  $150 \text{ µm}$ 'lik elekten geçirilmesi sağlanır.  $150 \text{ µm}$  altına geçen malzeme temsili olarak bölünerek her bir piknometre testi için yaklaşık  $10\text{-}15 \text{ g}$ 'lik numuneler hazırlanır. Hazırlanan numuneler  $105 \text{ °C}$  sıcaklığa sahip bir etüvde kurutulur. Kuru ve boş olan bir piknometre hassas terazide tartılarak ağırlığı kaydedilir (P1). Etüvde kurutulmuş olan numune piknometrenin içerisine konularak ağırlık tekrar tartılır ve bu ağırlık da P2 (malzeme + piknometre) olarak kaydedilir. Daha sonra piknometreye saf su doldurulur, kapağı hava almayacak şekilde kapatılır ve üçüncü kez tartılarak P3 (malzeme +

piknometre + su) olarak kaydedilir. En son olarak piknometre tamamen boşaltılarak saf su ile tekrar doldurulur ve son kez tartım yapılarak kaydedilir (P4, piknometre + su). Tüm tartım kayıtları alındıktan sonra Eşitlik 7.1 kullanılarak malzemenin özgül ağırlığı bulunmuş olur [45]. Sonrasında, bulunan özgül ağırlık değerleri suyun yoğunluğu olan 1 g/cm<sup>3</sup> ile çarpılarak malzemenin yoğunluğu hesaplanmaktadır.

$$G = \frac{P2-P1}{(P2+P4)-(P1+P3)} \quad \text{Eşitlik 7.1}$$

Bu eşitlikteki;

G: Özgül ağırlığı,

P1: Boş ve kuru piknometrenin ağırlığını,

P2: Malzeme ve piknometrenin toplam ağırlığını,

P3: Malzeme, piknometre ve saf suyun toplam ağırlığını,

P4: Piknometre ve saf suyun ağırlığını ifade etmektedir [45].

Piknometre yöntemi ile 4 tekrarlı olarak yoğunlukları ölçülmüş olan kömür, manyetit, klinker ve bakır cevheri örneklerinin yoğunluk sonuçları Çizelge 7.1’de sunulmaktadır. Buna göre, her bir malzeme için tekrarlı ölçüm sonuçlarının standart sapmaları hesaplanmıştır. Standart sapma değerleri kömür için 0,022, klinker için 0,025, bakır için 0,029 ve manyetit için 0,021’dir. Kabul edilebilir sınırlar içerisinde olan standart sapma değerleri göz önünde bulundurulduğunda, bundan sonraki çalışmalarda her bir malzemenin yoğunluğu için ölçüm sonuçlarının ortalamaları kabul edilmiştir.

Çizelge 7.1 Tekrarlı yoğunluk ölçüm sonuçları

Ölçüm	Kömür	Klinker	Bakır	Manyetit
1	1,41	3,04	4,09	5,07
2	1,40	3,02	4,06	5,12
3	1,42	3,05	4,10	5,09
4	1,37	3,08	4,13	5,10
<b>Ortalama</b>	<b>1,40</b>	<b>3,05</b>	<b>4,10</b>	<b>5,10</b>
<b>Standart Sapma</b>	0,021	0,021	0,028	0,014

### 7.1.3 Akışkanlık Tayinleri

Çalışmada kullanılan kömür, klinker, manyetit ve bakır cevheri numunelerinin tanımlanması çalışmaları kapsamında tane boyu dağılımları ve yoğunluk ölçümlerine ek olarak akışkanlık tayini çalışmaları da yapılmıştır. Bu bağlamda Joliceur vd.'nin 2007'de [46] yaptığı bir çalışmada kullanmış olduğu akışkanlık tayini yönteminden yararlanılmıştır. Bu yöntemde, akışkanlık indeksi kavramı Eşitlik 7.2'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\frac{P}{P_{max}} = \frac{bt}{1+bt} \quad \text{Eşitlik 7.2}$$

P: t süresinde elek altına geçen malzeme miktarı

Pmax: Elek altına geçen en fazla miktar

b: Akışkanlık indeksi

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan malzemelerin akışkanlıklarının belirlenebilmesi için, besleme tane boyları aynı olan kömür, klinker, manyetit ve bakır cevheri örnekleri 106 µm'lik bir elekten geçirilerek en iri tane boylarının eşit oldukları teyitlenmiştir. Daha sonra her bir örnek sırayla tekrar 106 µm'lik eleğin üzerine dökülerek sabit bir titreşime maruz bırakılmıştır. Zamana bağlı olarak eleğin altına geçen malzeme miktarları tartılarak birikimli olarak kaydedilmiştir (Çizelge 7.2).

Çizelge 7.2 Manyetit örneği için akışkanlık testi sonuçları

Zaman (sn)	Manyetit	
	Ölçüm 1 (g)	Ölçüm 2 (g)
10	0,63	0,96
50	6,62	6,91
90	21,04	19,15
120	30,8	30,16
150	36,38	38,57
180	40,55	41,72
240	44,12	44,52

Kaydedilen sonuçların tekrarlanabilir veriler olup olmadıklarının istatistiki çalışmalar ile kontrol edilmesi hedeflenmiştir. İstatistiki çalışmaların yürütülebilmesi amacıyla birikimli olarak kaydedilen veri setleri birim zamanda elek altına geçen ağırlıkların ifade edildiği Çizelge 7.3 biçimine dönüştürülmüştür.



Çizelge 7.3 Manyetit örneği için birim zamanda elek altına geçen ağırlık ölçümleri

Manyetit	
Ölçüm 1 (g/sn)	Ölçüm 2 (g/sn)
0,063	0,096
0,132	0,138
0,234	0,213
0,257	0,251
0,243	0,257
0,225	0,232
0,184	0,186

Elde edilen verilerin tekrarlanabilirliklerinin değerlendirilebilmeleri için öncelikle verilerin istatistiki olarak normal bir dağılım gösterip göstermediği belirlenmelidir. Bu değerlendirme sonucunda rastgele hata sonucu oluşabilecek değerler istatistiksel hesaplamalarda kullanılmamalıdır. Verilerin normal dağılıma sahip olup olmadıklarını anlamak amacıyla, her bir veri seti için Dixon testi [47] ile kontrol yapılmıştır. Dixon testi için veriler küçükten büyüğe doğru sıralandıktan sonra, 3 ila 7 ölçüm sayısına sahip durumlar için geçerli olan Eşitlik 7.3 ve Eşitlik 7.4 ile  $D_{\text{düşük}}$  ve  $D_{\text{yüksek}}$  değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 7.4).

$$D_{3-7} = \frac{X_2 - X_1}{X_n - X_1} \quad (\text{Düşük fark oranı}) \quad \text{Eşitlik 7.3}$$

$$D_{3-7} = \frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_1} \quad (\text{Yüksek fark oranı}) \quad \text{Eşitlik 7.4}$$

Çizelge 7.4 Manyetit örneği için Dixon testi için küçükten büyüğe sıralanmış veriler

Data Sayısı (X)	Manyetit	
	Ölçüm 1 (g)	Ölçüm 2 (g)
1	0,063	0,096
2	0,132	0,138
3	0,184	0,186
4	0,225	0,213
5	0,234	0,232
6	0,243	0,251
7	0,257	0,257
$D_{\text{düşük}}$	0,358	0,262
$D_{\text{yüksek}}$	0,073	0,036
$D_{\text{kritik}} (n=7) \%5$	0,507	0,507

Burada  $D_{kritik}$  değeri Dixon kriteri tablosundan [47] 7 ölçüm sayısına ve %95 güven aralığına göre belirlenmiştir. En düşük ve en yüksek veriler için yapılan değerlendirmede,  $D_{düşük}$  ve  $D_{yüksek}$  değerlerinin her ikisi de  $D_{kritik}$  değerinden düşük olduğundan bu iki veri de normal dağılım içerisinde kabul edilirler ve veri setlerinden çıkarılmazlar. Sonuç olarak her iki ölçümün de istatistiki olarak normal dağılım gösterdikleri ifade edilebilir.

Veri setlerinin normal dağılıma sahip oldukları belirlendikten sonra, t-Testi [48] ile iki ayrı ölçümde elde edilen verilerin ortalamaları arasında istatistiksel olarak bir fark olup olmadığı kontrol edilmiştir. Çizelge 7.5’de manyetit örneği için Microsoft Office Excel © programı kullanılarak elde edilmiş t-Testi değerleri verilmektedir. Burada kalın karakter ile belirtilmiş olan t değeri,  $t_{kritik}$  değerinden küçük olduğundan, bu iki veri setinin ortalamaları arasında istatistiksel olarak bir fark olmadığı sonucu elde edilmektedir.

Çizelge 7.5 Manyetit örneği için t-Testi sonuçları

	Ölçüm 1	Ölçüm 2
Ortalama	0,1911	0,1961
Varyans	0,0050	0,0036
Gözlem	7	7
Pearson Korelasyonu	0,9796	
Öngörülen Ortalama Farkı	0	
df	6	
t Stat	<b>-0,79366</b>	
P(T<=t) tek-uçlu	0,22881	
t Kritik tek-uçlu	1,94318	
P(T<=t) iki-uçlu	0,45762	
t Kritik iki-uçlu	<b>2,44691</b>	

İki veri setinin normal dağılıma sahip oldukları ve ortalamaları arasında bir fark olmadığı anlaşıldıktan sonra, F-Testi [48] ile bu iki ayrı ölçümün tekrarlanabilir sonuçlara sahip olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Bu amaçla, Microsoft Office Excel © programı yardımıyla Çizelge 7.6 elde edilmiştir. Bu çizelgede, kalın karakter ile belirtilmiş olan F değerinin, F kritik değerinden küçük olduğu görülmüştür. Bu durumda bu iki ölçümün istatistiksel olarak tekrarlanabilir ölçümler oldukları tespit edilmiştir.

Çizelge 7.6 Manyetit örneği için F-Testi sonuçları

	Ölçüm 1	Ölçüm 2
Ortalama	0,1910698	0,1960744
Varyans	0,0049737	0,0036367
Gözlem	7	7
df	6	6
F	<b>1,3676147</b>	
P(F<=f) tek-uçlu	0,3567589	
F Kritik iki-uçlu	<b>4,2838657</b>	

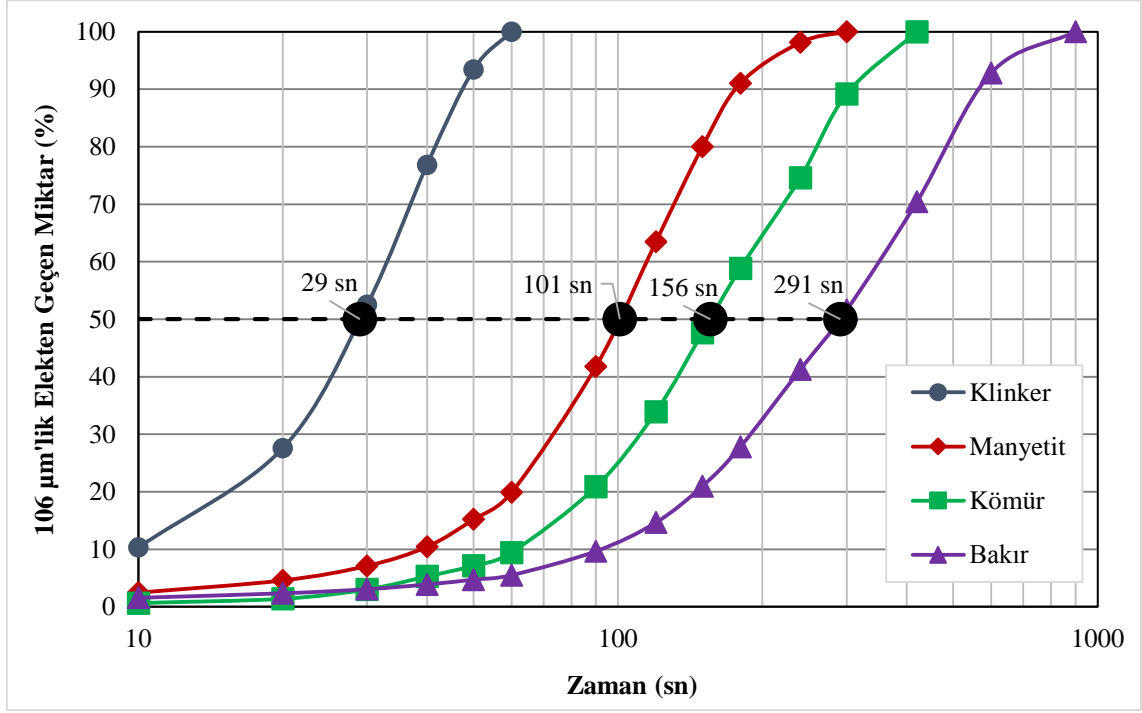
Manyetit örneği için iki tekrarlı olarak ölçülen akışkanlık tayini sonuçlarının tekrarlanabilir oldukları istatistiksel olarak yukarıda anlatılan şekilde belirlenmiştir. Aynı uygulama klinker, bakır ve kömür örnekleri için de tekrarlanmış ve elde edilen akışkanlık tayini sonuçlarının tekrarlanabilir oldukları görülmüştür.

Her bir örnek için iki tekrarlı olarak yapılan akışkanlık tayini testlerinin istatistiki olarak tekrarlanabilir sonuçlar oldukları anlaşıldıktan sonra, tüm örnekler için Eşitlik 7.2 kullanılarak akışkanlık indeksi (b) değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 7.7’de belirtilen akışkanlık indeksi değerlerine göre; en düşük akışkanlık indeksine sahip olan klinker örneği en fazla akışkanlığa sahiptir. Daha sonra sırasıyla manyetit, kömür ve bakır örnekleri gelmektedir.

Çizelge 7.7 Malzemelerin akışkanlık indeksleri

Malzeme	Akışkanlık İndeksi (b)
Klinker	0,008
Manyetit	0,267
Kömür	0,789
Bakır	1,500

Akışkanlık indeksinin matematiksel olarak ifadesine ek olarak, zamana bağlı olarak 106  $\mu\text{m}$ 'lik eleğin altına geçen miktarları gösteren bir grafik (Şekil 7.3) elde edilmiştir. Buna göre; klinker örneğinin yarısı 29 saniyede, manyetit örneğinin yarısı 101 saniyede, kömür örneğinin yarısı 156 saniyede ve bakır örneğinin yarısı 291 saniyede elek altına geçmiştir. Bu sonuçlar, Çizelge 7.7'de bahsedilen akışkanlık indeksi değerleri ile elde edilen akışkanlık sıralamasını grafiksel olarak ifade etmektedir.



Şekil 7.3 Zamana bağlı olarak akışkanlık tayini sonuçları

## 7.2 Deney Ekipmanının Tanıtılması

Bu tez çalışması sırasında yapılan deneylerde Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Alpine 100 MZR © havalı sınıflandırıcısı kullanılmıştır (Şekil 7.4). Bu havalı sınıflandırıcının teknik özellikleri Çizelge 7.8’de verilmektedir.



Şekil 7.4 Alpine 100 MZR © Havalı Sınıflandırıcısı

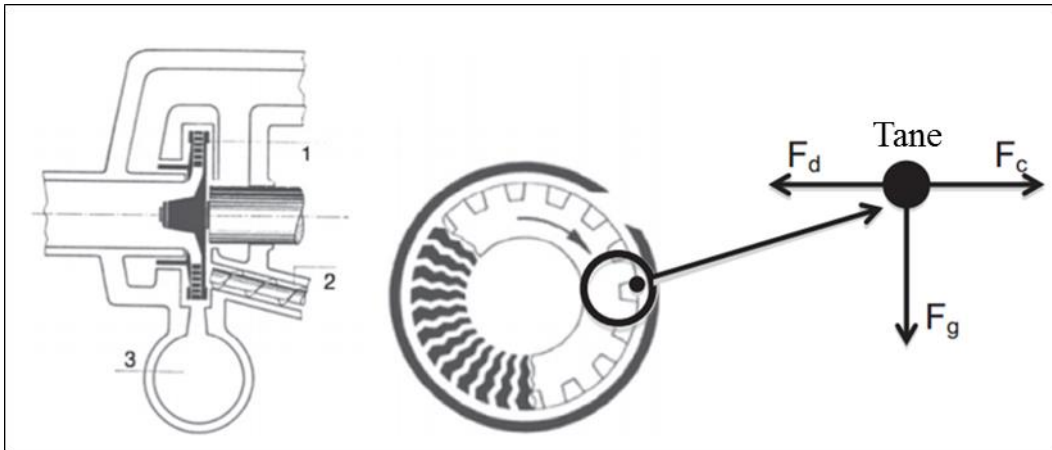
Çizelge 7.8 Alpine 100 MZR havalı sınıflandırıcısının teknik özellikleri

Rotor hızı (rpm)	1000 – 15000
Hava akış hızı (m <sup>3</sup> /saat)	5 – 50

Malzeme havalı sınıflandırıcıya besleyiciden (Şekil 7.5) beslenir ve sınıflandırma bölgesine iletilir. Burada sürüklenme, merkezkaç ve yer çekimi kuvvetlerine maruz kalan taneler ince ve iri ürün toplama haznelere gönderilirler. Şekil 7.6’de ayrımın gerçekleştiği bölge, rotor yapısı ve sınıflandırma işlemi için etkili olan kuvvetler belirtilmektedir. Şekilde 1 numara ile rotor, 2 numara ile sınıflandırıcının beslemesi ve 3 numara ile de iri ürün toplama bölgesi belirtilmektedir.



Şekil 7.5 Besleyici



Şekil 7.6 Ayrımın gerçekleştiği bölge, rotor ve tane üzerine etki eden kuvvetler

Deney çalışmalarında kullanılan havalı sınıflandırıcının besleme hızı malzemenin yoğunluğuna bağlı olarak saatte 2 ila 6 kg arasında değişmektedir. 2 - 80  $\mu\text{m}$  tane boyu aralığındaki malzemeler sınıflandırıcıya beslenebilmektedir. Şekil 7.5’den de görülebileceği gibi besleme helezonik bir besleyici yardımıyla yapılmaktadır. Hava ise sınıflandırıcı içerisinde rotora ulaşmakta ve rotorun dışından içine doğru akmaktadır. Bu işlem sırasında ince taneleri de yanında taşımaktadır. İri taneler ise merkezkaç kuvvetinin etkisiyle rotorun içerisine girmeden dış çepere savrulurarak iri ürün toplama haznesine birikmektedir (Şekil

7.7). Bu havalı sınıflandırıcı zikzak şeklinde radyal kanalları olan bir rotora sahiptir (Şekil 7.8).



Şekil 7.7 İri ürün toplama haznesi



Şekil 7.8 Rotor

Laboratuvar ölçekli olan bu sınıflandırıcı bir dinamik havalı sınıflandırıcı olup işletimi sırasında sınıflandırıcıya beslenen taneler merkezkaç ( $F_c$ ), sürüklenme ( $F_d$ ) ve yer çekimi ( $F_g$ ) kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Merkezkaç kuvveti rotor tarafından yaratılan bir kuvvettir. Taneleri dış çepere doğru iter. Sınıflandırıcı içerisine verilen hava ise tanecikler üzerinde merkezkaç kuvvetine ters olan bir sürüklenme kuvveti yaratır. Bu kuvvetlerin matematiksel olarak ifadeleri Eşitlik 7.5 - 7.7'deki gibidir [5, 7].

$$F_c = \frac{4}{3} * \pi * r_p^3 * \rho_p * \frac{v^2}{r} \quad \text{Eşitlik 7.5}$$

$$F_d = c_D * \rho * \pi * r_p^2 * \frac{V_a^2}{a} \quad \text{Eşitlik 7.6}$$

$$F_g = m * (\rho - \rho_{air}) * g \quad \text{Eşitlik 7.7}$$

Burada;

$r_p$ : tanenin yarıçapını,

$\rho_p$ : tanenin yoğunluğunu,

$V$ : rotorun çevresel hızını,

$c_D$ : sürüklenme katsayısını,

$\rho$ : gaz yoğunluğunu,

$V_a$ : hava hızını,

$m$ : tanenin ağırlığını,

$g$ : yerçekimi katsayısını ifade etmektedir.

Yukarıdaki eşitliklerden de anlaşılacağı üzere, taneler üzerine etki eden kuvvetlerin büyüklükleri tanelerin çapları ve yoğunlukları ile ilişkilidir. Daha iri ve yoğunluğu daha büyük olan taneler merkezkaç ve yerçekimi kuvvetlerine daha fazla maruz kalmaktadırlar. Sonuç olarak, havalı sınıflandırıcı içerisine beslenen malzemenin yoğunluğu arttıkça sınıflandırıcının kesme boyu daha düşük olmaktadır.



### 7.3 Deney Koşulları

Çalışmada temel olarak malzemelerin yoğunluk ve akışkanlık özelliklerinin havalı sınıflandırıcı performansı üzerine etkilerinin incelenmesi ve daha önce geliştirilmiş olan çoklu bileşenli model yapısının [4] geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu kapsamda, laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalarda havalı sınıflandırıcı ile deneyler yapılmadan önce, deneylerde kullanılan malzemelerin tanımlanması çalışmaları yürütülmüştür. Tane boyu dağılımları, akışkanlıkları ve yoğunlukları belirlenmiş olan manyetit, klinker, kömür ve bakır cevheri örnekleri ile Çizelge 7.9'daki deney planına göre farklı koşullar altında denemeler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 7.9 Deney planı

Hava Akış Hızı (m <sup>3</sup> /saat)	Rotor Hızı (rpm)		
	3000	5000	7000
10	T1	T2	T3
20	T4	T5	T6
30	T7	T8	T9
40	T10	T11	T12

Yukarıdaki çizelgede belirtilen hava akış hızları ve rotor hızları, yapılan ön denemeler sonucunda sınıflandırıcı davranışını temsil edeceği düşünülerek belirlenmiş ve bütün deney koşullarında besleme hızı sabit olarak ayarlanmıştır. Daha önceden tanımlama çalışmaları yapılmış olan manyetit, klinker, kömür ve bakır cevheri örnekleri ile önce sabit hava akış hızında farklı rotor hızlarında deneyler yapılmış, daha sonra ise hava akış hızı değiştirilerek farklı rotor hızlarında deneyler devam ettirilmiştir. Her bir örnek için 12'şer deney yapılmıştır. Deneylerin her bir koşul için kodlaması yapılırken manyetit örneği için M, bakır için B, kömür için K ve klinker için T harfi kullanılmıştır. Örneğin; 10 m<sup>3</sup>/saat hava akış hızında ve 5000 rpm rotor hızında manyetit ile yapılmış olan deney için kullanılan deney kodu M2'dir. Aynı deney koşulunda kömür örneği kullanılarak yapılmış olan deneyin kodu ise K2 olarak adlandırılmıştır. Eklerde bahsi geçen kodlamaların bu kodlama sistemine göre takip edilmesi gerekmektedir.

Bahsi geçen operasyonel koşullara ve malzeme özelliklerine ek olarak, öğütme yardımcısı kimyasal kullanımının da sınıflandırıcı performansında etkili bir değişken olduğu

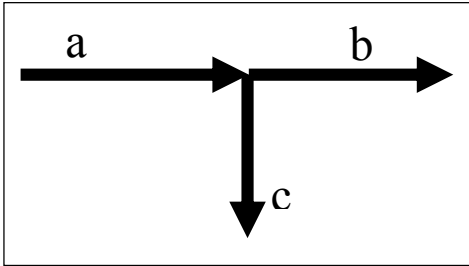
bilinmektedir [49]. Ancak bu çalışma kapsamında kimyasalın etkileri göz önünde bulundurulmamış olup ilerleyen dönemlerde literatürdeki bu eksikliğin kapatılması üzerine çalışılmasının önemli olacağı düşünülmektedir.

#### 7.4 Madde Denkliği Çalışmaları

Tez çalışması kapsamında kullanılacak olan malzemelerin her birinin tanımlanması yapıldıktan sonra, önceki bölümde bahsedilen deney planına göre deneysel çalışmalar yapılmıştır. Laboratuvar ölçekli havalı sınıflandırıcı ile yapılan bu deneylerden elde edilen verilerin güvenilirliğinin artırılması, daha sonra yürütülecek olan modelleme çalışmaları için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, besleme ve iri ürünün miktarları ve tane boyu dağılımları baz alınarak madde denkliği çalışmaları yapılmıştır.

Madde denkliği bir çeşit modelleme çalışmasıdır. Burada bahsi geçen modeller daha çok temel düzeyde modellerdir. Madde denkliği algoritmasının temeli, birden çok akışın birleşimindeki farklara dayanmaktadır. Bu farklar bir cevher hazırlama ekipmanı tarafından yaratılabilmektedir.

Şekil 7.9’de örnek bir akış şeması gösterilmektedir. Bu şemada, bir analizi bilinen a akışı, bir cevher hazırlama ekipmanına beslenmekte ve ürün olarak b ve c akışları elde edilmektedir.



Şekil 7.9 Örnek bir akış şeması

“a” akışının içerisindeki kuru katı miktarı 100 ton/saat ise;

$$100a = x * b + (100 - x) * c \quad \text{Eşitlik 7.8}$$

Eşitlik 7.8’de belirtilen x değeri “b” akışının içerisindeki kuru katı miktarını belirtmektedir.

$$x = 100 * \frac{(a-c)}{(b-c)} \quad \text{Eşitlik 7.9}$$

Eşitlik 7.8 ve Eşitlik 7.9 geleneksel olarak iki ürüne göre madde denkleğinin temelini oluşturmaktadır. Burada bahsedilen “a”, “b” ve “c” ilgili akışın tane boyu dağılımı, kimyasal ya da bilinen herhangi bir başka özelliğın analizini içerebilmektedir.

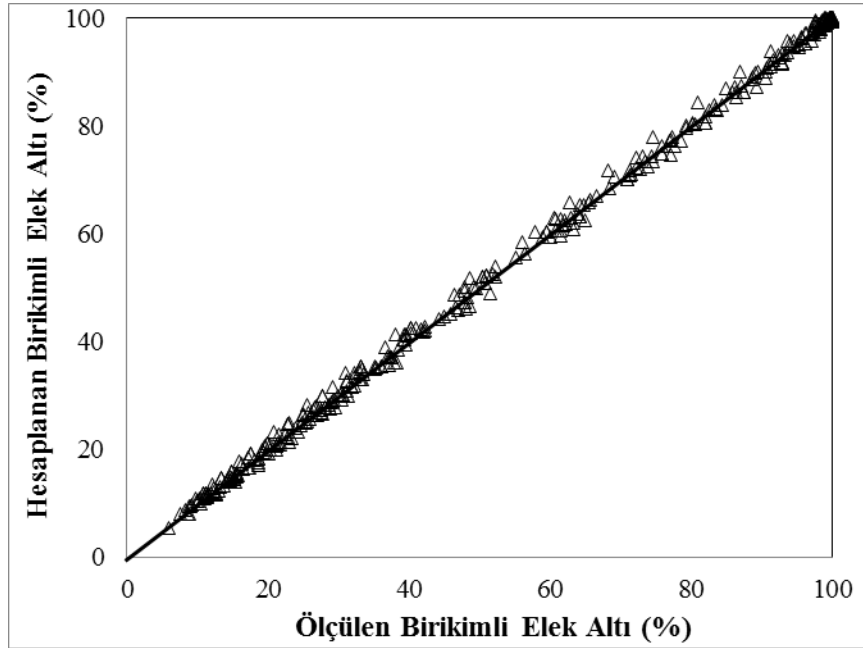
Aralarında bir fark olduğu sürece, “a”, “b” ve “c” değerlerinin hangi analizi ifade ettiği bir önem taşımamaktadır. Bir ayırma ekipmanı ile yapılan operasyonun analizleri eşit olduğu koşulda; (a=b=c) Eşitlik 7.8’e göre  $x=0/0$  olacağından, bu eşitlik tanımsız olacak ve madde denkleği gerçekleştirilemeyecektir.

Başka bir şekilde ifade etmek gerekirse, akış miktarları ancak bir operasyonun ürünleri arasında fark bulunuyorsa kestirilebilmektedir. Bahsedilen operasyonda bazı bilgiler verilmek durumundadır. Eğer herhangi bir başlangıç bilgisi verilmez ise, yukarıdaki ayırma ekipmanı örneğinde de olduğu gibi, bir kestirim yapmak mümkün olamamaktadır. Bir ayırma elemanının ayırma oranı bilindiği takdirde madde denkleği çalışması yapılabilmektedir.

Bir cevher hazırlama ekipmanı etrafında yapılacak olan madde denkleği çalışmasında, en büyük faydayı ürünler arasında en fazla farka sahip olan özellik belirlemektedir. Bu da, bir sınıflandırıcı etrafında yapılacak olan madde denkleği çalışmasında, tane boyu dağılımlarının kullanılmasının en etkili yöntem olacağını belirtmektedir. Yine aynı şekilde bir flotasyon devresi etrafında yapılacak olan madde denkleği çalışmasında ise kimyasal analizlerin kullanılması daha kullanışlı olacaktır. Bunun tam tersi durumlar, bazı istisnalar dışında, doğru sonuçları bulmayı zorlaştıracaktır. Bu istisnalara örnek olarak, bir hidrosiklon etrafında yapılacak madde denkleği çalışmasında altın veya kurşun elementi analizinin kullanılması verilebilir. Altın ve kurşun elementleri yüksek özgül ağırlığa sahiptirler. Hidrosiklonun da ayırım mekanizması içerisinde yoğunluk farkının büyük bir önemi olduğundan, bu operasyonun ürünleri arasında bu elementlerin analizleri arasında bir fark olacaktır ve bu durum da altın veya kurşun analizinin buradaki madde denkleği çalışmasında kullanılabileceğine işaret etmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında madde denkleği çalışmalarında, deneysel verilerin standart sapmaları temel alınarak düzeltilmesi prensibine dayanan Quasi-Newton algoritması kullanılmıştır. Buradan yola çıkarak, standart sapma değeri 0 olan bir değer için, deneysel veri ile hesaplanan değer arasında bir fark olmayacağı sonucuna varılmaktadır. Standart sapma değerlerindeki farklılık deneysel verilerde değişkenliğe sebep olacaktır. Bir başka değişle, bir veriye ne kadar yüksek bir standart sapma tanımlanırsa o verideki salınım o denli yüksek olacaktır [50].

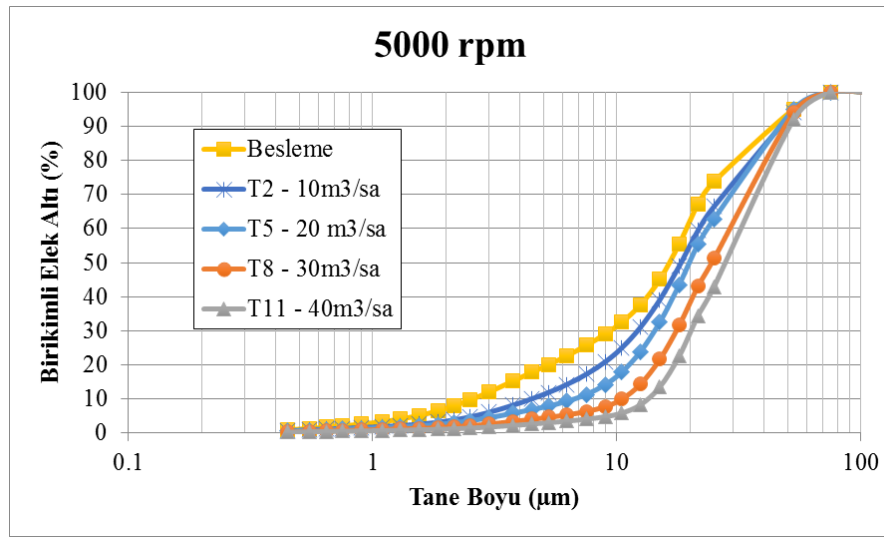
Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ışığında tane boyu dağılımları irdelenmiş ve bir takım ön bulgular saptanmıştır. Bundan sonraki çalışmaların daha sağlıklı yürütülebilmesi amacıyla deneysel hatalarının minimize edildiği veri setlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple, yukarıda bahsedilen prensipler göz önünde bulundurularak, JKSimMet © programı yardımı ile tüm deneyler için madde denkliği çalışmaları yapılmıştır. Bu tez çalışmasında yürütülen madde denkliği çalışmalarında, deney düzeneğinde yer alan ve ince ürünü havadan ayıran siklon ünitesinin %100 verim ile çalışmadığı düşünüldüğünden, iri akıştaki ağırlık ve tane boyu dağılımı verilerine güvenilmiştir. Bu nedenle, madde denkliği çalışmalarında iri ürün ağırlığı ve tane boyu dağılımı değerlerine minimum standart sapma tanımlanmıştır. Madde denkliği çalışmalarının kontrolünü sağlamak amacıyla iri ürünlerin tane boyu dağılımları Şekil 7.10'deki gibi kıyaslanmıştır. Burada x ekseninde deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen “ölçülen veriler” bulunurken, y ekseninde ise madde denkliği çalışmaları sonucunda elde edilen “hesaplanan veriler” bulunmaktadır. Bu iki eksenin birleşiminden çıkan 45°'lik doğru üzerinde dağılan noktalar, madde denkliği çalışmalarının başarılı olduğunu göstermektedir.



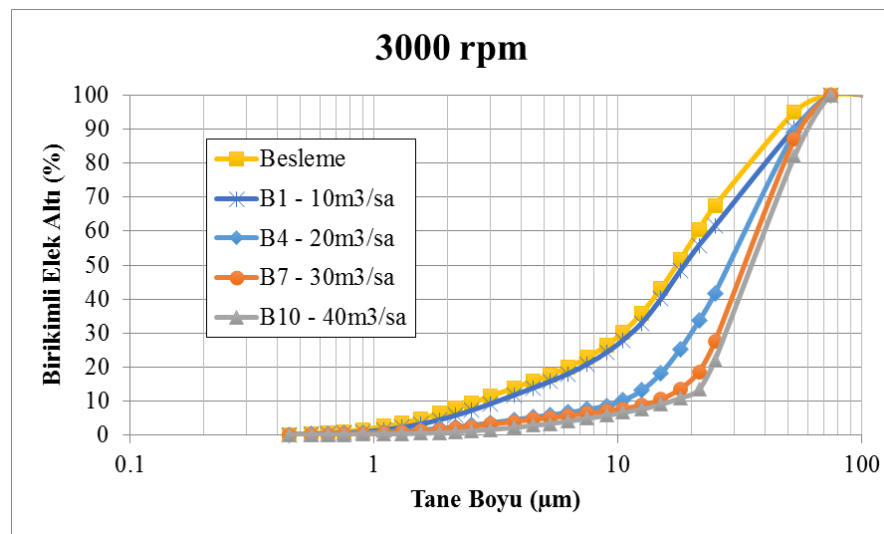
Şekil 7.10 İri ürünler için gerçekleştirilen ve hesaplanan madde denkliği sonuçları

Laboratuvar ölçekli havalı sınıflandırıcı ile yapılan deney çalışmalarında, tek bir işletim parametresi değiştirilerek diğer parametreler sabit tutulmuş ve her bir işletim parametresinin havalı sınıflandırıcı performansı üzerinde nasıl bir etki yaptığı gözlenmiştir.

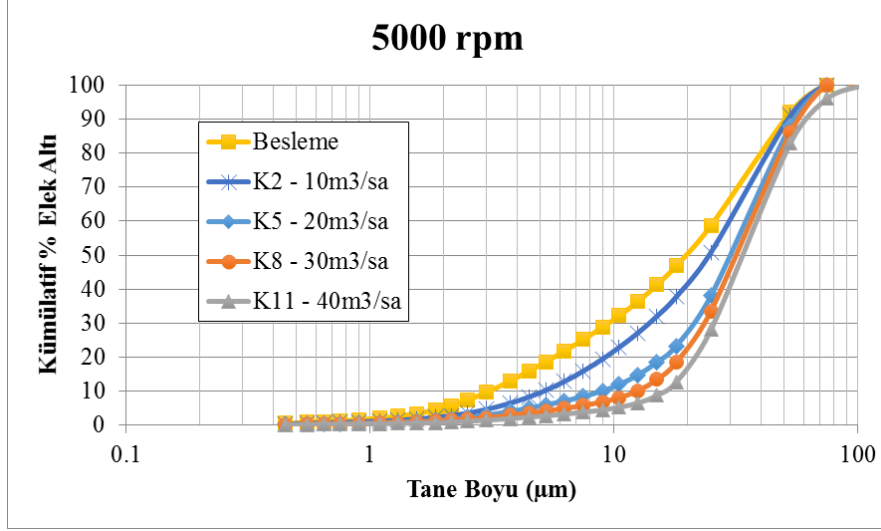
Şekil 7.11-14'te her bir malzeme için sabit rotor hızında hava akış hızları değiştirilerek yapılmış olan deneylerin besleme ve iri ürün tane boyu dağılımları verilmektedir. Her bir malzeme için rotor hızı sabit tutulduğunda, hava akış hızının artırılması ile iri ürün toplama haznesinden alınan malzemenin tane boyu dağılımının daha iriye gittiği görülmektedir. Hava akış hızının artması ile taneler üzerine etki eden ve merkezkaç kuvvetine ters yönde olan sürüklenme kuvveti ( $F_d$ ) artmaktadır. Bu da havalı sınıflandırıcının kesme boyunun daha irileştiğine işaret etmektedir. Benzer sonuçlar literatürde de yer almaktadır [12, 34, 51]. Aşağıda rastgele seçilmiş örnekleri verilen deneylerin her biri, bu savı dört malzeme için doğrulamaktadır.



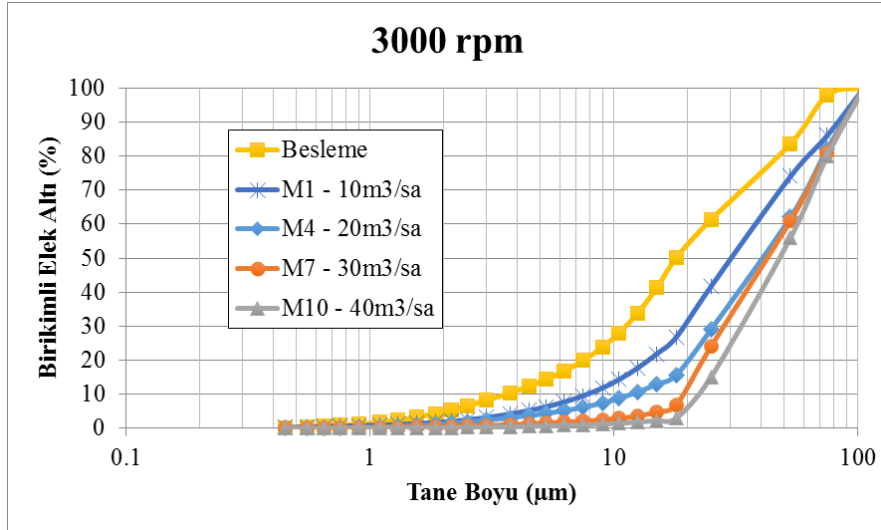
Şekil 7.11 Klinker örneği için tane boyu dağılımları (sabit rotor hızında)



Şekil 7.12 Bakır örneği için tane boyu dağılımları (sabit rotor hızında)



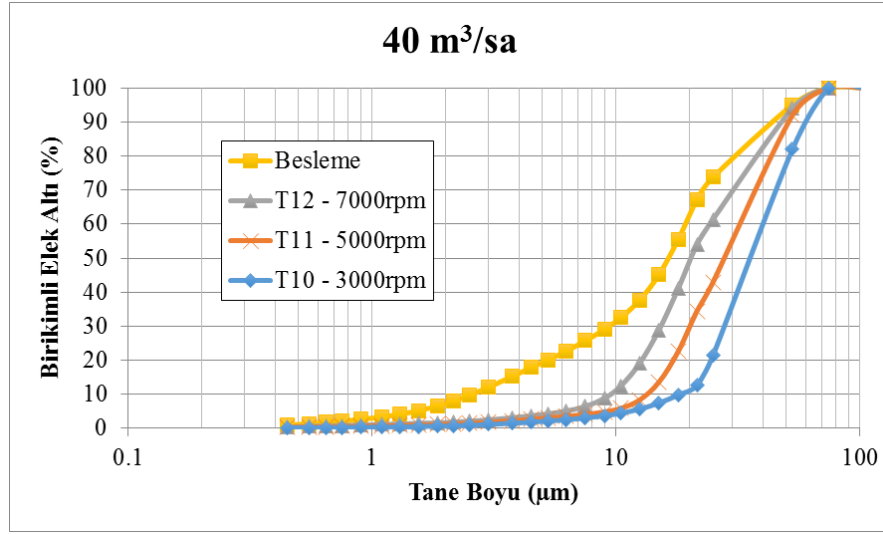
Şekil 7.13 Kömür örneği için tane boyu dağılımları (sabit rotor hızında)



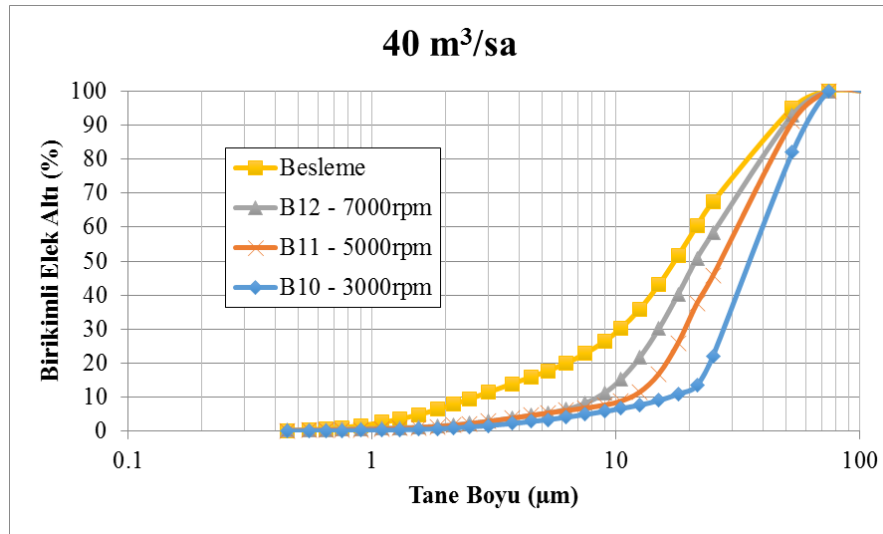
Şekil 7.14 Manyetit örneği için tane boyu dağılımları (sabit rotor hızında)

Rotor hızı sabit iken sınıflandırıcı içerisindeki taneciklerin üzerine etki eden sürüklenme kuvvetinin etkisi gözlenmesinin ardından, her bir malzeme için hava akış hızı sabit tutularak rotor hızının 3000, 5000 ve 7000 rpm olarak ayarlandığı 3'er deney daha yapılmıştır. Şekil 7.15-18'de verilen besleme ve iri ürün tane boyu dağılımlarından da görüleceği üzere; hava akış hızı sabit iken, rotor hızı arttırıldığında iri ürüne giden malzemenin tane boyu dağılımının incelendiği gözlenmektedir. Rotor hızının artmasıyla birlikte sınıflandırıcı içerisindeki taneciklerin üzerine etki eden merkezkaç kuvveti artmakta ve iri ürün toplama haznesine nispeten daha ince tanelerin de gelmesi sağlanmaktadır. Bu durumda, rotor hızının artması ile havalı sınıflandırıcının kesme boyunun daha incelendiği sonucuna varılmaktadır.

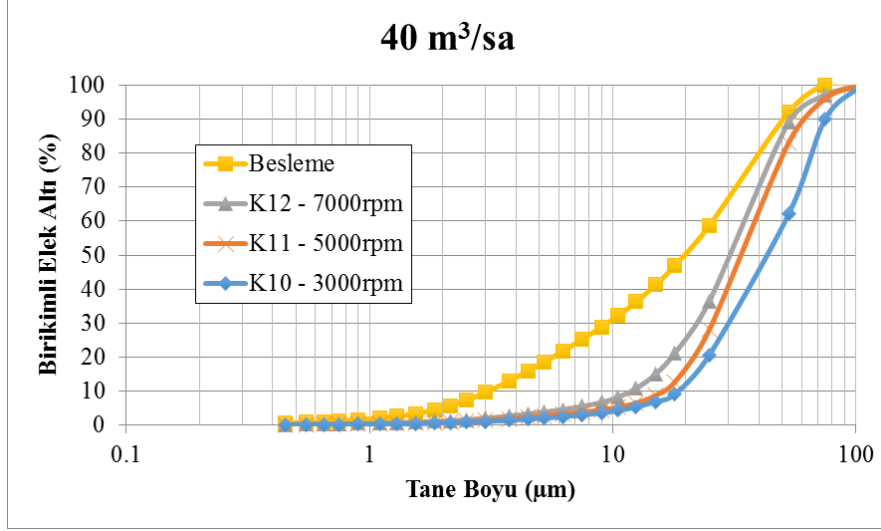
Her bir malzeme için tüm koşullarda elde edilen besleme ve alt akım ağırlık ve tane boyu dağılımı verileri Ek 1'de verilmektedir.



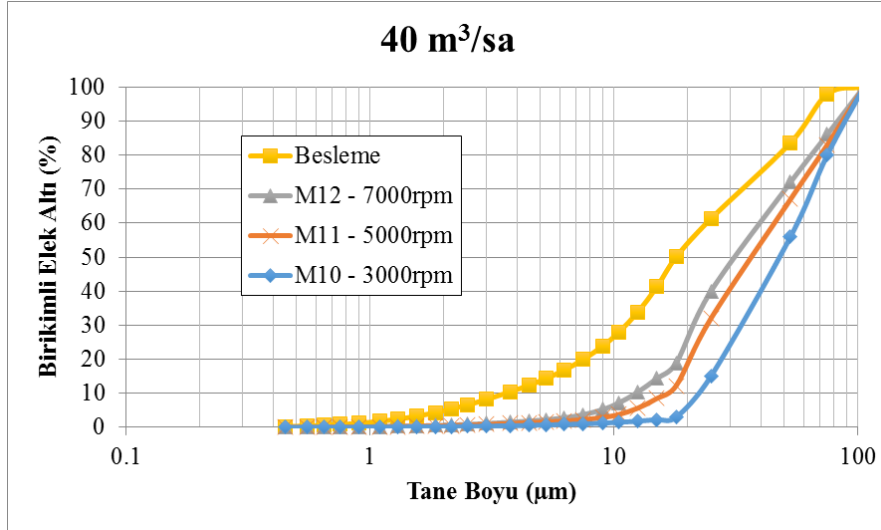
Şekil 7.15 Klinker örneği için tane boyu dağılımları (sabit hava akış hızında)



Şekil 7.16 Bakır örneği için tane boyu dağılımları (sabit hava akış hızında)



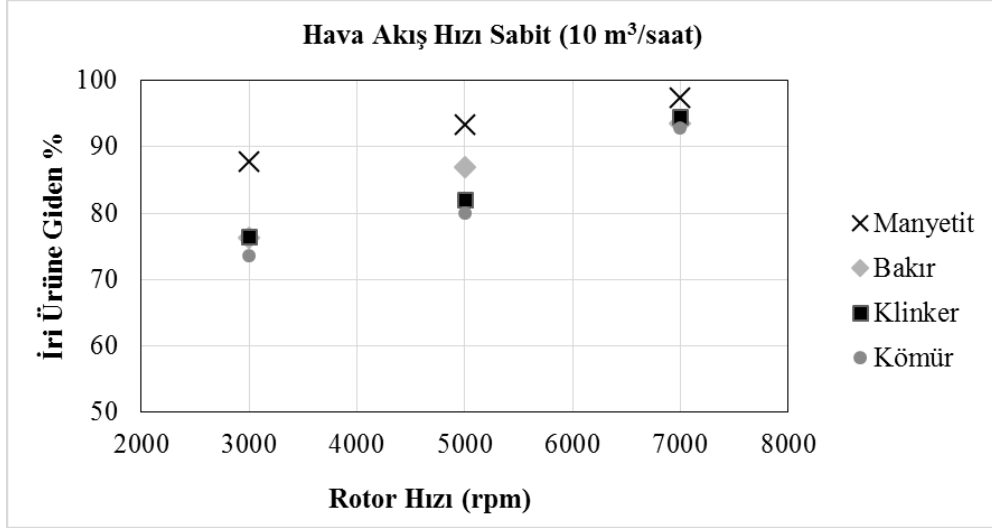
Şekil 7.17 Kömür örneği için tane boyu dağılımları (sabit hava akış hızında)



Şekil 7.18 Manyetit örneği için tane boyu dağılımları (sabit hava akış hızında)

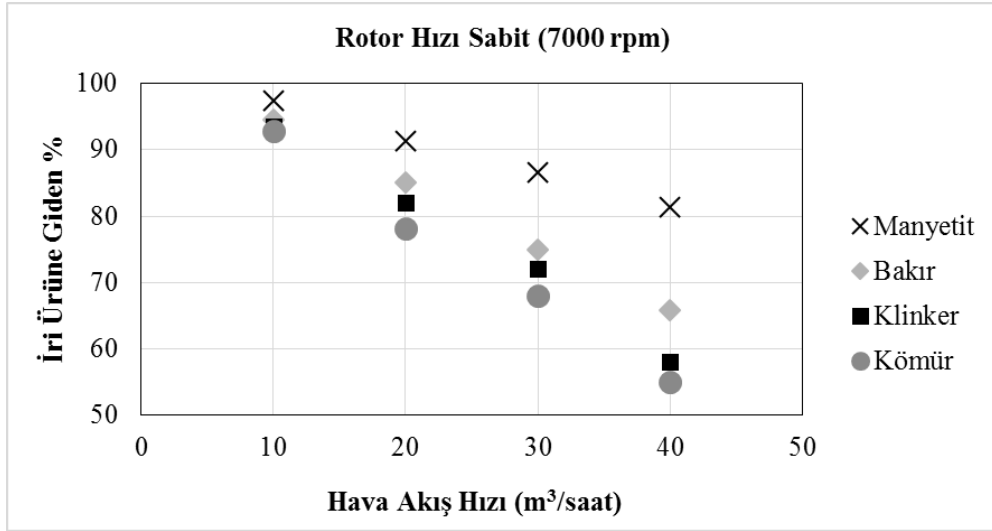
Hava akış hızının ve rotor hızının tane boyu dağılımları üzerine etkilerinin incelenmesinin yanı sıra, bu işletim parametrelerinin iri ürüne giden malzeme miktarları üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Buna göre, Şekil 7.19'de hava akış hızı 10 m<sup>3</sup>/saat değerinde sabit tutulduğunda ve diğer işletim parametreleri aynı iken, rotor hızının arttırılmasının iri ürüne giden malzeme oranını her malzeme için arttırdığı açıkça görülmektedir. Çünkü rotor hızı arttıkça sınıflandırıcı içerisindeki tanecikler üzerine etki eden merkezkaç kuvveti artmaktadır. Bu da taneciklerin daha çok çeperlere savrulmalarına ve oradan da iri ürün toplama haznesine gitmelerine sebep olmaktadır.





Şekil 7.19 Rotor hızının iri ürüne giden malzeme miktarı üzerindeki etkisi

Rotor hızı sabit tutulduğunda ve diğer tüm işletim parametreleri aynı iken, hava akış hızının artması ile birlikte iri ürüne giden malzeme miktarında azalma olduğu gözlenmektedir (Şekil 7.20).



Şekil 7.20 Hava akış hızının iri ürüne giden malzeme miktarı üzerindeki etkisi

Tüm deney koşulları her bir malzeme için 100 g ile yapılmıştır. Yukarıda grafiksel olarak verilmiş olan iri ürüne giden malzeme miktarları Çizelge 7.10'da ağırlık (g) olarak verilmektedir.

Çizelge 7.10 İri ürüne giden malzeme miktarları

Hava Akış Hızı (m <sup>3</sup> /sa)		10	10	10
Rotor Hızı (rpm)		3000	5000	7000
İri Ürün Miktarı (g)	Klinker	76,54	82,25	94,53
	Bakır	76,24	87,12	93,50
	Kömür	73,58	80,02	92,94
	Manyetit	87,83	93,38	97,34

Hava Akış Hızı (m <sup>3</sup> /sa)		20	20	20
Rotor Hızı (rpm)		3000	5000	7000
İri Ürün Miktarı (g)	Klinker	47,87	71,66	85,02
	Bakır	48,80	62,75	76,05
	Kömür	51,91	69,36	78,11
	Manyetit	74,31	86,86	91,40

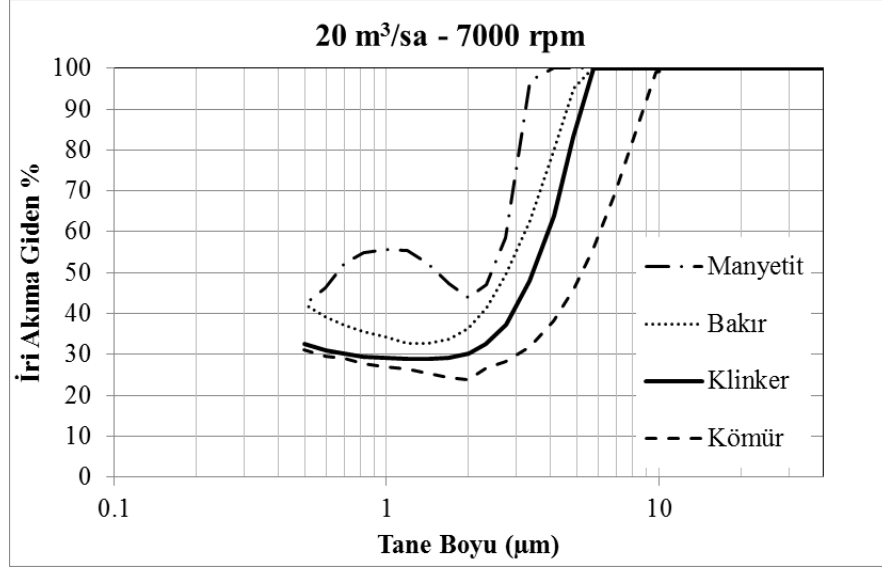
Hava Akış Hızı (m <sup>3</sup> /sa)		30	30	30
Rotor Hızı (rpm)		3000	5000	7000
İri Ürün Miktarı (g)	Klinker	30,39	62,23	70,21
	Bakır	33,71	57,37	60,65
	Kömür	37,58	59,82	62,42
	Manyetit	66,97	81,56	86,63

Hava Akış Hızı (m <sup>3</sup> /sa)		40	40	40
Rotor Hızı (rpm)		3000	5000	7000
İri Ürün Miktarı (g)	Klinker	20,06	48,85	65,75
	Bakır	22,28	46,81	58,04
	Kömür	19,67	48,97	62,34
	Manyetit	59,87	76,73	81,28

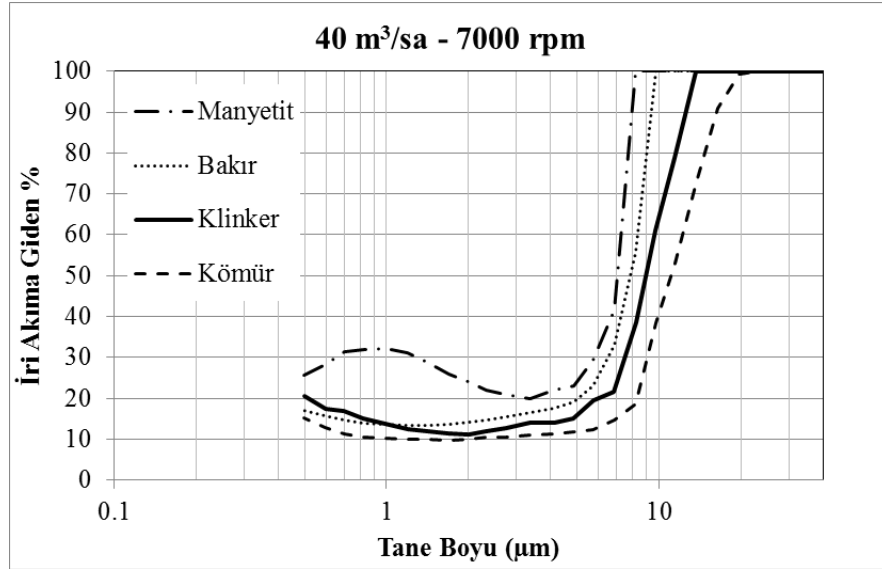
## 7.5 Deneysel Çalışmaların Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Madde denkliği çalışmaları tamamlandıktan sonra her bir deney için sınıflandırma performansı değerlendirmeleri yapılmıştır. Bu işlem için 5. Bölüm'de bahsedilmiş olan verimlilik eğrisi yaklaşımından yararlanılmıştır. Farklı deney koşulları için çizilmiş olan performans değerlendirme eğrileri kıyaslanmış ve aralarında anlamlı bir ilişki olup olmadığı gözlenmiştir. Değerlendirmeler kapsamında kaçak, kesme boyu ve verimlilik eğrisinin şekli üzerinden çeşitli yorumlar yapılmıştır.

Şekil 7.21-22'de malzeme yoğunluğunun kaçak ve kesme boyu ( $d_{50}$ ) üzerindeki etkisini gösteren gerçek verimlilik eğrileri sunulmaktadır. İki farklı işletim koşulunda, çalışmada kullanılan tüm malzemelerin kıyaslamalı olarak gerçek verimlilik eğrilerinin gözleendiği bu grafiklerde, en az yoğunluğa sahip olan kömür örneğinin en düşük kaçak miktarına ve en iri kesme boyuna ( $d_{50}$ ) sahip olduğu açıkça görülmektedir. En büyük yoğunluğa sahip olan manyetit örneği ise iki koşulda da en büyük kaçak miktarına ve en ince kesme boyuna ( $d_{50}$ ) sahip olmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında, malzemelerin yoğunluğu ile kaçak miktarı ve kesme boyu ( $d_{50}$ ) arasında anlamlı bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Buna göre, havalı sınıflandırıcı içerisine beslenen malzemenin yoğunluğunun artması havalı sınıflandırıcıdaki kaçak miktarını arttırmakta, kesme boyunu ( $d_{50}$ ) ise azaltmaktadır. Bu ilişkiler, literatürde yer alan geçmiş çalışmalarla da benzerlik göstermektedir [4, 12, 51]. Bazı verimlilik eğrilerinde kaçak sonrası ani yükselmeler ve alçalmalar gözlenmiştir (Şekil 7.21). Bunun nedeninin lazer kırınımı yöntemi ile yapılan tane boyu ölçümlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Lazer kırınımı yöntemi ile yapılan tane boyu dağılımı ölçümleri çok ince boylarda güvenilir sonuçlar vermede başarısız olabilmektedir. Bu bölümde rastgele seçilmiş işletim koşullarına ait gerçek verimlilik eğrileri verilmektedir. Her bir malzeme için tüm işletim koşulları verileri EK 2'de sunulmaktadır.



Şekil 7.21 20 m<sup>3</sup>/sa - 7000 rpm koşulunda gerçek performans eğrileri

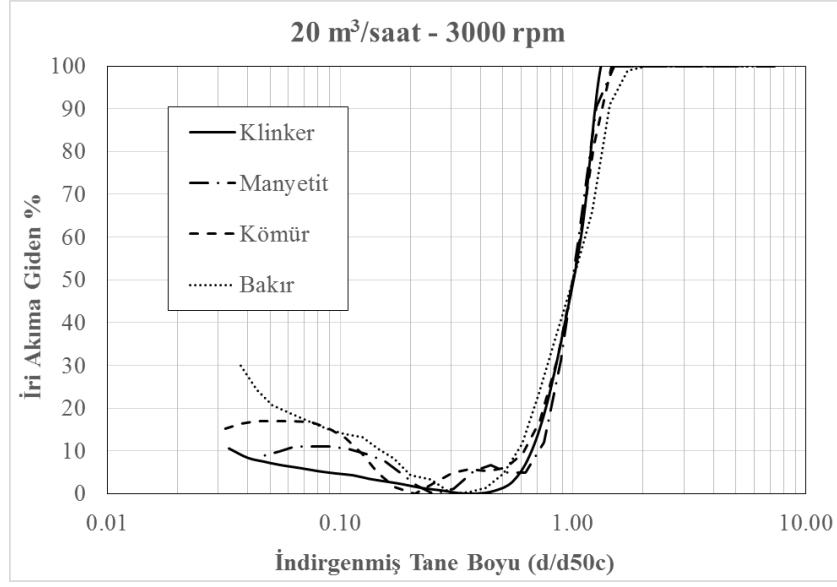


Şekil 7.22 40 m<sup>3</sup>/sa - 7000 rpm koşulunda gerçek performans eğrileri

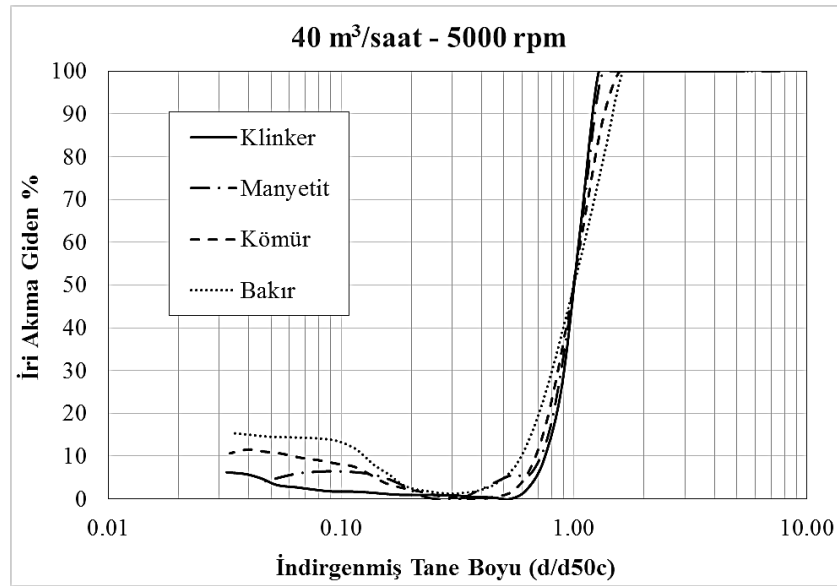
Gerçek verimlilik eğrileri üzerinden malzeme yoğunlukları ile kaçak ve kesme boyu arasında anlamlı ilişkiler tespit edilebilmektedir, fakat bu grafikler üzerinden malzemelerin akışkanlık özellikleri ile ilgili anlamlı bir ilişkiden söz edilememektedir. Bu sebeple, malzemelerin akışkanlık özelliklerinin, verimlilik eğrisinin şekli üzerine etkilerinin incelenmesi amacıyla indirgenmiş verimlilik eğrileri çizilmiştir.

Şekil 7.23-24'te malzemelerin akışkanlık özelliklerinin ayırım keskinliği ve olta etkisi üzerindeki etkisini gösteren indirgenmiş verimlilik eğrileri verilmektedir. İki ayrı koşulda indirgenmiş verimlilik eğrileri incelendiğinde, malzemelerin akışkanlık özellikleri ile ayırım

keskinliği ( $\alpha$ ) ve olta etkisi ( $\beta$ ) arasında anlamlı bir ilişki olduğu göze çarpmaktadır. En fazla akışkanlığa sahip olan klinker örneğinin, aynı işletim koşullarında diğer malzemere göre daha iyi bir ayırım keskinliğine sahip olduğu görülmektedir. Ancak olta etkisi incelendiğinde, klinker örneğinin diğer malzemelere göre daha düşük bir olta etkisine sahip olduğu gözlenmiştir. Bu kısımda rastgele seçilmiş işletim koşulları için verilmiş olan indirgenmiş verimlilik eğrileri verilerinin tamamı Ek 3'te sunulmaktadır.



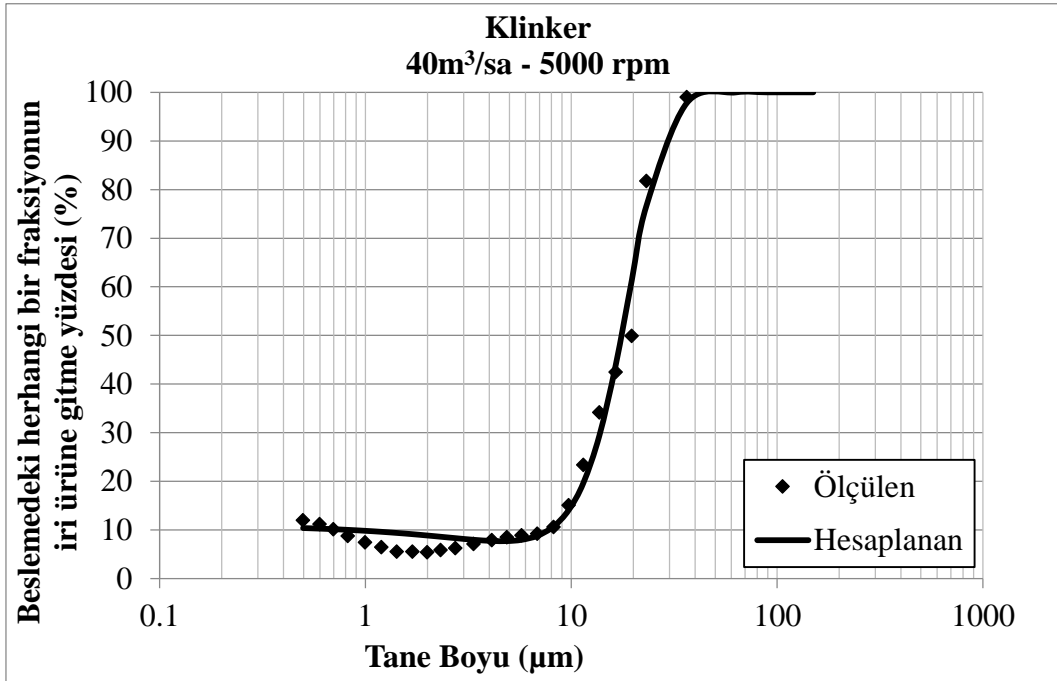
şekil 7.23 20m<sup>3</sup>/saat – 3000 rpm koşulunda indirgenmiş verimlilik eğrileri



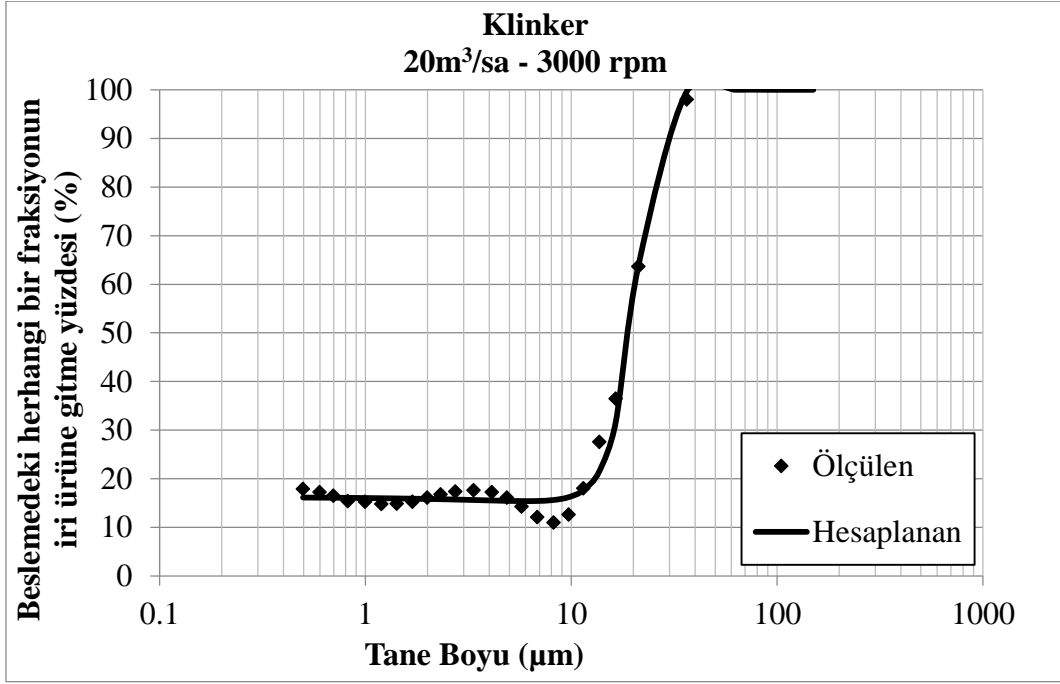
şekil 7.24 40m<sup>3</sup>/saat – 5000 rpm koşulunda indirgenmiş verimlilik eğrileri

## 7.6 Modelleme Çalışmaları

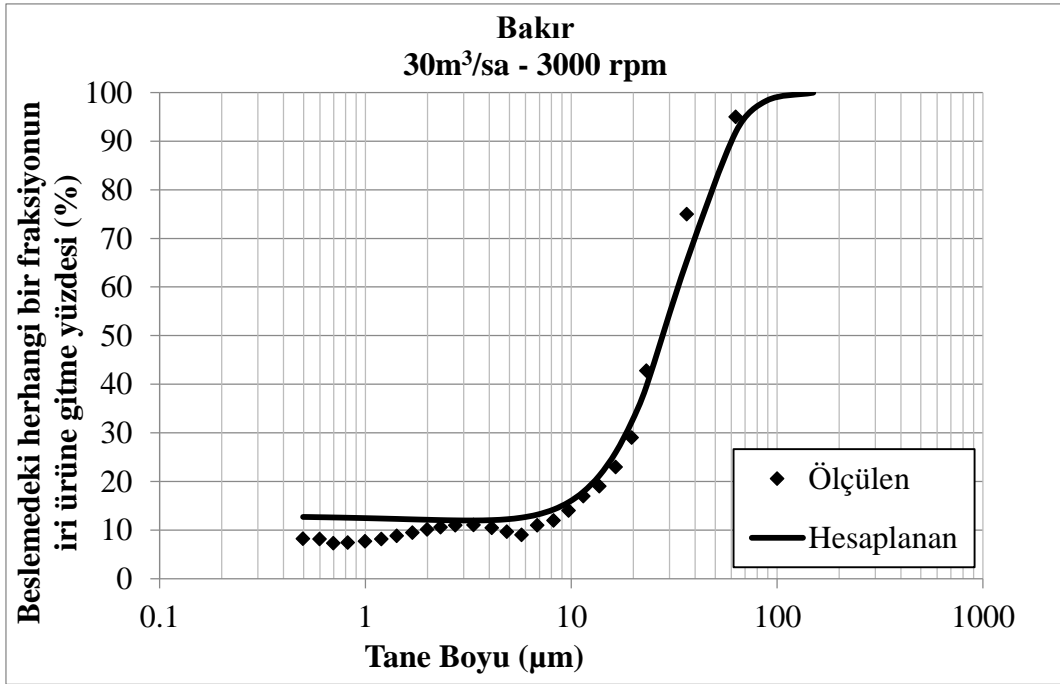
Madde denklığı çalışmalarının tamamlanmasının ardından, modelleme çalışmalarına geçilmiştir. Modelleme çalışmaları özetle verimlilik eğrilerinin matematiksel olarak tanımlanmasını ifade etmektedir. Geçmişten günümüze kadar verimlilik eğrisini ifade eden bir çok matematiksel tanımlama geliştirilmiştir. Altun [12] 2007 yılında yapmış olduğu çalışmada farklı eşitliklerin doğruluklarını kıyaslamış ve Whiten yaklaşımının [44] özellikle ince tane boylarında en düşük sapmayı verdiğini tespit etmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada yapılan modelleme çalışmalarında Whiten yaklaşımı kullanılmıştır. Her bir malzeme için tüm deney koşullarında Microsoft Office Excel © programı yardımıyla yapılmış olan modelleme çalışmalarında elde edilen sonuçlardan bazıları Şekil 7.25-32'de verilmektedir. Bu grafiklerde, gerçek verimlilik eğrileri ile modelleme çalışması sonucunda elde edilmiş olan verimlilik eğrileri karşılaştırılmalı olarak belirtilmektedir.



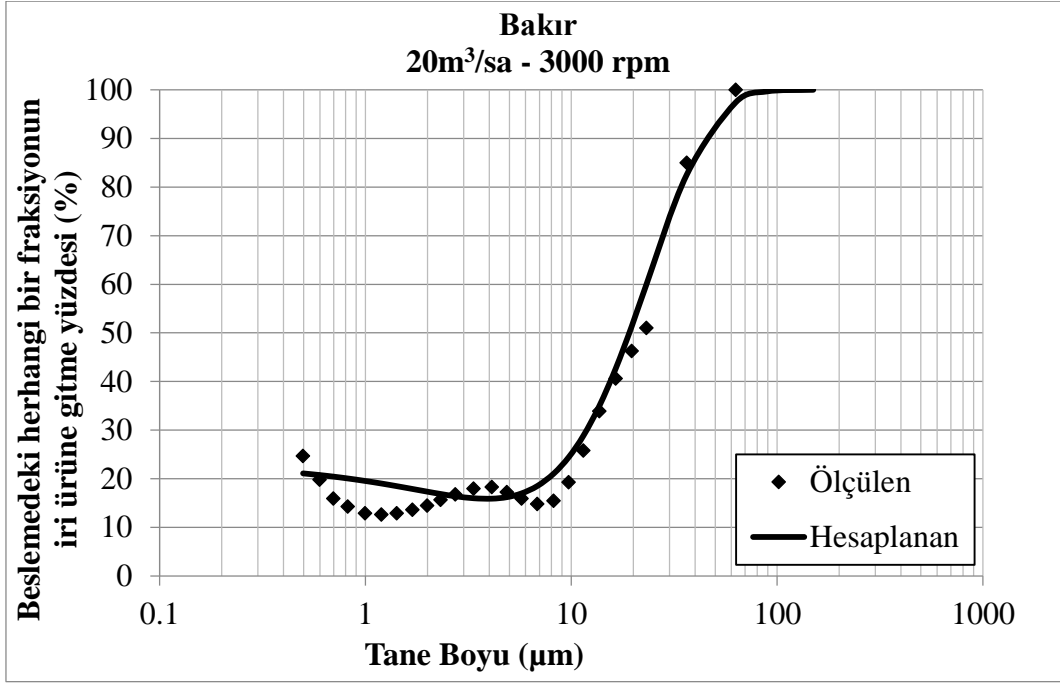
Şekil 7.25 Klinker için 40 m<sup>3</sup>/sa - 5000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri



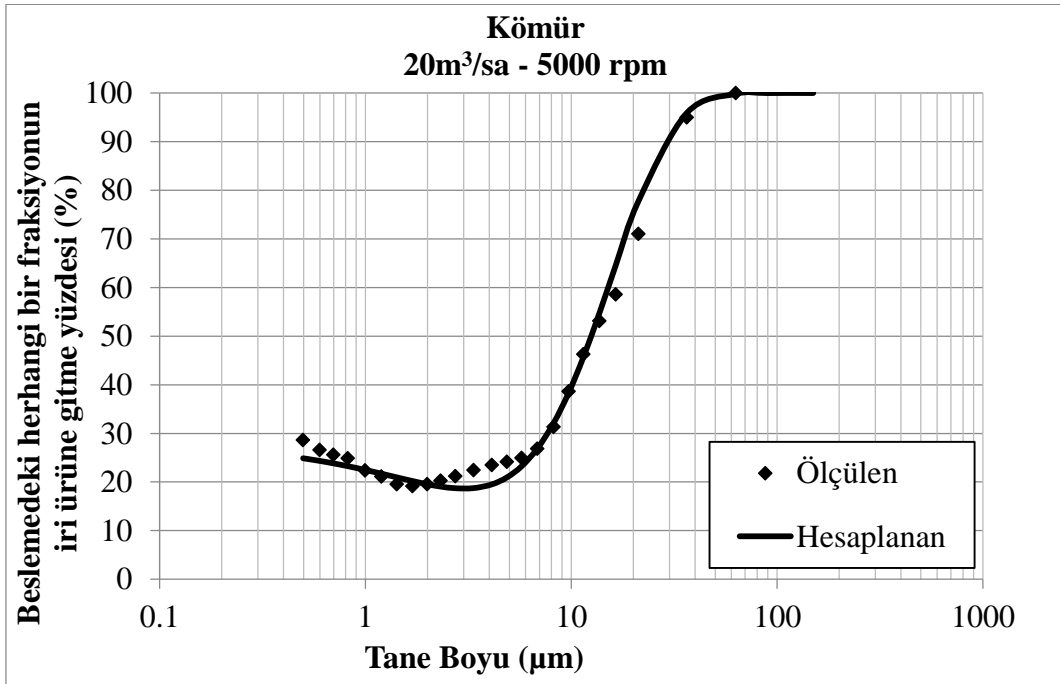
Şekil 7.26 Klinker için 20 m<sup>3</sup>/sa - 3000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri



Şekil 7.27 Bakır için 30 m<sup>3</sup>/sa - 3000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri

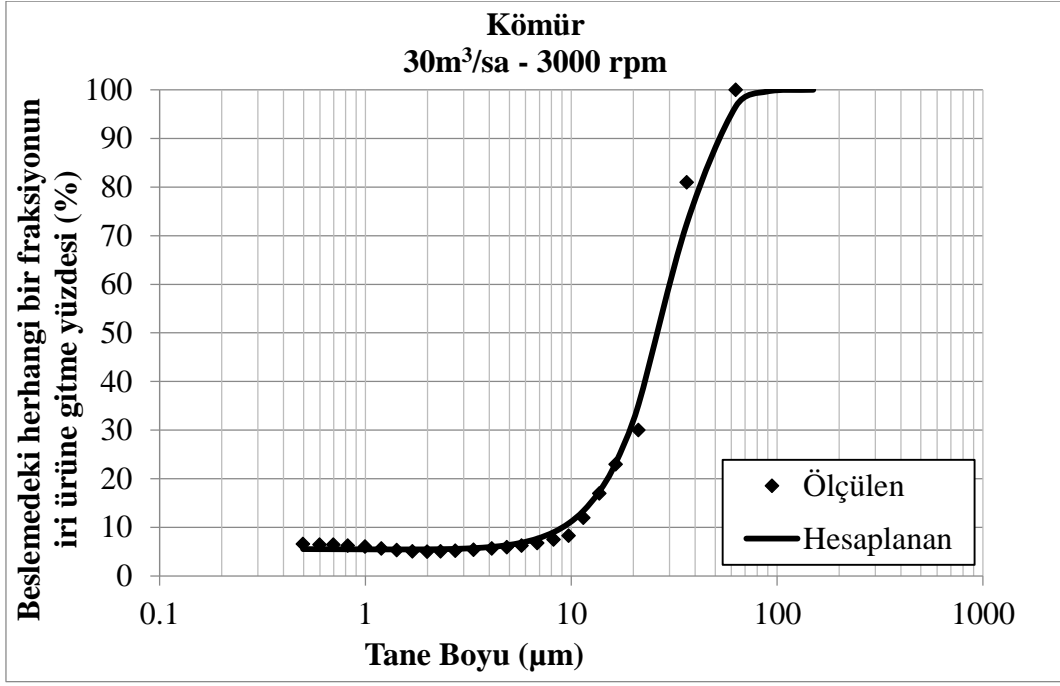


Şekil 7.28 Bakır için 20 m<sup>3</sup>/sa - 3000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri

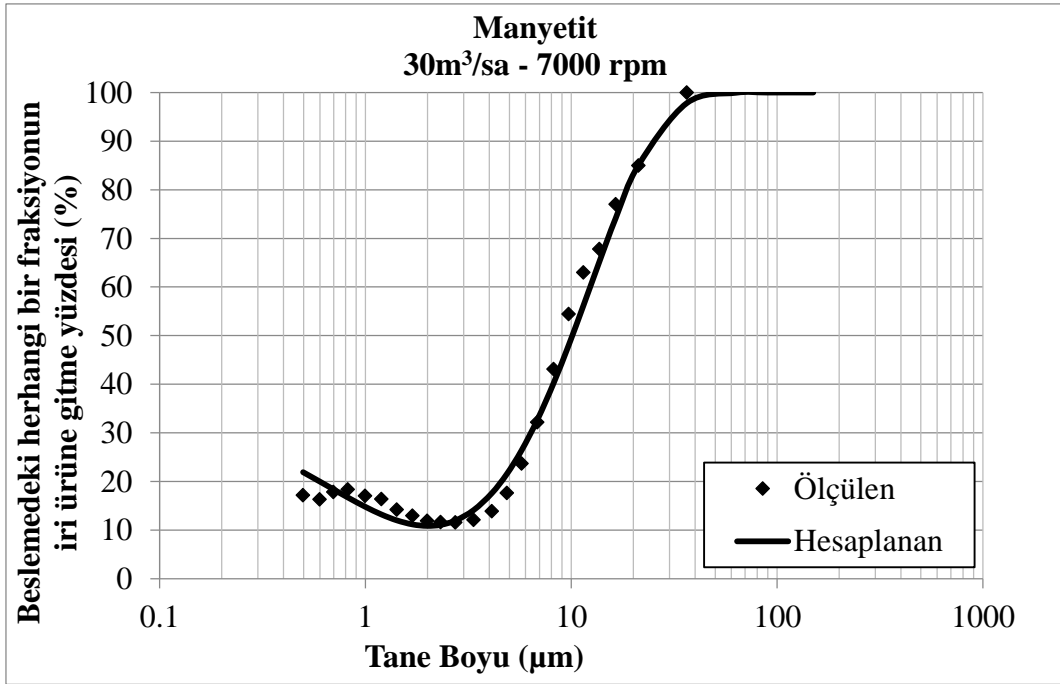


Şekil 7.29 Kömür için 20 m<sup>3</sup>/sa - 5000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri

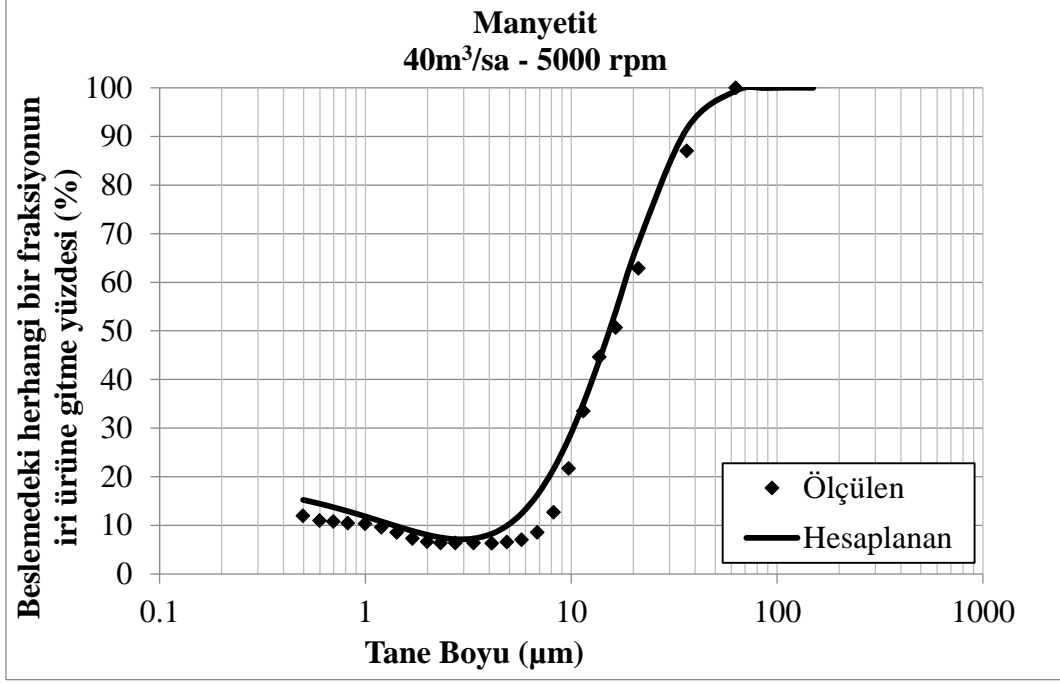




Şekil 7.30 Kömür için 30 m<sup>3</sup>/sa - 3000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri



Şekil 7.31 Manyetit için 30 m<sup>3</sup>/sa - 7000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri



Şekil 7.32 Manyetit için 40 m<sup>3</sup>/sa - 5000 rpm koşulunda ölçülen ve hesaplanan verimlilik eğrileri

Modelleme çalışmalarından elde edilen verimlilik eğrilerini tanımlayan  $d_{50c}$ ,  $C$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerinin, malzemelerin yoğunluk ve akışkanlık özellikleri ile ilişkileri değerlendirilmiştir. Madde denkliği çalışmasından sonra çizilen verimlilik eğrilerinden elde edilen veriler ışığında;  $d_{50c}$  ve  $C$  parametreleri malzemelerin yoğunluk özellikleri ile,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametreleri ise malzemelerin akışkanlık özellikleri ile ilişkilendirilmiştir.

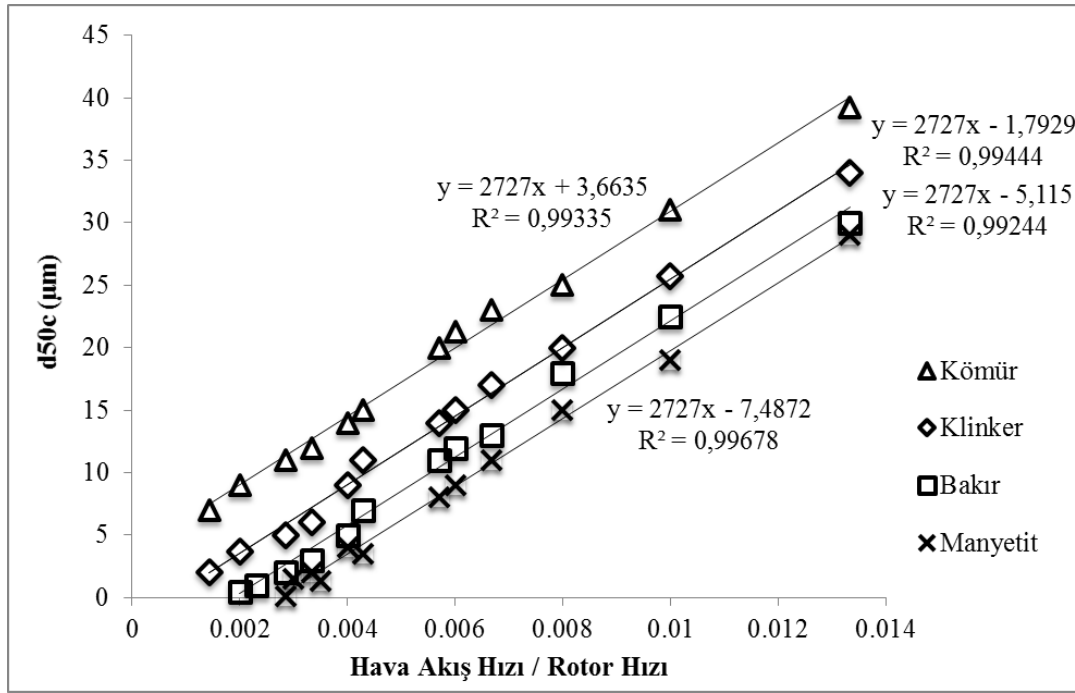
#### 7.6.1 $d_{50c}$ parametresi ilişkisi (Düzeltilmiş kesme boyu)

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere, bir havalı sınıflandırıcı operasyonunun kesme boyu, rotor hızına ve hava akış hızına bağlıdır [52, 53]. Ayrıca sınıflandırıcıya beslenen malzemenin inceliğinin de havalı sınıflandırıcı performansı üzerine etki ettiği bilinmektedir [4]. Ancak çalışmada kullanılan malzemelerin tane boyu dağılımları benzer olduğundan bu etki ortadan kaldırılmıştır.

Şekil 7.33'te, çalışmada kullanılan her bir malzeme için, hava akış hızının rotor hızına oranına karşı düzeltilmiş kesme boyları ( $d_{50c}$ ) grafikleri verilmektedir. Burada, eğrilerin anlamlı bir şekilde birbirlerinden farklılık gösterdikleri gözlenmektedir. Buna göre, aynı işletim parametrelerinde, en yüksek yoğunluğa sahip olan manyetit örneği en düşük düzeltilmiş kesme boyuna sahiptir. Aynı hava akış hızı ve rotor hızı oranında, en

yüksek düzeltilmiş kesme boyu ise en düşük yoğunluğa sahip olan kömür örneğinde elde edilmiştir. Bu durum, yoğunluğun düşmesi ile yerçekimi ve merkez kaç kuvvetlerinin etkilerinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, yoğunluğun kesme boyu ile bir ilişkisi olduğu anlaşılmaktadır. Buradan yola çıkıldığında düzeltilmiş kesme boyu ( $d_{50c}$ ) için yoğunluğa bağlı olan matematiksel bir model geliştirilebilir (Eşitlik 7.10). Geliştirilmiş olan bu eşitlik 10-40 m<sup>3</sup>/saat hava akış hızı ve 3000-7000 rpm rotor hızı aralığında geçerlidir.

$$d_{50c} = 2727 * x - 3,05 * \text{yoğunluk} + 7,72 \quad \text{Eşitlik 7.10}$$



Şekil 7.33 Hava akış hızı / Rotor hızı oranına karşı  $d_{50c}$  ilişkisi

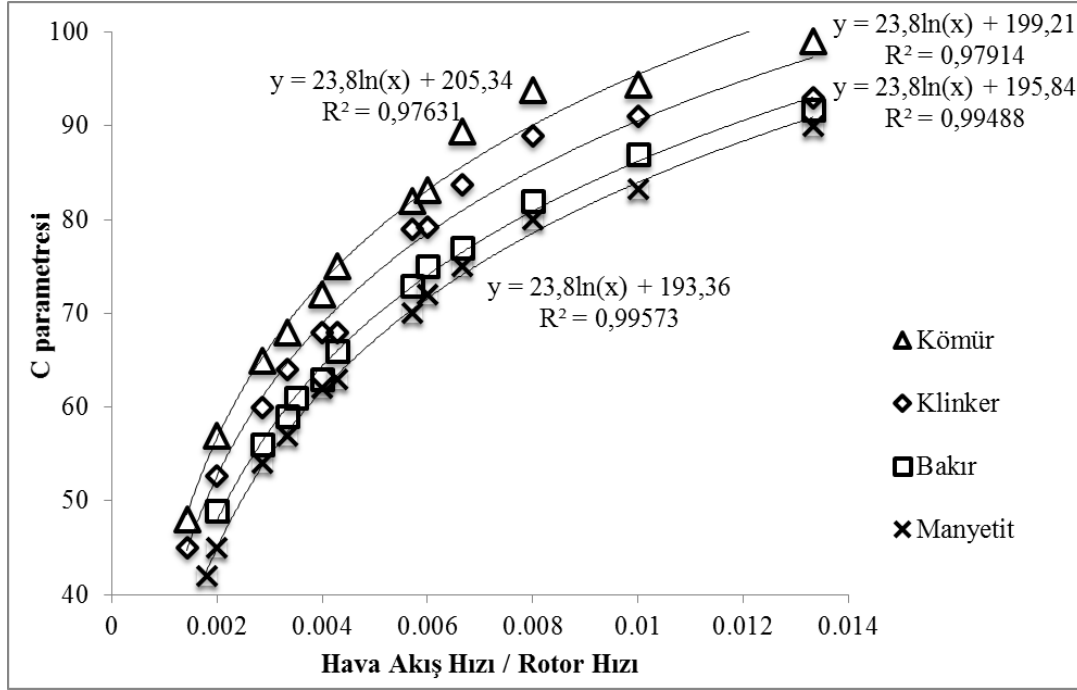
## 7.6.2 C parametresi ilişkisi (100 – kaçak)

Literatürde, bir sınıflandırma işlemindeki kaçağın, çoğunlukla sınıflandırıcının besleme akışındaki toz yükünden kaynaklandığı belirtilmektedir. Toz yükü arttıkça, kaçak miktarı da artmaktadır [4, 34]. Bu çalışma kapsamında, besleme hızı sabit tutulmuş ve sadece hava akış hızı ve rotor dönüş hızı işletim parametreleri değiştirilerek, bu parametrelerin C parametresi üzerine etkileri incelenmiştir. Şekil 7.34'te hava akış hızının rotor dönüş hızına oranının C parametresi ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Ayrıca, malzemelerin yoğunluklarına göre de bir ilişki olduğu açıkça göze çarpmaktadır. En düşük yoğunluğa sahip olan kömür örneğinin en üstte, en yüksek yoğunluğa sahip olan manyetit örneğinin ise en altta yer alıyor olması, sabit işletim şartlarında C parametresinin sınıflandırıcıya beslenen malzemenin

yoğunluğu ile ters orantılı olduğunu kanıtlamaktadır. Şekil 7.34'te belirtilen eğriler logaritmik bir eşitlik (Eşitlik 7.11) ile tanımlanmış ve eğimleri eşit olduğundan birbirlerine paraleldirler. Bunun yanında, eşitlikteki sabitler malzemelerin yoğunluklarına göre değişim göstermektedir. Geliştirilmiş olan bu eşitlik 10-40 m<sup>3</sup>/saat hava akış hızı ve 3000-7000 rpm rotor hızı aralığında geçerlidir.

$$C = 23,8 * \ln(x) + 209,84 * e^{-0,016*yoğunluk}$$

Eşitlik 7.11



Şekil 7.34 Hava akış hızı / Rotor hızı oranına karşı C parametresi ilişkisi

### 7.6.3 $\alpha$ parametresi ilişkisi (Ayrım keskinliği)

Verimlilik eğrisinin şekli ayırım keskinliği ( $\alpha$ ) ve olta etkisi ( $\beta$ ) parametreleri ile ifade edilmektedir. Ayrım keskinliği parametresi sınıflandırıcıların işletim parametreleri ve dizayn özellikleri ile ilişkilidir [4].

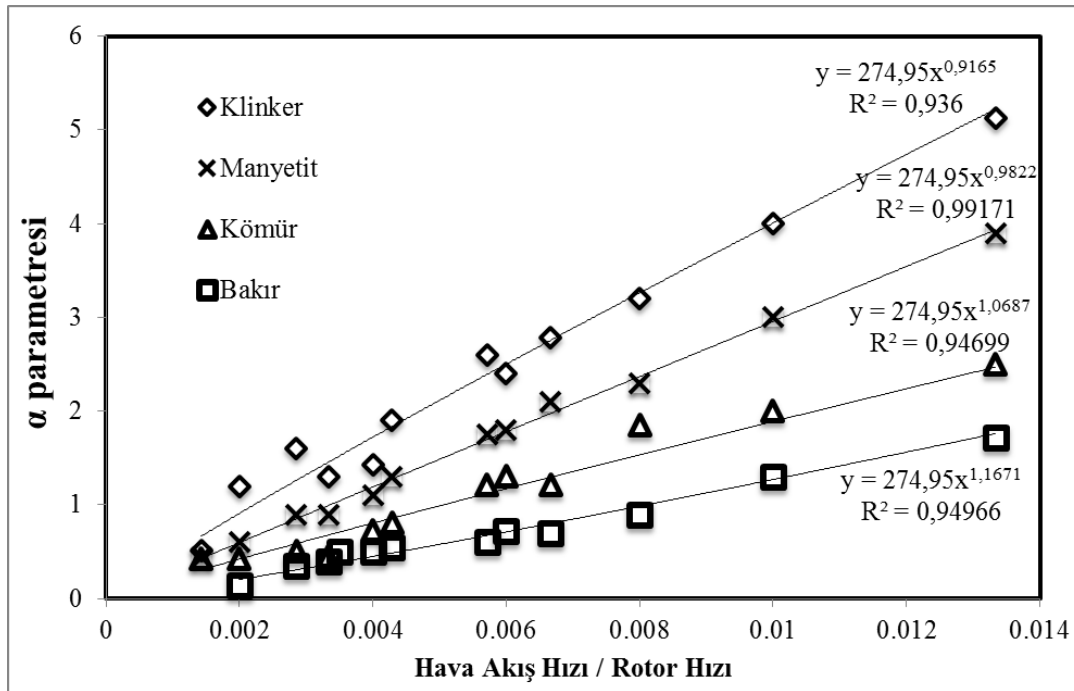
Şekil 7.35'de her bir malzeme için  $\alpha$  parametresinin işletim parametreleri ile ilişkisi verilmektedir. Hava akış hızının rotor dönüş hızına oranı arttığında  $\alpha$  parametresinin de arttığı görülmektedir. Bu da daha keskin bir sınıflandırmayı işaret etmektedir. Buna ek olarak, en yüksek akışkanlık özelliğine sahip olan klinker örneğinin en yüksek, en düşük akışkanlığa sahip olan bakır örneğinin ise en düşük  $\alpha$  parametresine (ayırım keskinliğine) sahip olduğu anlaşılmaktadır. Özetlemek gerekirse, bir malzemenin akışkanlık özelliğinin

yüksek olması, taneciklerin daha iyi dağıtılmış olması anlamına gelmekte ve bu da sınıflandırıcıda daha keskin bir ayırımın gerçekleşmesine sebep olmaktadır.

Şekil 7.35'deki eğrilerin tanımlandığı eşitlikte ( $y = ax^b$ ) a parametrelerinin sabit, b parametrelerinin ise malzemelerin akışkanlık özellikleri ile ilişkilendirilebileceği görülmektedir. Buradan yola çıkarak  $\alpha$  parametresini ifade eden Eşitlik 7.12 elde edilmiştir. Geliştirilmiş olan bu eşitlik 10-40 m<sup>3</sup>/saat hava akış hızı ve 3000-7000 rpm rotor hızı aralığında geçerlidir.

$$\alpha = 274,95 * x^{0,649*akışkanlık^{-0,093}}$$

Eşitlik 7.12



Şekil 7.35 Hava akış hızı / Rotor hızı oranına karşı  $\alpha$  parametresi ilişkisi

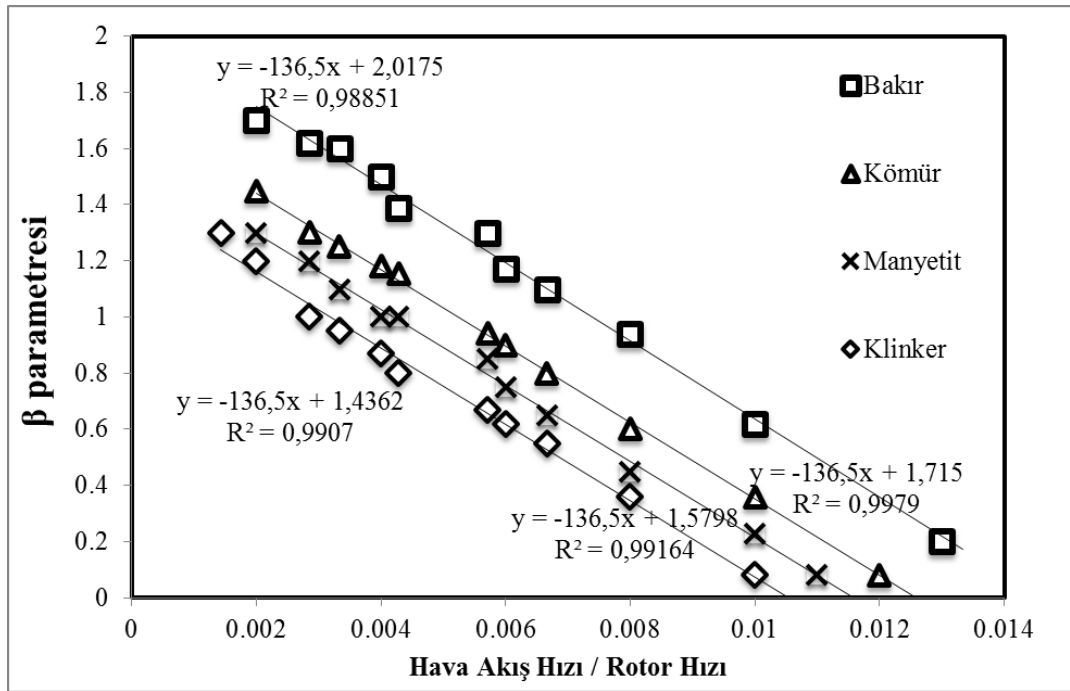
#### 7.6.4 $\beta$ parametresi ilişkisi (Olta etkisi)

Olta etkisi ( $\beta$  parametresi) sınıflandırıcıya beslenen taneciklerin yüzey yüklerinden kaynaklanan topaklanma eğilimlerine bağlıdır [38, 44].

Şekil 7.36'da  $\beta$  parametresi ile işletim parametreleri arasındaki ilişki verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, eğriler birbirlerine paralellik göstermekte ve hava akış hızının rotor dönüş hızına oranı arttığında  $\beta$  parametresi azalmaktadır. Bu durumun, yüksek hava miktarının tanecikleri daha iyi dağıtarak topaklanmayı azaltmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Rotor dönüş hızının artması ise taneciklerin birbirlerine çarpışma

olasılıklarını arttırmakta ve buna bağlı olarak da taneciklerin topaklanma eğilimi artmaktadır. Bu da  $\beta$  parametresinin daha düşük olmasına neden olmaktadır. Bunların yanı sıra,  $\beta$  parametresinin malzemelerin akışkanlık özellikleri ile de bir ilişki içerisinde olduğu göze çarpmaktadır. İşletim parametreleri sabit tutulduğunda, en yüksek akışkanlığa sahip olan klinker örneğinin en düşük, en düşük akışkanlığa sahip olan bakır örneğinin ise en yüksek  $\beta$  parametresine sahip olduğu görülmektedir. Bu değerlendirmeler ışığında  $\beta$  parametresini ifade eden Eşitlik 7.13 elde edilmiştir. Geliştirilmiş olan bu eşitlik 10-40 m<sup>3</sup>/saat hava akış hızı ve 3000-7000 rpm rotor hızı aralığında geçerlidir.

$$\beta = -136,5 * x + 0,873 * akışkanlık^{-0,131} \quad \text{Eşitlik 7.13}$$



Şekil 7.36 Hava akış hızı / Rotor hızı oranına karşı  $\beta$  parametresi ilişkisi

### 7.7 Dinamik Havalı Sınıflandırıcı İçin Önerilen Çoklu Bileşenli Model Yapısı

Tez çalışması kapsamında geliştirilmiş olan çoklu bileşenli korelasyonlar, Altun ve Benzer'in [4] daha önce geliştirmiş oldukları eşitlikler ile birlikte değerlendirilmiş ve bir çoklu bileşenli model yapısı önerilmiştir. Altun ve Benzer'in yaptığı çalışmada, çimento sektöründe kullanılmakta olan bir çok yüksek verimli havalı sınıflandırıcıdan örnekler alınmış ve kütle denklığı çalışmaları yapılmıştır. Sonrasında, elde edilen bulgular Whiten eşitliği üzerine işlenerek, yüksek verimli havalı sınıflandırıcılar için matematiksel bir model yapısı geliştirilmiştir. Bu çalışmada [4], bir yüksek verimli havalı sınıflandırıcının

performansının beslemedeki toz yükünden (birim hava miktarındaki tane ağırlığı), rotor ve hava akış hızından etkilendiği belirtilmektedir. Bu parametreler kaçak ve kesme boyu üzerinde etkili olmaktadır. Çalışmada elde edilen bilgiler ışığında, Whiten eşitliğinde belirtilen parametreler, işletim ve tasarım değişkenleri ile ilişkilendirilmiş ve matematiksel eşitlikler olarak ifade edilmişlerdir (Eşitlik 7.14-17).

$$C = 100 - 10,467 * (DL)^{1,4171} \quad \text{Eşitlik 7.14}$$

$$\frac{d}{d_{50c}} = 2,47 * \left( \frac{AF}{RS*F} \right)^{-0,7775} * d \quad \text{Eşitlik 7.15}$$

$$\alpha = 0,905 * \left( \frac{D}{DL} \right)^{1,2679} \quad \text{Eşitlik 7.16}$$

$$\beta = 0,4417 * DL^{1,4171} - 0,1293 \quad \text{Eşitlik 7.17}$$

D : Sınıflandırıcı iç çapı (m)

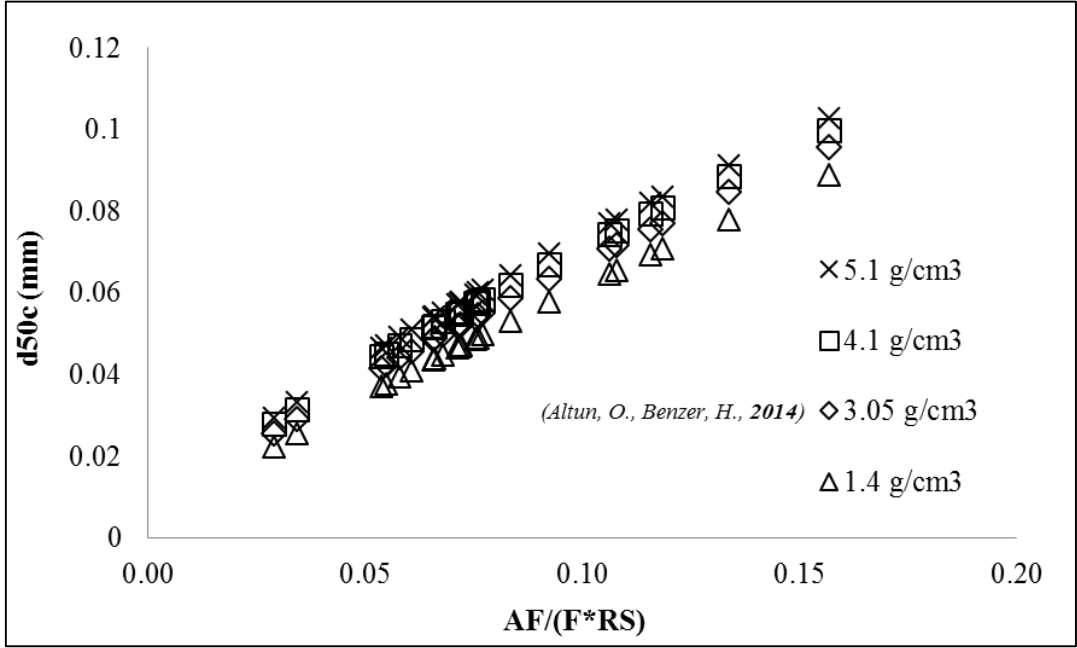
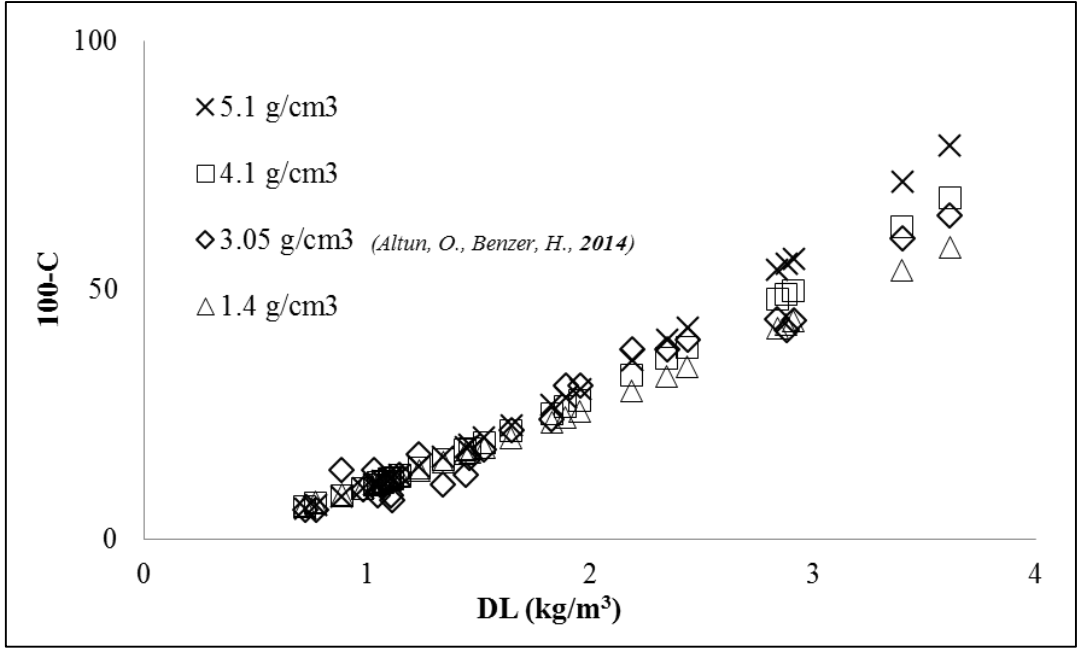
DL : Sınıflandırıcı beslemesi toz yükü (kg/m<sup>3</sup>)

AF : Hava akış hızı (m<sup>3</sup>/h)

RS : Rotor hızı (m/s)

F : Sınıflandırıcı beslemesinde (-36+3) µm tane boyu aralığındaki malzeme miktarı

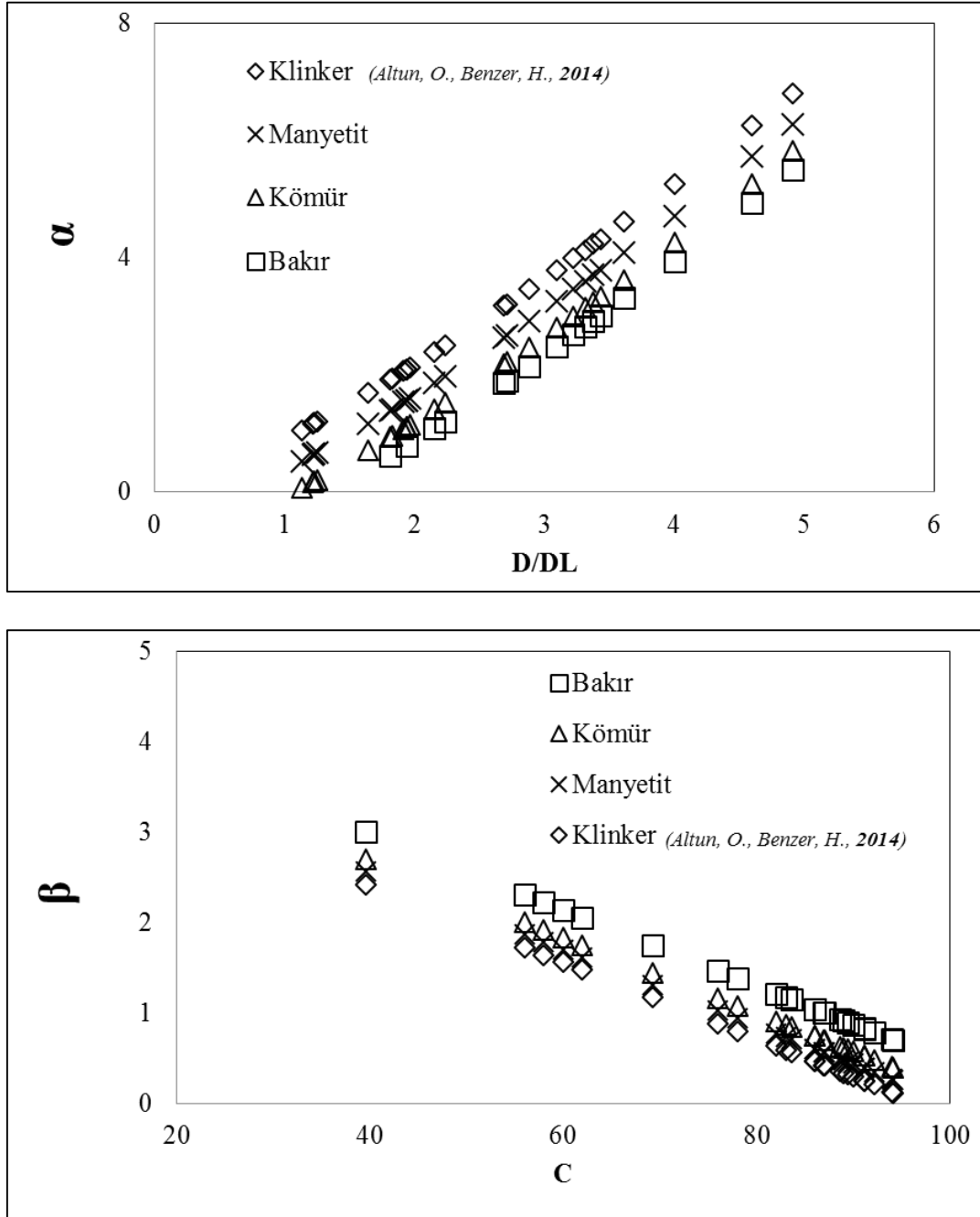
Bu tez çalışması kapsamında, Whiten eşitliğindeki düzeltilmiş kesme boyu (d<sub>50c</sub>), kaçak (100-C), ayırım keskinliği (α) ve olta etkisi (β) parametreleri dikkate alınmıştır. Yapılan çalışmalar, düzeltilmiş kesme boyu (d<sub>50c</sub>) ve kaçak (100-C) parametrelerinin malzemelerin yoğunluk özellikleri ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, Altun ve Benzer'in [4] çalışmasında elde edilen eğriler Şekil 7.37'deki gibi düzenlenmiştir. Altun ve Benzer'in çalışmasında [4] sadece klinker malzemesi için 100-C ve d<sub>50c</sub> parametreleri için eğriler ifade edilmektedir. Bu tez çalışmasında ise mevcut eğri üzerine, yoğunluğu klinkerin yoğunluğundan farklı olan manyetit, kömür ve bakır malzemeleri de eklenmiştir. Yoğunluğun değişmesi ile birlikte 100-C ve d<sub>50c</sub> parametrelerinin anlamlı bir şekilde değiştiği Şekil 7.37'de açıkça görülmektedir.



Şekil 7.37 Yoğunluğa bağlı olan kaçak ve düzeltilmiş kesme boyu modelleri



Bu çalışmada elde edilen bulgulardan bir diğeri de verimlilik eğrisini ifade eden  $\alpha$  (ayrım keskinliği) ve  $\beta$  (olta etkisi) parametrelerinin malzemelerin akışkanlık özellikleri ile ilişkilendirilebiliyor olmasıdır. Altun ve Benzer'in çalışmasında [4] sadece klinker malzemesi için belirtilmiş olan ayrım keskinliği ( $\alpha$ ) ve olta etkisi ( $\beta$ ) parametreleri eğrilerinin üzerine, farklı akışkanlık özelliklerine sahip manyetit, kömür ve bakır malzemelerine ait eğriler eklenmiştir (Şekil 7.38). Akışkanlığın değişmesi ile birlikte elde edilen eğrilerin anlamlı bir şekilde değiştiği göze çarpmaktadır.



Şekil 7.38 Akışkanlığa bağlı olan  $\alpha$  (ayrım keskinliği) ve  $\beta$  (olta etkisi) modelleri

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 8.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, malzemelerin yoğunluk ve akışkanlık özelliklerinin havalı sınıflandırıcı performansı üzerine etkilerinin incelenmesi ve dinamik havalı sınıflandırıcılar için verimlilik eğrisine dayalı olarak geliştirilmiş olan mevcut modelin çoklu bileşenli bir yapıya büründürülmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, klinker, bakır, kömür ve manyetit örnekleri ile laboratuvar ölçekli bir dinamik havalı sınıflandırıcı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deney çalışmalarında, ön denemeler sonucunda havalı sınıflandırıcının davranışını temsil edeceği düşünülen 4 farklı hava akış hızı (10-20-30-40 m<sup>3</sup>/saat) ve 3 farklı rotor hızı (3000-5000-7000 rpm) kullanılmıştır. Yapılan tüm deneylerde besleme hızları ve miktarları sabit tutulmuştur.

Deney çalışmalarına geçilmeden önce malzemelerin tanımlanması için bir takım çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, çalışmada kullanılacak olan manyetit, kömür, klinker ve bakır örneklerinin tane boyu dağılımları, yoğunlukları ve akışkanlıkları belirlenmiştir. Tane boyu dağılımları lazer kırınımı yöntemiyle yapılmış ve tüm malzemelerin benzer tane boyu dağılımına sahip oldukları görülmüştür. Bu sayede, yapılacak olan tüm değerlendirmelerde tane boyu dağılımı farkının sonuçlara etki etmeyeceği tespit edilmiştir. Malzemelerin yoğunlukları ise piknometre yöntemi ile dört tekrarlı olarak yapılmış ve standart sapma değerleri kontrol edilmiştir. Standart sapma değerleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde olan ölçüm sonuçları için ortalama değerler kabul edilmiştir. Buna göre, kömür örneğinin yoğunluğu 1,40 g/cm<sup>3</sup>, klinker örneğinin yoğunluğu 3,05 g/cm<sup>3</sup>, bakır örneğinin yoğunluğu 4,10 g/cm<sup>3</sup> ve manyetit örneğinin yoğunluğu 5,10 g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Akışkanlık tayini için Jolicoeur vd.'nin [46] yapmış olduğu çalışmadaki bir yöntem kullanılmıştır. Zamana bağlı olarak elek altına geçen malzeme miktarını esas alan bu yöntemle göre, en akışkan malzemenin klinker olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra sırasıyla manyetit, kömür ve bakır örnekleri gelmektedir.

Tez çalışmasında kullanılan malzemelerin tanımlanmasından sonra, her bir malzeme için laboratuvar ölçekli dinamik havalı sınıflandırıcı kullanılarak yukarıda belirtilen hava akış hızı ve rotor hızı değerlerinde seri deney çalışmaları yapılmıştır. Deneylerin sonunda, havalı sınıflandırıcıdan ince ürünün alındığı siklonun %100 verim ile çalışmadığı düşünüldüğünden, besleme ve iri ürünün ağırlıkları ve tane boyu dağılımları ölçülmüştür. Daha sonra yürütülecek olan modelleme çalışmalarının başarılı olabilmesi için verilerin

güvenilirliğini arttırmak amacıyla, bu değerler kullanılarak JKSimMet © programı yardımıyla madde denkliği çalışmaları yapılmıştır. Madde denkliği çalışmalarının başarısı, ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımlarının kıyaslaması yapılarak teyitlenmiştir.

Madde denkliğinden elde edilen ağırlık ve tane boyu dağılımları verileri ile yapılan deneylerin sonuçları değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerde, rotor hızının sabit tutulduğu koşulda, hava akış hızının artırılması ile iri ürüne giden malzeme miktarının azaldığı, iri ürünün tane boyu dağılımının ise daha iriye gittiği görülmüştür. Bu durumun sebebinin, hava akış hızının artmasıyla birlikte taneler üzerindeki sürüklenme kuvveti ( $F_d$ ) etkisinin artması olduğu düşünülmektedir. Hava akış hızı sabit tutulup, rotor hızı arttırıldığında ise iri ürüne giden malzeme miktarının arttığı, ancak iri ürünün tane boyu dağılımının daha inceye gittiği görülmüştür. Burada, rotor hızının artması ile birlikte taneler üzerine etki eden merkezkaç kuvveti ( $F_c$ ) etkisinin artmasından söz edilebilir.

Madde denkliğinden sonra kesme boyu, kaçak, ayırım keskinliği ve olta etkisi parametrelerinin incelenebilmesi amacıyla verimlilik eğrileri çizilmiştir. Kesme boyu ve kaçak parametrelerinin gözlenebilmesi amacıyla her bir deney koşulu için gerçek verimlilik eğrileri çizilmiştir. Tüm malzemeler için elde edilen gerçek verimlilik eğrileri incelendiğinde, sabit deney koşulunda, malzeme yoğunluğunun artması ile birlikte kesme boyunun azaldığı, kaçağın ise arttığı sonucuna varılmıştır. Bu durumun sebebinin malzeme yoğunluğunun artması ile birlikte taneler üzerine etki eden merkezkaç ve yerçekimi kuvvetinin artması olduğu düşünülmektedir. Merkezkaç ( $F_c$ ) ve yerçekimi ( $F_g$ ) kuvvetlerinin artması ile birlikte görece daha ince taneler de iri ürün toplama haznesine gelebilmektedir. Verimlilik eğrisinin şeklini ifade eden ayırım keskinliği ve olta etkisi parametrelerinin incelenebilmesi amacıyla indirgenmiş verimlilik eğrileri çizilmiştir. Bu eğriler kontrol edildiğinde, malzemelerin akışkanlığının artması ile birlikte ayırım keskinliğinin arttığı, olta etkisinin ise azaldığı anlaşılmıştır. Bu durumun, malzemelerin akışkanlığının artması ile birlikte, tanelerin sınıflandırıcı içerisinde daha iyi dağılması ve daha az topaklanma eğilimi göstermelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Deneysel çalışmaların sonuçlarının incelenmesinin ardından modelleme çalışmalarına geçilmiştir. Modelleme çalışmaları, Altun'un [12] çalışmasında diğer eşitlikler ile kıyaslandığında verimlilik eğrisini en iyi ifade ettiği belirlenmiş olan Whiten eşitliği kullanılarak yapılmıştır. Tüm malzemeler için her deney koşulunda yapılmış olan modelleme çalışmalarından elde edilen veriler ışığında, Whiten eşitliğini ifade eden  $d_{50c}$  (düzeltilmiş kesme boyu),  $C$  (100-kaçak),  $\alpha$  (ayırım keskinliği) ve  $\beta$  (olta etkisi)

parametrelerinin, malzemelerin yoğunluk ve akışkanlık özellikleri ile ilişkileri değerlendirilmiştir. Burada, d50c ve C parametrelerinin malzemelerin yoğunluk özelliğiyle,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerinin ise malzemelerin akışkanlık özelliği ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Malzemelerin yoğunluğunun artması ile birlikte d50c ve C parametrelerinin anlamlı bir şekilde azaldığı anlaşılmış ve bu ilişkileri ifade eden birer matematiksel eşitlik üretilmiştir. Malzemelerin akışkanlığının artması ise  $\alpha$  parametresini sistematik olarak arttırdığı,  $\beta$  parametresini sistematik olarak azalttığı görülmüştür. Bu ilişkiler matematiksel olarak ifade edilmiştir. Böylelikle, yoğunluğu veya akışkanlığı bilinen bir malzeme için verimlilik eğrisini ifade eden d50c, C ,  $\alpha$  ve  $\beta$  değerleri bu eşitlikler kullanılarak hesaplanabilmektedir.

Modelleme çalışmalarının ardından, bu tez çalışmasında elde edilen eşitlikler, Altun ve Benzer'in [4] klinker malzemesi üzerinde yapmış oldukları çalışmada elde edilen eşitlikler ile birlikte değerlendirilmiş ve bir çoklu bileşenli model yapısı önerilmiştir. Altun ve Benzer'in çalışmasında klinker malzemesi için d50c, 100-C,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerini ifade eden eğrilerin üzerlerine manyetit, bakır ve kömür malzemelerinin ilgili eğrileri eklenmiş ve eğrilerin anlamlı bir şekilde değişim gösterip göstermedikleri incelenmiştir. Beklendiği üzere, d50c ve 100-C parametreleri malzemelerin yoğunluğuna,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametreleri ise malzemelerin akışkanlığına göre bir değişim göstermiştir.

## 8.2 Öneriler

Çalışmada laboratuvar ölçekli bir havalı sınıflandırıcı ile geliştirilmiş olan model yapısının endüstriyel veriler ile uyumu incelenerek modelin doğruluğunun kontrol edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada bir malzeme özelliği olarak sınıflandırıcı performansı üzerine etkisi incelenmiş olan akışkanlık, Jolicoeur'in [46] 2007 yılında yapmış olduğu bir çalışmadan yararlanılarak tayin edilmiştir. Malzemelerin akışkanlık özelliklerinin farklı yöntemlerle de belirlenmesinin model için fayda getirebileceği düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında bahsi geçen işletim parametrelerine ve malzeme özelliklerine ek olarak, kimyasal kullanımının da sınıflandırıcı performansında etkili bir değişken olduğu bilinmektedir [49]. Bu bağlamda, öğütme yardımcısı olarak kullanılan kimyasalların, bu çalışmanın bulguları üzerinde nasıl bir etki yaratacağının incelenmesi gerekmektedir.

Çoklu bileşenli model yapısı sadece havalı sınıflandırıcılar için değil, suyun dahil olduğu (hidrosiklon) diğer sınıflandırıcılar için de yapılabilmektedir. Son dönemde hidrosiklon için de çoklu bileşenli modele yönelik çalışmaların yapıldığı bilinmektedir. Bu tez çalışmasında elde edilen çıktıların, hidrosiklonlar için geliştirilen çoklu bileşenli model yapısı ile olan uyumunun incelenmesi önerilmektedir.

Bu tez çalışmasındaki deneyler, havalı sınıflandırıcı işletim parametrelerinden sadece rotor dönüş hızı ve hava akış hızı değiştirilerek yapılmıştır. Besleme hızı tüm deneyler için sabittir. Çalışmadan elde edilen bulguların farklı besleme hızlarında nasıl bir değişim göstereceğinin de gözlenmesi gerekmektedir.

Çalışmanın çıktılarının CFD ve DEM modeller kullanılarak yapılacak çalışmalar ile ilişkilendirilmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Özer, C.E., Whiten, W.J., Lynch, A.J., A multi-component model for the vertical spindle mill, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 148, pp. 155-165, **2016**.
- [2] Bueno, M.P., Kojovic, T., Powell, M.S., Shi, F., Multi-component AG/SAG mill model, *Minerals Engineering*, Vol. 43-44, pp. 12-21, **2013**.
- [3] Dündar, H., Benzer, H., Investigating multicomponent breakage in cement grinding, *Minerals Engineering*, vol. 77, pp. 131-136, **2015**.
- [4] Altun, O., Benzer, H., Selection and mathematical modelling of high efficiency air classifiers, *Powder Technology*, vol. 264, pp. 1-8, **2014**.
- [5] Duda, W., Cement-Data-Book. International Process Engineering in the Cement Industry, *Bauverlag GmbH, Wiesbaden and Berlin*, **1985**.
- [6] Shapiro, M., Galperin, V., Air Classification of Solid Particles: A Review, *Chemical Engineering and Processing*, vol. 44, pp. 279-285, **2005**.
- [7] Klumpar, I.V., Currier, F.N., Ring, T.A., Air classifiers, *Chemical Engineering*, vol. 93 (5), pp. 77-92, **1986**.
- [8] Knoflicek, M., Classifiers and Separators, *Innovations in Portland Cement Manufacturing, Edited by, Bhatti, J.I., Miller, F.M., Kosmatka*, pp. 519-539, **2004**.
- [9] Pastala, A., Contribution to the Design of Air Separation Equipment for Closed Circuit Grinding Systems, *Cement Technology*, pp. 119-124, **1975**.
- [10] Detwiler, R., High Efficiency Separators Part:1 Effect on Cement, *ZKG*, vol. 48, No. 7, pp. 384-393, **1995**.
- [11] Ring, T., Fundamentals of Ceramic Powder Processing and Synthesis, *Academic Press*, **1996**.
- [12] Altun, O., *Havah Sınıflandırıcıların Modellenmesinde Performans Eğrisine Dayalı Farklı Model Yaklaşımlarının Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2007**.
- [13] Dijkink, B.H., Speranza, L., Paltsidis, D., Vereijken, J.M., Air dispersion of starch-protein mixtures: A predictive tool for air classification performance, *Powder Technology*, vol. 172, pp. 113-119, **2007**.
- [14] Coda, R., Melama, L., Rizzello, C.G., Curiel, J.A., Sibakov, J., Holopainen, U., Pulkkinen, M., Sozer, N., Effect of air classification and fermentation by *Lactobacillus plantarum* VTT E-133328 on faba bean (*Vicia faba* L.) flour nutritional properties, *International Journal of Food Microbiology*, vol. 193, pp. 34-42, **2015**.
- [15] Wu, Y.V., Norton, R.A., Enrichment of protein, starch, fat, and sterol ferulates from corn fiber by fine grinding and air classification, *Industrial Crops and Products*, vol. 14, pp. 135-138, **2001**.

- [16] Gómez-Caravaca, A.N., Verardo, V., Candigliota, T., Marconi, E., Segura-Carretero, A., Fernandez-Gutierrez, A., Caboni, M.F., Use of air classification technology as green process to produce functional barley flours naturally enriched of alkylresorcinols,  $\beta$ -glucans and phenolic compounds, *Food Research International*, vol. 73, pp. 88-96, **2015**.
- [17] Galk, J., Peukert, W., Krahn, J., Industrial classification in a new impeller wheel classifier, *Powder Technology*, vol. 105, pp. 186-189, **1999**.
- [18] Midoux, N., Hosek, P., Pailleres, L., Authelin, J.R., Micronization of pharmaceutical substances in a spiral jet mill, *Powder Technology*, vol. 104, pp. 113-120, **1999**.
- [19] Nakach, M., Authelin, J., Chamayou, A., Dodds, J., Comparison of various milling technologies for grinding pharmaceutical powders, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 74S, pp. 173-181, **2004**.
- [20] Kou, X., Chan, L.W., Sun, C.C., Heng, P.W.S., Preparation of slab-shaped lactose carrier particles for dry powder inhalers by air jet milling, *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 12, pp. 59-65, **2017**.
- [21] JDCPhosphate, <http://jdcphosphate.org/phosphates-101/todays-phosphate-industry/> (Mart **2017**).
- [22] Eswaraiah, C., Kavitha T., Vidyasagar, S., Narayanan S.S., Classification of metals and plastics from printed circuit boards (PCB) using air classifier, *Chemical Engineering and Processing*, vol. 47, pp. 565-576, **2008**.
- [23] Cepuritis, R., Jacobsen, S., Onnela T., Sand production with VSI crushing and air classification: Optimising fines grading for concrete production with micro-proportioning, *Minerals Engineering*, vol. 78, pp. 1-14, **2015**.
- [24] Altun, D., Gerold, C., Benzer, H., Altun, O., Aydogan, N., Copper ore grinding in a mobile vertical roller mill pilot plant, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 136, pp. 32-36, **2015**.
- [25] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, <http://www.tcma.org.tr/images/file/WEBKAPASITE2015.xls>. (Mart **2017**).
- [26] Dündar, H., *Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmenlerin Mineral Endüstrisinde Cevher Öğütme Performanslarının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2012**.
- [27] Aydogan, N.A., Ergun, L., Benzer, H., High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry, *Minerals Engineering*, vol. 19, pp. 130-139, **2006**.
- [28] Genç, Ö., *An Investigation On The Effects Of Design And Operational Parameters On Grinding Performance Of Multi-Compartment Ball Mills Used In The Cement Industry*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2008**.
- [29] Richardson, J.F., Harker, J.H., Backhurst, J.R., Chemical Engineering Particle Technology and Separation Processes, vol. 2, **2002**.

- [30] Turgut, A., Elektrostatik Toz Tutucu ve Toz Çöktürücü Filtreler, *Ankara Çimento Eğitim Notları*, **1996**.
- [31] Onuma, E., Furukawa, T., O-Sepa a New High-Performance Air-Classifiers, *World Cement*, vol. 15, No. 1, pp. 13-24, **1984**.
- [32] Wills, B.A., Napier-Munn, T., Mineral Processing Technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral, *Elsevier Science & Technology Books*, vol. Seventh Edition, **2006**.
- [33] Eswaraiah, C., Angadi, S.I., Mishra, B.K., Mechanism of particle separation and analysis of fish-hook phenomenon in a circulating air classifier, *Powder Technology*, vol. 218, pp. 57-63, **2012**.
- [34] Onuma, E., Ito, M., Separators in grinding circuits, *ZKG*, vol. 47 (9), pp. 535-542, **1994**.
- [35] Nageswararao, K., Reduced Efficiency Curves of Industrial Hydrocyclones - An Analysis for Plant Practice, *Minerals Engineering*, vol. 12, No. 5, pp. 517-544, **1999**.
- [36] Anonim, Buell Division of Fisher-Klosterman Inc., *Introduction to Air Classification*, **2004**.
- [37] Kolacz, J., Investigating Flow Conditions in Dynamic Air Classification, *Minerals Engineering*, vol. 15, No. 3, pp. 131-138, **2002**.
- [38] Guizani, R., Mokni, I., Mhiri, H., Bournot P., CFD modeling and analysis of the fish-hook effect on the rotor separator's efficiency, *Powder Technology*, vol. 264, pp. 149-157, **2014**.
- [39] Wang, Q., Melaaen, M.C., Silva, S.R.D., Investigation and simulation of a cross-flow air classifier, *Powder Technology*, vol. 120, pp. 273-280, **2001**.
- [40] Johansson, R., Evertsson, M., CFD simulation of a gravitational air classifier, *Minerals Engineering*, vol. 33, pp. 20-26, **2012**.
- [41] Huang, Q., Liu, J., Yu, Y., Turbo air classifier guide vane improvement and inner flow field numerical simulation, *Powder Technology*, vol. 226, pp. 10-15, **2012**.
- [42] Karunakumari, L., Eswaraiah C., Jayanti, S., Narayanan, S.S., , Experimental and Numerical Study of a Rotating Wheel Air Classifier, *AIChE Journal*, vol. 51, No. 3, pp. 776-790, **2005**.
- [43] Gao, L., Yu, Y., Liu, J., Study on the cut size of a turbo air classifier, *Powder Technology*, vol. 237, pp. 520-528, **2013**.
- [44] Napier-Munn, T.J., Morrell, S., Morrison, R.D., Kojovic, T., Mineral comminution circuits-Their operation and optimization, *JKMRC monograph series in mining and mineral processing*, no. Brisbane, Australia., **1996**.
- [45] Türk Standardı, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 7: Dolgu malzemesi tane yoğunluğunun tayini - Piknometre yöntemi, *TS EN 1097-7*, **2015**.



- [46] Jolicoeur, C., Morasse, S., Sharman, J., Tagnit-Hamou, A., Slim, F., Page, M., Polyol-type compounds as clinker grinding aids: influence on powder fluidity and on cement hydration, *12th International Congress on the Chemistry of Cement*, **2007**.
- [47] Dixon, W. J., Processing Data for Outliers, *Biometrics*, vol. 9 (1), pp. 74-89, **1953**.
- [48] Standard Practice for Dealing With Outlying Observations, *ASTM International*, vol. E 178-02, **2005**.
- [49] Toprak, N.A., Altun, O., Aydoğan, N., Benzer, H., The influences and selection of grinding chemicals in cement grinding circuits, *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 199-205, **2014**.
- [50] Grimes, A., Keenan, C., JKSimMet V6 Manual, *JKTech Pty Ltd*, pp. 244-247, **2014**.
- [51] Günlü, A., *Mathematical modelling of air separators used in cement grinding circuits*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2006**.
- [52] Benzer, H., Ergun, L., Lynch, A.J., Oner, M., Gunlu, A., Celik, I.B., Aydogan, N., Modelling cement grinding circuits, *Minerals Engineering*, vol. 14 (11), pp. 1469-1482, **2001**.
- [53] Yu, Y., Liu, J., Zhang, K., Establishment of a prediction model for the cut size of turbo air classifiers, *Powder Technology*, vol. 254, pp. 274-280, **2014**.
- [54] Yardi, J., Separator technology, *World Cement*, vol. 36 (10), pp. 87-104, **2005**.
- [55] Eswaraiah, C., Angadi, S.I., Mishra, B.K., Mechanism of particle separation and analysis of fish-hook phenomenon in a circulating air classifier., *Powder Technology*, vol. 218, pp. 57-63, **2012**.
- [56] Refstrup, E., Recent Advances in Agglomeration During Spray Drying, *Niro A/S, Copenhagen, Denmark*, **1992**.
- [57] Klumpar, I.V., Currier, F.N., Ring, T.A., Air Classifiers, *Chemical Engineering*, vol. 93 (5), pp. 77-92, **1986**.
- [58] Duda, W., International Process Engineering in the cement industry, *Cement Data Book*, **1985**.
- [59] Guizani, R., Mokni, I., Mhiri, H., Bournot, P., CFD modelling and analysis of the fish-hook effect on the rotor separator's efficiency, *Powder Technology*, vol. 264, pp. 149-157, **2014**.



























# ÖZGEÇMİŞ

## Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Özgün Darılmaz

Doğum Yeri: Ceyhan

Medeni Hali: Bekar

E-Posta: ozgundarilmaz@gmail.com

Adres: Kırkkonaklar Mah. 313. Sok. 8/10 Çankaya/Ankara

## Eğitim

Lise: İncesu Anadolu Lisesi (2003-2007)

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği (2007-2013)

## Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce: Okuma (İleri), Yazma (İleri), Konuşma (İleri)

## İş Deneyimi

Anagold Madencilik (10.2017 - ...)

Çayeli Bakır İşletmeleri (07.2015 – 10.2017)

## Deneyim Alanları

Bakır - Çinko Flotasyonu, Öğütme, Cevher Karakterizasyonu, Cevher Hazırlama Tesisi Performans Değerlendirmesi ve Optimizasyonu, Matematiksel Modelleme

## Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

## Tezden Üretilmiş Yayınlar

Altun, O., Toprak, A., Benzer, H., Darılmaz, Ö., Multi component modelling of an air classifier, *Minerals Engineering*, vol. 93, pp. 50-56, **2016**.

## Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumuna Katıldığı Toplantılar

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 13/10/2017

Tez Başlığı: Çoklu Bileşenli Havalı Sınıflandırıcı Modelinin Geliştirilmesinde Malzemelerin Yoğunluk ve Akışkanlık Özelliklerinin İncelenmesi

Yukarıda başlığı gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 73 sayfalık kısmına ilişkin, 13/10/2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/~~dahil~~
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.


Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Özgün Darılmaz  
Öğrenci No: N13121111  
Anabilim Dalı: Maden Mühendisliği  
Programı: Maden Mühendisliği  
Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

  
13/10/2017

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

  
Yrd. Doç. Dr. Okay Altun