

**YERÇEKİMİ İLE ZENGİNLEŞTİRME EKİPMANLARINDA
TANE BOYUNUN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PARTICLE SIZE IN
GRAVITY CONCENTRATION EQUIPMENT**

DAMLA İZERDEM

PROF. DR. Ő. LEVENT ERGÜN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
DOKTORA TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

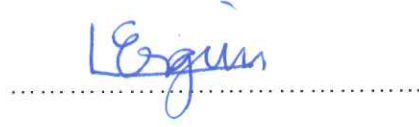
2018

DAMLA İZERDEM'in hazırladığı “**Yerçekimi ile Zenginleştirme Ekipmanlarında Tane Boyunun Etkisi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. M. Ümit ATALAY
Başkan



Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN
Danışman



Prof. Dr. Özcan Y. GÜLSOY
Üye



Prof. Dr. N. Emre ALTUN
Üye



Doç. Dr. İlkay B. CAN
Üye



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

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

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

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

beyan ederim.

25/12/2018

DAMLA İZERDEM

YAYIMLAMA 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 Üniversitesi'ne 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 kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / HÜ. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren ... ay ertelenmiştir.
- ☐ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

25/12/2018


DAMLA İZERDEM

ÖZET

YERÇEKİMİ İLE ZENGİNLEŞTİRME EKİPMANLARINDA TANE BOYUNUN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Damla İZERDEM

Doktora, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN

Aralık 2018, 181 sayfa

Bu tez çalışmasında, yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarının tane boyuna bağlı ayırım performanslarının belirlenmesinin yanı sıra, iri ve ince tanelerinin ayırım mekanizmalarının ortaya konması amaçlanmıştır.

Deneyisel çalışmalarda, kuvars-manyetit yapay karışımları kullanılarak spiral zenginleştirici, sallantılı masa, Falcon zenginleştirici ve MGS (Multi-Gravity Separator) ile testler yapılmıştır. Ayrıca krom zenginleştirme tesisinde, spiralle zenginleştirme devresinde yapılan örnekleme çalışmaları ile elde edilen veriler de kullanılmıştır.

Zenginleştirme deneylerinde; besleme, atık ve konsantreden alınan örnekler elenmiş, boyut fraksiyonlarına kimyasal analiz yapılmış ve tane boyu bazında verim, ayırım performansı (separation efficiency), tenör ve tenör yükseltgeme oranları belirlenmiştir.

Çalışmalar sonucunda, tane boyuna bağlı ayırım performansı değerlerinin her koşulda tane boyu arttıkça belli bir tane boyuna kadar arttığı, en yüksek ayırım

performansına ulaştığı noktadan sonra ise tane boyu irileştikçe ayırım performansının dűřtűđű belirlenmiştir. Tane boyu bazında ortalama ayırım performansları değerlendirildiğinde; sallantılı masalarda %95'e ulaşılırken, spiral zenginleştiricilerle yapılan çalışmalarda %78 ve Falcon zenginleştiricisinde yapılan çalışmalarda %48 ayırım performansı değerleri elde edilmiştir. -150+38  m fraksiyonu ile yapılan MGS testlerinde ise dűřűk değerler elde edilmiştir. Tane boyu ayırım performansı ilişkisi ikinci dereceden bir polinomla açıklanabilmektedir.

Tane boyuyla ayırım performansının arttıđı bűlgede, tanelerin űkelme hızlarıyla dođrusal bir iliřki gűzlenirken, daha iri boyda űkelme hızı artmasına karřın performanssa gűrűlen dűřűřűn, tanenin yođunluđu ile dođru orantılı olup tanenin çapının karesiyle artan Bagnold dađıtıcı kuvvetlerinin etkisiyle açıklanabileceđi dűřűnűlmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yerçekimi ile zenginleştirme, spiral zenginleştirici, sallantılı masa, Falcon, MGS, gravite

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PARTICLE SIZE IN GRAVITY CONCENTRATION EQUIPMENT

Damla İZERDEM

Doctor of Philosophy, Department of Mining Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN

December 2018, 181 pages

In this thesis, it was aimed to determine the separation efficiencies of gravity concentration equipment and to reveal the concentration behavior of particles by investigating the separation mechanisms of coarse and fine sizes.

With this purpose, shaking tables, spiral concentrators, Falcon concentrator and MGS (Multi-gravity separator) were tested by using artificial feed, consisted of magnetite and quartz mixture. Sampling data, obtained from a chromite concentration plant using spiral concentrators, was also used in the results.

In the experimental studies, samples taken from feed, concentrate and tailings were sieved, grades of the size fractions were analyzed and recoveries, separation efficiencies, grades and grade ratios were evaluated on size basis.

As a result of the studies, it was observed that, in every condition, the separation efficiencies, due to particle sizes, increased as the particle size increased up to a certain point. After the maximum separation efficiency was obtained, the separation efficiency decreased as the particle size increased. In the evaluation of the average

size-by-size separation efficiencies, maximum values were obtained as 95% in shaking tables, 78% in spiral concentrators and 48% in Falcon concentrator. Low concentration results was obtained in MGS tests with -150+38 μm feed material. Relations between the particle sizes and the separation efficiencies can be explained by quadratic polynomials.

In the region where the separation efficiencies increased due to the particle sizes, linear relations were observed between the settling rates of the particles and their separation efficiencies. Decreases in the separation efficiencies of the coarse particles, though, could be explained by Bagnold forces, which are directly proportional to the specific gravities of the particles and increase with the square of the particles' diameter.

Keywords: Gravity concentration, spiral concentrator, shaking table, Falcon, MGS

TEŞEKKÜR

Bölüm imkanlarından yararlanmamı sağlayan Maden Mühendisliği Bölüm Başkanı Sn. Prof. Dr. Zafir EKMEKÇİ'ye,

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

Deneysel çalışmalarım sırasında emeği geçen Dr. Özgür ÖZCAN, Ahmet Yaşar YAMANTAŞ ve Orberk Mert MERCAN ile bu süreçteki teknik desteklerinden ötürü İlhan EHSANİ, S. Yasin KILLIOĞLU ve Dr. M. Suphi ÜNAL ile manevi desteğinden ötürü Dr. Ayşe ÜÇYILDIZ'a,

RWTH Aachen Üniversitesi'nde yaptığım laboratuvar çalışmalarına olanak sağlayan başta Dr. Lars WEITKÄMPER olmak üzere tüm AMR (Aufbereitung Mineralischer Rohstoffe) çalışanları ve öğrencilerine,

Tez yazım süresince destek ve anlayışını esirgemeyen, her zaman yanımda olup yüzümü güldüren canım eşim Mehmet İZERDEM'e,

Her koşulda maddi-manevi yanımda olan, destekleyen ve yüreklendiren canım annem Emel GÜÇBİLMEZ'e; aldığım kararları yol gösterici fikirleriyle sorgulamamı sağlayan babam Ahmet GÜÇBİLMEZ'e; attığım her adımda beni koşulsuz destekleyip cesaretlendiren, sevgili aile büyüklerim babaannem Sakibe GÜÇBİLMEZ ve dedem Zihni ÖLMEZ ile sözleri her zaman yüreğimde olan rahmetli anneannem İlve ÖLMEZ'e; eğitim hayatım boyunca beni her daim destekleyen amcam Mehmet GÜÇBİLMEZ'e ve dayım Ali ÖLMEZ'e,

Yardım ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim dostlarıma, teşekkür ederim.

Damla İZERDEM

Aralık 2018, Ankara

Bu çalışma Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. (Proje No: FDK-2018-17257)

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER	viii
ŞEKİLLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. TANELERİN ÇÖKELME PRENSİBİ	4
2.1. Serbest Çökeltme	4
2.2. Engelli Çökeltme	6
3. İNCE FİLM VE AKAN SIVI FİMLERİYLE ZENGİNLEŞTİRME	8
3.1. İnce Film ile Zenginleştirme Teorisi	8
3.2. Akan Sıvı Filmleri ile Zenginleştirme Teorisi	9
4. SEDİMAN TAŞINIMI	11
5. YERÇEKİMİYLE ZENGİNLEŞTİRME EKİPMANLARI VE MODELLEME PRENSİPLERİ	19
5.1. Yerçekimi ile Ayrım Ekipmanları	19
5.1.1. Yerçekimi ile Ayrım Ekipmanlarının Modellenmesi	22
5.2. Spiral Zenginleştiriciler	25
5.2.1. Spiral zenginleştiriciler ile yapılan uygulamalar	28
5.3. Sallantılı Masa	34
5.3.1. Sallantılı masalar ile yapılan uygulamalar	36
5.4. MGS (Yüksek Yerçekimli Ayırıcılar)	41
5.4.1. MGS ile yapılan uygulamalar	43
5.5. Falcon / Knelson Zenginleştiricileri	46
5.5.1. Falcon / Knelson zenginleştiricileri ile yapılan uygulamalar	46
6. DOĞRUSAL DEVRE ANALİZİ	50
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	54
7.1. Numune Özellikleri	54

7.1.1. Numune-I	55
7.1.2. Numune-II	56
7.1.3. Numune-III	58
7.2. Sallantılı Masalarla Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	62
7.2.1. Masa_A deneyleri	62
7.2.2. Masa_B deneyleri	69
7.3. Spiral Zenginleştiricilerle Yapılan Deneysel Çalışmalar	74
7.3.1. Spiral_A deneyleri.....	74
7.3.2. Spiral_B deneyleri.....	78
7.3.3. Spiral_C deneyleri	86
7.4. Falcon Zenginleştiricisiyle Yapılan Deneysel Çalışmalar	91
7.5. MGS (Yüksek Yerçekimli Ayırıcı) ile Yapılan Deneysel Çalışmalar	97
8. AYRIM PERFORMANS KRİTERLERİ İLE TANE BOYU İLİŞKİSİNİN MATEMATİKSEL DEĞERLENDİRMESİ	103
8.1. Sallantılı Masa	103
8.2. Spiral Zenginleştirici	104
8.3. Falcon Zenginleştiricisi.....	105
9. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	106
10. SONUÇ VE ÖNERİLER	129
KAYNAKLAR.....	130
EKLER	137
TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU.....	182
ÖZGEÇMİŞ	183

ÇİZELGELER

Çizelge 7.1. Kuvars numunesine ait kimyasal analiz bilgileri	57
Çizelge 7.2. Sallantılı masa (Masa_A) deneylerine ait koşullar	63
Çizelge 7.3. Sallantılı masa (Masa_A) deneylerine ait sonuçlar	64
Çizelge 7.4. Sallantılı masanın (Masa_B) besleme koşullarına ait veriler	70
Çizelge 7.5. Sallantılı masa (Masa_B) deneyine ait sonuçlar	70
Çizelge 7.6. Spiral zenginleştiriciye (Spiral_A) ait fiziksel özellikler	75
Çizelge 7.7. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yapılan deneylere ait sonuçlar...	75
Çizelge 7.8. Tesiste yer alan spiral zenginleştiricilere ait özellikler	79
Çizelge 7.9. Farklı günlerde yapılan spiral çalışmalarında elde edilen veriler	81
Çizelge 7.10.SP1 ve SP4 spirallerinin tek sarmalındaki akışlarda yapılan ölçümler	86
Çizelge 7.11.Tesis ürünleri fraksiyonel kromit değerleri	87
Çizelge 7.12.Falcon zenginleştiricisi deneyine ait sonuçlar	92
Çizelge 7.13.MGS deneylerine ait parametreler	98
Çizelge 7.14.MGS ile yapılan deneylere ait sonuçlar	99
Çizelge 9.1. Deneylerde kullanılan ekipman ve besleme numunesine ait özellikler	106
Çizelge 9.2. Çeşitli ekipmanlardan hesaplanan verim eşitlikleri	107
Çizelge 9.3. Spiral_D ve Spiral_E deneylerde kullanılan ekipman ve besleme numunelerine ait özellikler	117

ŞEKİLLER

Şekil 4.1.	Suyun içerisinde sediman taşınım mekanizmaları [15].....	11
Şekil 4.2.	Kararlı haldeki aşağı yönlü laminar akışta hız ve makaslama geriliminin şematik gösterimi [10]	13
Şekil 4.3.	Laminar ve türbülanslı akışlarda hız dağılımının gösterimi [10].....	14
Şekil 4.4.	Sedimanların tane boyuna bağlı taşınma sıklığı ve taşınma şekilleri [10]	15
Şekil 4.5.	Leeder'ın çalışmasına göre tanenin taşınma modları [21].....	17
Şekil 5.1.	Çeşitli yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarında verim-tenör ilişkisi [32]	21
Şekil 5.2.	MGS, Holman masası ve Falcon zenginleştiricisinde tane boyuna bağlı verim değerlendirme [32]	21
Şekil 5.3.	Spiral profilindeki ayırım bölgeleri [50].....	26
Şekil 5.4.	Spiral zenginleştiricilerin oluklarındaki birincil ve ikincil akış modelleri [33]	27
Şekil 5.5.	Tane boyu ve yoğunluğunun performans eğrisi üzerine etkisi (a [55] , b [64])	31
Şekil 5.6.	Kaba zenginleştirme, temizleme ve yeniden temizleme spirallerinde Fe, SiO ₂ ve Al ₂ O ₃ içeren minerallerin tane boyuna bağlı performans eğrileri [55]	31
Şekil 5.7.	İki farklı spiral zenginleştirici tasarımında yapılan deneyler (solda LD9 spirali, sağda FGL spirali) [16].....	33
Şekil 5.8.	Farklı tasarımdaki sallantılı masalarda tanelerin yoğunluk ve tane boyuna bağlı dağılımları [59]	35
Şekil 5.9.	Sallantılı masada ferrosilikon (solda) ve kuvars (sağda) minerallerinin tane boyuna bağlı yataktaki değişimi [34].....	36

Şekil 5.10.	Yıkama suyu (a), besleme hızı (b) ve masanın genliğinin (c) sallantılı masadaki ayırma etkisi [69].....	40
Şekil 5.11.	Yıkama suyu (solda) ve besleme tenörünün (sağda) konsantre bandının konumuna etkisi [34]	40
Şekil 5.12.	Besleme hızı (solda) ve masanın eğiminin (sağda) konsantre bandının konumuna etkisi [34]	41
Şekil 5.13.	MGS'nin işletim ve tasarım değişkenleriyle taneye etki eden temel kuvvetler [75].....	42
Şekil 5.14.	Suni beslemenin çeşitli tane boylarında MGS'deki performansı [76]43	
Şekil 5.15.	MGS'deki işletim değişkenlerinin, düzeltilmiş R^2 ölçümüne göre bağlı değişimleri [75]	45
Şekil 6.1.	Yoğunlukla ayırım yapan ekipmanların genel olasılık dağılım fonksiyonu [89]	51
Şekil 7.1.	Kuars, manyetit ve besleme numunesine ait tane boyu dağılımları55	
Şekil 7.2.	Kuars, manyetit ve besleme numunesine ait tane boyu dağılımları56	
Şekil 7.3.	Stereo mikroskopta farklı fraksiyonlardaki manyetit görüntüsü	58
Şekil 7.4.	Spiral zenginleştiricilerin (Spiral_B) beslemesine ait tane boyu dağılımı	59
Şekil 7.5.	Besleme numunesine ait XRD deseni	59
Şekil 7.6.	Besleme numunesinin fraksiyonel serbestleşme derecesi	60
Şekil 7.7.	Farklı fraksiyonlardaki besleme numunesine ait stereo mikroskop görüntüleri	61
Şekil 7.8.	Farklı fraksiyonlardaki besleme numunesine ait optik mikroskop görüntüleri	61
Şekil 7.9.	Wilfley 87100 sallantılı masası	62
Şekil 7.10.	Sallantılı masa (Masa_A) ürünlerinin tane boyuna bağlı verim değerleri	65
Şekil 7.11.	32 μm 'dan ince boydaki detaylı atık verimi.....	65

Şekil 7.12.	Sallantılı masa (Masa_A) konsantrelerinin tane boyuna bağlı manyetit içerikleri (solda) ve ağırlık dağılımları (sağda).....	66
Şekil 7.13.	Sallantılı masa (Masa_A) konsantrelerinin tane boyuna bağlı verim kıyaslamaları	67
Şekil 7.14.	Sallantılı masa (Masa_A) konsantrelerine ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrelerin tane boyuna bağlı TYO ilişkileri (sağda)	68
Şekil 7.15.	Sallantılı masa (Masa_A) konsantrelerine ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi	68
Şekil 7.16.	Sallantılı masa (Masa_B) deneyine ait laboratuvar çalışması	69
Şekil 7.17.	Sallantılı masa (Masa_B) konsantrelerinin tane boyuna bağlı manyetit içerikleri (solda) ve ağırlık dağılımları (sağda).....	71
Şekil 7.18.	Sallantılı masa (Masa_B) konsantrelerinin tane boyuna bağlı verim kıyaslamaları	72
Şekil 7.19.	Sallantılı masa (Masa_B) konsantrelerine ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrelerin tane boyuna bağlı TYO ilişkileri (sağda)	72
Şekil 7.20.	Sallantılı masa (Masa_B) konsantrelerine ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi	73
Şekil 7.21.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yapılan deneysel çalışmalara ait görüntüler	74
Şekil 7.22.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) konsantrelerinin tane boyuna bağlı manyetit içerikleri (solda) ve ağırlık dağılımları (sağda)	76
Şekil 7.23.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) konsantrelerinin tane boyuna bağlı verim kıyaslamaları	77
Şekil 7.24.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) konsantrelerine ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrelerin tane boyuna bağlı TYO ilişkileri (sağda)	77
Şekil 7.25.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) konsantrelerine ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi.....	78
Şekil 7.26.	Kaba zenginleştirme ve süpürme spirallerine ait tesis görüntüsü (solda), 3'lü başlangıca sahip Multotec spirali (sağda).....	79

Şekil 7.27.	Spiral devresine ait akım şeması	80
Şekil 7.28.	Nihai spiral konsantrelerinin (Spiral_B) tane boyuna bağlı kromit içerikleri (solda) ve ağırlık dağılımları (sağda).....	82
Şekil 7.29.	Nihai spiral konsantrelerinin (Spiral_B) tane boyuna bağlı verim kıyaslamaları	82
Şekil 7.30.	Nihai spiral konsantrelerine (Spiral_B) ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrelerin tane boyuna bağlı TYO ilişkileri (sağda)	83
Şekil 7.31.	Nihai spiral konsantrelerine (Spiral_B) ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi	83
Şekil 7.32.	Spiral zenginleştiricide (Spiral_B) akış sırasında konsantre bandı genişliği ve yatak yüksekliğinin gösterimi	84
Şekil 7.33.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ürünlerinin yatak yüksekliği (B) ile konsantre bandı genişlik değerleri (A).....	85
Şekil 7.34.	Hidrosiklon etrafındaki akışlara ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımları	87
Şekil 7.35.	Tesiste yapılan çalışmaya ait akım şeması	88
Şekil 7.36.	Spiral konsantresinin (Spiral_C) tane boyuna bağlı kromit içeriği (solda) ve ağırlık dağılımı (sağda).....	89
Şekil 7.37.	Spiral konsantresinin (Spiral_C) tane boyuna bağlı verim dağılımı .	89
Şekil 7.38.	Spiral konsantresine (Spiral_C) ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrenin tane boyuna bağlı TYO dağılımı (sağda)	90
Şekil 7.39.	Spiral konsantresine (Spiral_C) ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi.....	90
Şekil 7.40.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan deneye ait akım şeması.....	91
Şekil 7.41.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan çalışmalara ait resimler.....	92
Şekil 7.42.	Falcon zenginleştiricisi ürünlerinin tane boyuna bağlı verim değerleri	94
Şekil 7.43.	Falcon zenginleştiricisi konsantrelerinin tane boyuna bağlı manyetit içerikleri (solda) ve ağırlık dağılımları (sağda).....	94

Şekil 7.44.	Falcon zenginleştiricisi konsantrelerinin tane boyuna bağlı verim kıyaslamaları	95
Şekil 7.45.	Falcon zenginleştiricisi konsantrelerine ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrelerin tane boyuna bağlı TYO ilişkileri (sağda)	95
Şekil 7.46.	Falcon zenginleştiricisi konsantrelerine ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi	96
Şekil 7.47.	Falcon zenginleştiricisinde fraksiyonel verim dağılımları	96
Şekil 7.48.	MGS ekipmanı ile yapılan deneysel çalışmalara ait görüntüler	97
Şekil 7.49.	MGS ile yapılan deneylerde konsantrelere ait sonuçlar	99
Şekil 7.50.	MGS ekipmanı konsantrelerinin tane boyuna bağlı manyetit içerikleri (solda) ve ağırlık dağılımları (sağda).....	100
Şekil 7.51.	MGS ekipmanı konsantrelerinin tane boyuna bağlı verim kıyaslamaları	100
Şekil 7.52.	MGS ekipmanı konsantrelerine ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrelerin tane boyuna bağlı TYO ilişkileri (sağda)	101
Şekil 7.53.	MGS ekipmanı konsantrelerine ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi.....	102
Şekil 8.1.	Masa_A (solda) ve Masa_B (sağda) denklemlerini gösteren eğriler	104
Şekil 8.2.	Spiral_A (solda) ve Spiral_B (sağda) denklemlerini gösteren eğriler	105
Şekil 8.3.	Falcon zenginleştiricisi denklemini gösteren eğri	105
Şekil 9.1.	Tüm deneylerin konsantrelerinde tane boyuna karşılık gelen ortalama TYO değerleri.....	108
Şekil 9.2.	Zenginleştirme ekipmanlarında farklı koşullarda elde edilen tane boyuna bağlı ayırım performansı değerleri.....	109
Şekil 9.3.	Deneysel çalışmalarda elde edilen tane boyuna bağlı verim (solda) ve ayırım performansı (sağda) grafikleri.....	110

Şekil 9.4.	Falcon zenginleştiricisi çalışmalarında tane boyuna bağlı verim değişimi [99] · [100]	111
Şekil 9.5.	Knelson zenginleştiricisinde verimin besleme tane boyuyla ilişkisini gösteren çalışmalar [101] , [102]	111
Şekil 9.6.	Falcon zenginleştiricisinde verimin besleme tane boyuyla ilişkisi ..	112
Şekil 9.7.	-40+20 µm ve -20 µm tane boylarındaki suni karışımın sallantılı masa ve MGS'deki performansları [76]	113
Şekil 9.8.	Spiral zenginleştiricilerde iri tanelerdeki verim düşüşlerinin gösterimi (a [111] , b [109] , c [108] , d [1])	116
Şekil 9.9.	Spiral zenginleştiricilerin verim sonuçlarının kıyaslaması [110]	117
Şekil 9.10.	Tanelerin boylarına bağlı suda askıda kalma, taşınma ya da yatak oluşturma koşullarının ortalama akım hızıyla gösterimi [15]	119
Şekil 9.11.	50 µm'luk tanenin konsantrasyon kriteri ile ilişkili zamana bağlı çökelme hızları [70]	120
Şekil 9.12.	Spiral zenginleştirici deneyleri ayırım performansı-çökelme hızı kıyaslaması	122
Şekil 9.13.	Akışkan taşınımı sırasında taneler arası etkileşim [13] , [16]	126

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

° Derece

Kısaltmalar

Al Alüminyum

ANOVA Varyans Analizi (analysis of variance)

CCD merkezi kompozit tasarımı (central composite design)

CCRD döndürülebilir merkezi kompozit tasarımı (central composite rotatable design)

cm Santimetre

Cr Krom

Cr₂O₃ Kromit

dk Dakika

E Ayrım performansı

Fe Demir

Fe₃O₄ Manyetit

G g-kuvveti (Bir kütleye etki eden hızlanma)

Hz Hertz

lt Litre

m Metre

m² Metrekare

m³ Metreküp

Mg Magnezyum

mm Milimetre

N Newton

µm Mikrometre

O	Oksijen
R	Verim
rpm	Dakikadaki dönme hızı (revolutions per minute)
RSM	Yüzey tepki yöntemi (response surface method)
sa	Saat
Si	Silisyum
SiO ₂	Kuvars
sn	Saniye
T	Tenör
W	Ağırlık

1. GİRİŞ

Yerçekimi ile zenginleştirme yöntemi, minerallerin özgül ağırlık farklılıklarından yararlanılarak yapılan tarihin en eski zenginleştirme yöntemlerindendir [1]. Yerçekimi ile ayırma ekipmanları, sundukları işletim kolaylığı, ilk yatırım maliyetlerinin düşük olması, sürecin ekonomik olması ve çevresel duyarlılıklar sebebiyle yaygın olarak tercih edilmektedirler.

Çok farklı özelliklerde cevherler yerçekimi ile zenginleştirilmektedir. Hematit cevherleri ve kömür en büyük tonajların işlendiği iki örnektir. Sahil kumlarından rutil, ilmenit zirkon ve monazitin kazanımından, çok çeşitli devre tasarımıyla altın içeren cevherlerin zenginleştirilmesine ve endüstriyel minerallerin zenginleştirilmesi/temizlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. [2]

Yaklaşık olarak 1 mm'den iri boylardaki cevherlerde ağır ortam zenginleştiricileri ve jigler kullanılırken, daha ince tane boylarında akan sıvı filmi prensibine göre ayırım yapan yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarından olan daralan oluklar, zenginleştirme konileri, spiral zenginleştiriciler ve sallantılı masalar kullanılmaktadır. Merkezkaç kuvveti kullanarak ayırım yapan Falcon, zenginleştiricisi, Knelson zenginleştiricisi, Kelsey jigi ve MGS (Multi-gravity separator) gibi yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanları ise ince tanelerin zenginleştirilmesi uygulamalarında etkili olarak kullanılmaktadırlar. Özellikle son senelerde oldukça rağbet gören bu ekipmanlar, yaklaşık 20 μ m inceliğe kadar yüksek yoğunluklu tanelerin zenginleştirilmesi amacıyla kullanılmaktadırlar. [3]

Yaygın uygulamalara karşın yerçekimiyle zenginleştirmeye yapılan çalışmalar, diğer yöntemlere oranda daha az sayıdadır. Ayırımın karmaşık fiziksel yapısı nedeniyle, çalışmaların çoğu uygulamaları içermektedir. Akan sıvı filmiyle ayırım yapan ekipmanlarda hareket eden tanelerin üzerine yerçekimi ivmesi, merkezkaç kuvveti, suyun kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti gibi birçok kuvvet etki etmektedir. Akan sıvı filmleriyle ayırım yapan ekipmanlardaki geçerli olan en yaygın

matematiksel modellemeyi Gaudin'in ilk çalışmaları oluşturmaktadır (Gaudin, 1939). Bunun dışında konuyla ilgili bilinen en yaygın modelleme çalışmaları Mayer (1964) ve Subasinghe (1983)'ye aittir. Hunt'ın sediman taşınım modeli ve Richardson ve Zaki, Brauer ve Thiele çökeltme modelleri kullanılarak tane boyu ve yoğunluğa bağlı ayırımın matematiksel modellemesi yapılmış, bu sayede ayırımın tahmin edilebilmesi sağlanmıştır. [4]

Yerçekimiyle ayırım ekipmanlarında matematiksel modeller geliştirilirken, taneler üzerine etkiyen kuvvetlerle birlikte tane boyu, yoğunluğu ve şekli de değerlendirilmektedir. Akan sıvı filmlerindeki ayırımın, yeryüzü kanalları, nehirler ve akarsulardaki sediman taşınımıyla ilişkilendirerek modellerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. [5]

Yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarındaki uygulanabilir tane boyları bilinmesine rağmen, tane boyu ile zenginleşme performansı arasındaki ilişki literatürde yeterince incelenmemiş ve sonuçları ortaya konamamıştır. Türkiye'de ve dünyada yüksek tenörlü, iri tane boyunda serbestleşen, kolay işlenebilir metal oksit cevherleri giderek tükendiğinden, önceleri iri tane boyunda yapılabilen zenginleştirme işlemleri, daha da ince tane boylarına gidilerek zenginleştirme yapılmasını gerekli kılmıştır. Bu sebeple, bu cevherleri zenginleştirmek için sıklıkla tercih edilen yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarından olan sallantılı masalar ve spiral zenginleştiricilerde ince taneleri kazanma oranlarının belirlenmesi uygulama açısından kritik olmaktadır.

Tesislerde aşırı öğünme sebebiyle çok incelen malzemelerin ayırım performansının ekipman bazında biliniyor olmasının ise, bir kılavuz niteliğinde olacağı düşünülmüştür. Bu şekilde çok ince taneler atığa ya da ara ürüne gönderilmek yerine, tercih edilecek uygun ekipmanlarla zenginleştirilerek ekonomik değerinin artırılması sağlanmış olacaktır. Elde edilecek bilgilerin cevher zenginleştirme tesislerine ekonomik olarak katkı sağlamasının yanı sıra, literatürde bahsi geçen ekipmanların çalışma tane boyu aralığı ile ilgili bilgi eksikliğini de dolduracak nitelikte olması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, metal oksitleri zenginleştirmek için yaygın olarak kullanılan yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarından sallantılı masa ve spiral zenginleştiricilerle farklı besleme türleri, farklı ekipman tasarımları ve farklı işletim parametrelerinde çeşitli laboratuvar ve tesis çalışmaları yapılmıştır. İnce tanelerin zenginleştirilmesi maksadıyla yüksek yerçekimi uygulayan ekipmanlardan MGS (Yüksek yerçekimli ayırıcı) ve Falcon zenginleştiricisi ile de laboratuvar ölçekli testler gerçekleştirilmiştir. Besleme numunesi olarak farklı yoğunluktaki numuneler (manyetit ve kromit) kullanılarak, elde edilen konsantrelerin ayırım performansları tane boyu bazında tespit edilmiştir. Serbest tanelerin ayırım davranımlarını yansıtmaları amacıyla manyetit konsantresi-kuars karışımından oluşan suni beslemelerle testler yapılmış, tesis ölçekli yapılan çalışmalarda ise kromit cevherinden yararlanılmıştır. Özellikle spiral zenginleştiricilerde gerçekleşen ayırım sırasında taneler üzerine etkiyen Bagnold kuvvetinin ayırma olan etkisinin üzerinde durulmuştur. Deneyler sonucunda, değişen deney koşullarının ayırım performansına etkileri ile ekipmanlardaki tane boyuna bağlı verim-tenör dağılımları ortaya konmuştur. İri ve ince tanelerde yaşanan ayırım performansı düşüşlerinin tanelerin çökelme hızlarından kaynaklandığı ne sürülmüştür ve bu mekanizma, sediman taşınımıyla açıklanmıştır.

2. TANELERİN ÇÖKELME PRENSİBİ

Katı bir tane yerçekimi kuvveti etkisi ile akışkan içerisinde ilerlerken, tanenin hareketine karşı koyan bir direnç ortaya çıkar. Bu dirence *sürüklenme kuvveti* (F_D) adı verilir [6], [7]. Taneye etkiyen yerçekimi kuvveti ile akışkanın direnç kuvvetlerinin dengeye ulaştığı andaki hıza ise tanenin *terminal hızı* (v_T) denir. Düşük terminal hızlarda hareket düzenlidir. Çünkü tanenin temas ettiği akışkan faz taneyle birlikte hareket ederken, biraz dışındaki akışkan faz sabit kalır. Bu iki faz arasında yoğun bir makaslama etkisi meydana gelir [6].

Makaslama kuvvetleri sebebiyle ya da viskozite sebebiyle harekete karşı oluşan direnç *viskoz direnci*dir. Tane hızı arttıkça viskoz direnci de artar. Yüksek hızlarda ise, tanenin etki ettiği yüzeydeki akışkan fazın da hareket etmesiyle birlikte *türbülans direnci* oluşur. Viskoz ya da türbülans direncin hangisi etkili olursa olsun, akış içindeki tanenin hızı düşer ve terminal hıza ulaşır [6].

2.1. Serbest Çökme

Serbest çökme, bir akışkan içerisindeki tanenin, sistem içerisindeki diğer tanelerin oluşturduğu kalabalıktan bağımsız olarak batması olayıdır [6].

Tanelerin serbest çökme halinde bulunması için, içinde bulunduğu karışımın katı içeriğinin %15'ten az olması gerekmektedir [8]. Küresel bir taneye akışkan içerisinde etkiyen kuvvetler Denklem 1'deki gibidir:

$$(m_s \times g) - (m_f \times g) - F_D = m_s \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

m_s : katının kütlesi (kg)

m_f : yer değiştiren akışkanın kütlesi (kg)

F_D : sürüklenme kuvveti (N)

g : yerçekimi ivmesi (m/sn^2)

$dx/dt = 0$ olduğunda tane terminal hıza ulaşmış demektir. Buna göre sürüklenme kuvveti Denklem 2'deki gibidir:

$$F_D = (m_s - m_f) \times g \quad (2)$$

Stokes küresel bir taneye etkiyen sürüklenme kuvvetinin tamamen viskoz direncine bağlı olduğunu öne sürmüştür [9]. Denklem 3, Denklem 4 ve Denklem 5'te verilen eşitlikler Stokes yasasına bağlı sürüklenme kuvvetiyle terminal hız hesabını göstermektedir:

$$F_D = 3\pi d\eta v_T \quad (3)$$

$$v_T = \frac{gd^2(\rho_s - \rho_f)}{18\eta} \quad (4)$$

$$v_T = k_1 d^2 (\rho_s - \rho_f) \quad (5)$$

η : akışkanın viskozitesi (Nsn/m^2)

v_T : terminal hız (m/sn)

d : tanenin çapı (m)

ρ_s : katının yoğunluğu (kg/m^3)

ρ_f : akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)

k_1, k_2 : sabit

Küresel bir tanenin izole bir ortamda çökerken terminal hıza ulaştığı andaki Reynold sayısı (Re) Denklem 6'daki gibi hesaplanmaktadır:

$$Re = \frac{v_T d \rho_f}{\eta} \quad (6)$$

Stokes yasası yalnızca laminar akış koşullarında geçerlidir. Tanenin çapı 50 μm 'dan küçükse ve Reynold sayısı 500'den azsa açık kanallarda laminar akış koşulu sağlanmaktadır. Reynold sayısı 2000'den büyükse türbülanslı akış, 500 ile 2000 arasında ise geçiş zonu görülmektedir [6], [10].

2.2. Engelli Çökelme

Palpın katı içeriği arttıkça, içerisinde bulunan tanelerin oluşturduğu kalabalık sebebiyle tanenin batma hızı yavaşlamaktadır. Palpın içerisindeki tanelerin oluşturduğu yüksek viskozite ve yoğunluk sebebiyle sistem, ağır sıvı gibi davranmaya başlamaktadır.

Newton, küresel bir taneye etkiyen sürüklenme kuvvetinin, tamamen türbülans direncine bağlı olduğunu ileri sürmüştür. Denklem 7, Denklem 8 ve Denklem 9 Newton yasalarına bağlı engelli çökelme eşitliklerini göstermektedir. Newton yasası yalnızca türbülanslı akış koşullarının olduğu durumda geçerlidir [6].

$$F_D = 0.055\pi d^2 v_T^2 \rho_f \quad (7)$$

$$v_T = \sqrt{\frac{3gd(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (8)$$

$$v_T = k_2 \sqrt{[d(\rho_s - \rho_f)]} \quad (9)$$

Bahsi geçen denklemlerde de görüldüğü gibi hem Stokes hem Newton yasası, terminal hızın yoğunluk ve tane boyunun bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir.

Terminal hızları aynı olan farklı boy ve yoğunluktaki taneler kıyaslandığında serbest çökme oranları Stokes ve Newton yasasına göre sırasıyla Denklem 10 ve Denklem 11'deki gibi hesaplanmaktadır:

$$\frac{d_a}{d_b} = \sqrt{\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f}} \quad (10)$$

$$\frac{d_a}{d_b} = \frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f} \quad (11)$$

d_a, b : a ya da b tanesinin çapı

ρ_a, b : a ya da b tanesinin yoğunluğu

Serbest çökme oranları, ρ_a ve ρ_b yoğunlukları aynı olacak şekilde Stokes ve Newton'a göre kıyaslandığında, Newton'a göre hesaplanan değerin daha büyük olduğu görülmektedir [6]. Bu şekilde iri tanelerde, taneler arası yoğunluk farkının ayrımı daha fazla etkilediği anlaşılmaktadır.

3. İNCE FİLM VE AKAN SIVI FİMLERİYLE ZENGİNLEŞTİRME

İnce film ve akan sıvı filmleriyle yapılan ayrımlar genellikle aynı kabul edilmekle birlikte arasında belirgin farklılıklar vardır. İnce filmlerle yapılan zenginleştirmede sıvı filmin yüksekliği ile tanenin boyunun ya aynı olması ya da sıvı filminin tane boyundan en fazla 10 katı yükseklikte olması ve akışkana nispeten düşük bir makaslama geriliminin etkimesi beklenmektedir. Akan sıvı filmlerinde ise sıvı filmi yüksekliği çok daha fazladır ve büyük ölçüde makaslama gerilimi görülmektedir [1].

3.1. İnce Film ile Zenginleştirme Teorisi

İnce film zenginleştirmesinin genel prensibi, aşağı yönlü eğimi olan bir yüzey üzerinde ince bir su tabakasının laminar koşullarda akmasıdır. Hız dağılımı paraboliktir. Düzeneğin en üstünde hız sıfır iken en altındaki hız maksimuma ulaşır [1]. İnce film zenginleştirmesiyle ilgili matematiksel yaklaşımlar genellikle Gaudin'in çalışmalarında görülmektedir [11].

Aşağı yönlü film akışındaki tanelerin tabakalanmasında tanelerin boyu, yoğunluğu ve şekli etkilidir. Laminer akış koşullarında eğimi ve akış hızı bilinen bir sistemdeki sıvı filmin kalınlığını matematiksel eşitliklere dayanarak tahmin etmek mümkündür [1].

Eğimli bir yüzey üzerinde akan ince sıvı filminin alt kısmında yer alan tek bir taneye etkiyen kuvvetler incelendiğinde; yerçekimi kuvveti, sürtünme kuvveti ve akışkanın taneye uyguladığı kuvvetler olduğu görülmektedir. Akışkanın taneye uyguladığı kuvvet en karmaşık kuvvetlerdendir. Çünkü bu kuvvet sadece tanenin şekline ve yoğunluğuna bağlı değil, akışkanın ve tanenin hareketine de bağlıdır. Taneler bu özelliklerine bağlı olarak akışkan içerisinde kayma ya da dönerek ilerleme hareketleri gerçekleştirirler. Üçgen, kare gibi şekillere sahip taneler düz bir yüzeyde akışkanla birlikte kayarak ilerlerken; düzensiz şekilli, altıgen ya da sekizgen şekilli taneler dönerek ilerlerler [1].

Sıvı filmin kalınlığı sabit akış hızında eğim azaldıkça, ya da sabit eğimde akış hızı arttıkça artmaktadır. Eğer yüzeyin eğimi ya da akış hızı iyi belirlenmezse ya da zenginleştirilecek taneler arasındaki özgül ağırlık farkı çok azsa, çalışılabilir tane boyu aralığı azalmaktadır. Doğru bir yüzey eğimi ve film kalınlığıyla optimum ayırma koşullarına ulaşmak mümkündür. Film kalınlığı, akış hızı ve eğimle ilişkili olduğundan, en iyi sonuca farklı akış hızları ve eğimler denenerek ulaşılabilir [1].

3.2. Akan Sıvı Filmleri ile Zenginleştirme Teorisi

Akan sıvı filmiyle ayırma yapan ekipmanlardaki ayırma, farklı tane boyu ve yoğunluktaki tanelerin yerçekimi kuvveti, santrifüj kuvveti, suyun kaldırma kuvveti ve tanenin eylemsizlik kuvveti etkisi altında, suyun akışına bağlı olarak gerçekleşmektedir [4]. Akan sıvı filmi prensibine göre ayırma yapan yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarına örnek olarak daralan oluklar, spiral zenginleştiriciler ve koniler verilebilir [12].

Bir sistem içerisinde askıda bulunan taneler sürekli olarak makaslama kuvvetine maruz kalırsa, oluşan basınç belirli açılarla makaslama tabakası yüzeyine yayılır [13]. Bu kuvvet, palpın eğimli bir yüzeyden akmasının doğal sonucu olarak oluşabileceği gibi, palp akışı sırasında yüzeyin hareketi sebebiyle veya her iki sebebin birleşimi neticesinde de oluşabilir [1]. Tüm bunların sonucunda oluşan kuvvet *Bagnold kuvveti* (F_B)'dir. Denklem 12'de de görülebileceği gibi Bagnold kuvveti tane yarıçapının karesiyle ve sürüklenme hızıyla doğrudan ilişkilidir:

$$F_B = k_1 r^2 \quad (12)$$

k_1 : Orantı sabiti

r : Tanenin yarıçapı

Akışa dayalı oluşan makaslama kuvvetinde, yeterli makaslama kuvvetinin oluşabilmesi için ekipman yüzeyinin yüksek eğimli olması gerekmektedir ve akış hızı önem arz etmektedir. Makaslama kuvvetinin esas olarak ekipman yüzeyinin hareketinden kaynaklandığı durumda ise düşük akış hızları düşük eğimlerde uygulanabilmektedir. Yüksek hız ve eğimlerde yapılan zenginleştirme işlemi, çalışılan tane boyunu kısıtlamakta, ince tane boylarının zenginleşmesine engel olmaktadır [1].

Akan sıvı filmlerinde ayırım mekanizmalarının incelenmesi amacıyla, olasılığa dayalı kinetik yaklaşım (Kinetic-probabilistic approach) modelinin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Bu yaklaşıma göre, akan sıvı filmde hareket eden bir tanenin hızı sonsuz sayıdaki olasılıklar sebebiyle rastlantısaldır; ancak frekans dağılımı ya da olasılık yasalarıyla açıklanabilme ihtimali vardır [14].

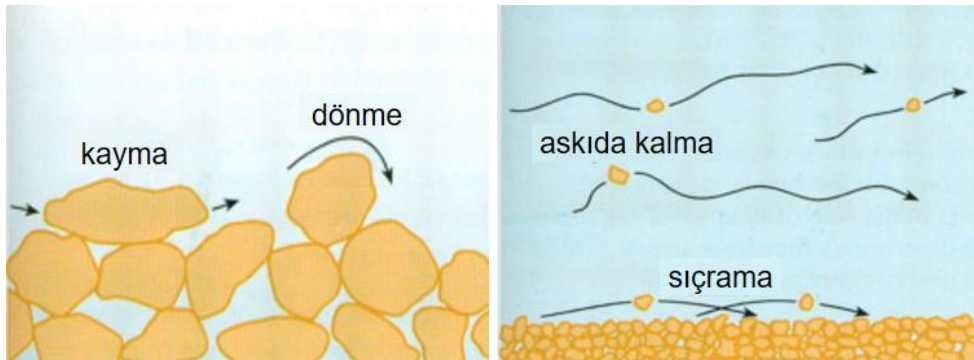
Kinetik yaklaşım modelini oluştururken:

- Kullanılacak ayırım ekipmanının belirli yörüngelerinden geçen farklı boy ve yoğunluğa sahip tanelerin davranımları incelenmelidir,
- Ayırım ekipmanlarının çıkışından alınan tanelerin frekans dağılım eğrileri oluşturulmalıdır,
- Oluşturulacak modeldeki parametreler deneysel yöntemlerle tespit edilmelidir.

4. SEDİMAN TAŞINIMI

Yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarında tanelerin ayırım süreçlerini incelerken, tanelerin doğadaki davranımlarından yola çıkmak mümkündür. Nehirler, dereler, çaylar gibi sığ suların sürekli akışının olduğu açık kanallarda, akışın olduğu yüzeydeki taş-toprak gibi sedimanların çeşitli etkilerle taşınımı söz konusudur. Cevher zenginleştirme ekipmanlarından spiral zenginleştiriciler, daralan oluklar, sallantılı masalar ve Reichert konileri de, üzerlerine beslenen taneleri yoğunlukları ve boylarına bağlı olarak ayırdıklarından, sediman taşınım sistemleri olarak kabul edilmektedirler [15], [16].

Sedimanlar sığ sularda, derin denizlere oranla, dalgaların hareketi sebebiyle daha çok hareket etmektedir. Sedimanların taşınımı konusundaki en önemli faktörlerden biri tanelerin boyutudur. Taneyi hareket ettirebilecek güçteki bir su akışı sedimanın taşınmasına yardımcı olurken, suyun geri hareketi ile sedimanın bulunduğu bölgeye çökerek depolanmasını sağlar. Taneler suyun etkisiyle kayma, dönme, sıçrama ya da askıda kalma gibi mekanizmalarla bir noktadan diğer bir noktaya taşınabilirler (Şekil 4.1). Bu mekanizmaların kiminde tane yatakla temas halindeyken kiminde sadece akış içerisinde sürüklenmekte ya da sürüklenen diğer tanelerle temasa geçerek etkilenmektedir [15].



Şekil 4.1. Suyun içerisinde sediman taşınım mekanizmaları [15]

Akış sırasında suyun hızında sürtünmeye bağlı bir azalma gözlenir. Tanenin sınır

tabakasında gözlenen bu etki, makaslama kuvveti sebebiyle gerçekleşmektedir. Sedimana etkiyen suyun kuvveti incelendiğinde, yatağın en altında duran tanelerin yatakla bitişik olduğu çok küçük bir kısmına teorik olarak su kuvvetinin etki etmediği düşünülmektedir. Yatağın tabanından yukarı doğru uzaklaştıkça, taneye etkiyen suyun kuvveti de mesafeye bağlı kademeli olarak artmaktadır. Suyun hızı belli bir noktaya kadar arttıktan sonra makaslama hızıyla sürtünme kuvveti eşitlenmekte böylelikle suyun hızı da sabitlenmektedir [15].

Öte yandan tanelere uygulanan su akışının etkisiyle taneler harekete geçebilmekte ve suyun kaldırma kuvvetinin yanı sıra akımın oluşturduğu kaldırma kuvvetine de maruz kalabilmektedirler. Sediman taşınımında tanelerin boyu ve akışın hızı etkili olduğu kadar tanelerin ve suyun yoğunluğu, viskozitesi ve akışın laminar ya da türbülanslı olması da büyük önem taşımaktadır [15].

Açık kanallarda türbülanslı akışları tanımlarken x, y ve z eksenine doğru uzanan kuvvetler ele alınmaktadır. Sonuçta taneye etkiyen net kuvvet belirlenip Denklem 13'teki gibi matematiksel eşitliklerde ifade edilebilir hale getirilebilmektedir [15]:

$$\tau_0 \propto \rho \bar{u}^2 \quad (13)$$

$\bar{u}$: Ortalama akış hızı (m/sn)

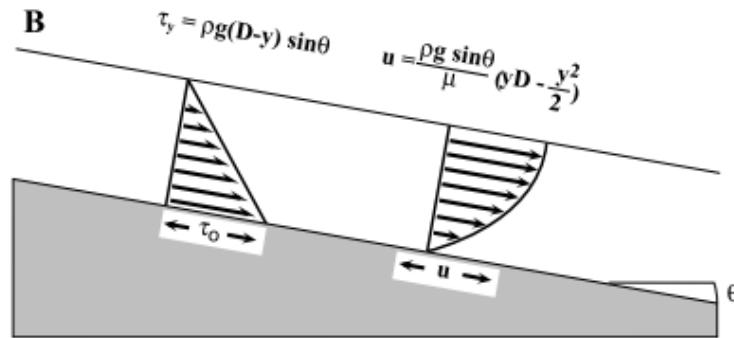
Denklem 13'e göre, akış hızı arttıkça makaslama gerilimi, hızın karesi oranında artış gösterecektir. Yatak tabanındaki sedimanın hareketlenmesi, sedimanı yüzeyde tutan yerçekimi kuvveti ile sürtünme kuvvetlerini yenen makaslama geriliminin etkileşimi sonucu meydana gelmektedir. Buna *kritik makaslama gerilimi* denmektedir [15].

Sedimanların özellikleri ve fiziksel yapıları farklılıklar gösterdiğinden, yassı yapıdaki tanelerle killi malzemelere uygulanan kritik makaslama geriliminin büyüklükleri aynı

olmamaktadır. Sediman yapısı içerisinde %5–10'luk oranlarda 2 μm 'dan ince killi malzemenin bulunması, sedimanın yatağa tutunmasını ve yapışkanlığını arttırmaktadır. Bu sebeple killi malzemeye uygulanan kritik makaslama geriliminin, yapışkan olmayan tanelere oranla daha fazla olması beklenmektedir [15].

Tanelerin bir akışkan içerisinde taşınmasını matematiksel olarak ifade edebilmek için tanelerin çökme mekanizmaları haricinde akışkanlar mekaniğine de yeterince hakim olmak gerekmektedir [10].

Açık kanallarda düz bir yüzeyde aşağı yönlü gerçekleşen akış sırasında, akışkan içerisindeki her bir molekül yerçekimi kuvveti ve makaslama geriliminden etkilenmektedir. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi yüzeye yaklaştıkça hız artmakta, makaslama gerilimi düşmektedir [10].



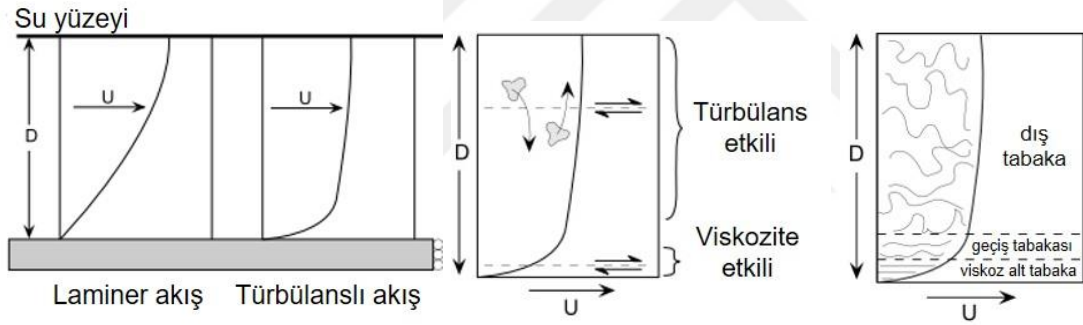
Şekil 4.2. Kararlı haldeki aşağı yönlü laminar akışta hız ve makaslama geriliminin şematik gösterimi [10]

Serbest yüzeydeki akış koşullarını tanımlayan parametrelerden biri *Froude sayısıdır*. Froude sayısı, akışkanı harekete geçiren kuvvetlerin yerçekimi kuvvetlerine oranıdır (Denklemler 14):

$$F = \frac{\bar{u}}{\sqrt{gD}} \quad (14)$$

Kanallardaki akış türleri $F < 1$ ise kritik altı (sakin), $F > 1$ ise süper kritik, $F = 1$ ise kritik akışlar olarak tanımlanmaktadır. $F > 1$ durumunda hem su yüzeyi hem de sediman yüzeyi dalgalı bir yapıya sahip olmaktadır. [10]

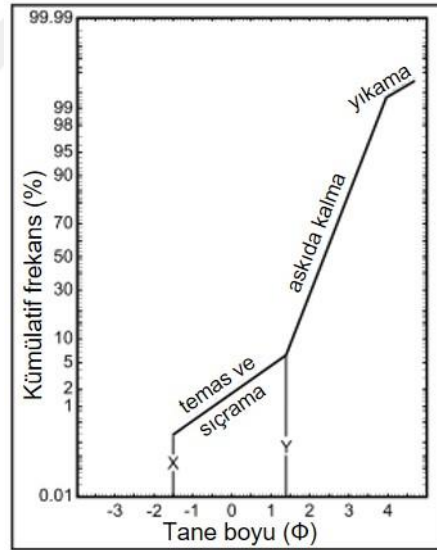
Akışın özelliğini belirleyen bir diğer parametrenin *Reynold sayısı* olduğu daha önceki bölümlerde tartışılmıştır. Reynold sayısı, akış içerisinde sıvıyı hareket ettiren kuvvetlerle akışa direnç sağlayan viskoz kuvvetleri arasındaki oran olarak düşünülebilir. Eğer akıştaki direnç kuvvetleri büyük ise akışın yapısı viskoziteye bağlıdır ve laminar bir akış görülmektedir. Eğer akışı hareket ettiren kuvvetlerin etkisi daha fazla ise momentum etkisi ile türbülanslı akış koşulları görülmektedir (Şekil 4.3). Türbülanslı bir akış, viskoz ve türbülanslı makaslama geriliminin her ikisinin de etkisi altındadır [10].



Şekil 4.3. Laminer ve türbülanslı akışlarda hız dağılımının gösterimi [10]

Türbülanslı akışlar, momentum etkisine bağlı olarak üç bölgeye ayrılmaktadır; laminar akış etkisinin gözlemlendiği viskoz alt tabaka, türbülanslı akışın etkin olduğu dış tabaka ve bu iki tabaka arasında tampon görevi üstlenen geçiş tabakasıdır (Şekil 4.3). Türbülanslı akış koşullarının görüldüğü dış tabakada ikincil akışlar ve girdaplı akışların etkisi baskındır. Dış tabakadaki ikincil akışlar, ortalama akış yönüne paralel oluşan, tek bir eksen etrafında spiral şeklinde dönerek kendini gösteren akışlardır. Düz kanallarda spiral şeklinde oluşan ikincil akışlar yan yana oluşabileceği gibi birbirine ters yönlü de oluşabilmektedir. Böyle kanallarda makaslama geriliminin en çok görüldüğü yer kıvrımın dışı iken, en az görüldüğü yer kıvrımın içidir [10].

Tek eksenli akışlarda, sedimanın tane boyuna bağlı olarak, sediman taşıma potansiyeli vardır. Taşınan sedimanlar *yıkanan yük* ve *yataklanmış yük* olarak ikiye ayrılmaktadır. Yıkanan yük, toplam sedimanın %1'inden az miktarda, çok ince taneli ve akışın etkisiyle asılı kalarak sürüklenen malzemeyi ifade etmektedir. Yataklanmış yükün taşınması ise genellikle yüksek hızdaki akışlarla birlikte görülmektedir. Yataklanmış yük de kendi içinde tane boyu ve taşıma davranımına göre üçe ayrılmaktadır; *temas yükü*, *sıçrayan yük* ve *askıdaki kesikli yük*. Temas yükü, iri sediman parçalarından oluşmaktadır. Taneler genellikle yatakla temas halindedirler, yatak üstünde kayma ve yuvarlanma şeklinde hareket ederler. Sıçrayan yük, yatak üzerinde sıçrayarak hareket eden tüm taneleri tanımlamaktadır. Kesikli askıdaki yük ise türbülanslı akışın düşey bileşeninin etkisiyle hareket eden taneleri ifade etmektedir (Şekil 4.4). Bahsi geçen taşıma mekanizmalarının arasındaki fark sedimanın tane boyu olmakla birlikte, tanenin yoğunluğu ve şekli de bu sistemler üzerinde etkilidir [10].



Şekil 4.4. Sedimanların tane boyuna bağlı taşıma sıklığı ve taşıma şekilleri [10]

Tanelerin su ile taşınımıyla ilgilenen jeoloji, inşaat mühendisliği ve akışkanlar mekaniği gibi pek çok disiplin mevcuttur. Yapılan araştırmalar cevher zenginleştirme alanındaki tane taşınımına da yol gösterici nitelikte olmakla birlikte, yerçekimi ile ayırmada tane taşınımı Gaudin'in yaptığı çalışmalar baz alınarak açıklanmaktadır [11], [16].

Doğal akışlarla cevher zenginleştirme ekipmanlarındaki akış arasında üç temel fark vardır. Öncelikle nehir akışları, gevşek pürüzlü yapıdaki sedimanlarla, erozyona uğramış ve kanal yüzeyinden kopmuş taneleri taşır ve bulunduğu yerin hidrodinamik koşullarına bağlı olarak tanelerin birikmesine sebep olur. Yerçekimi ile ayırma ekipmanlarında ise ekipman üzerinde sabit ve genellikle düz bir yataklanma vardır. Katı ve suyun akış hızları sabit olmakla birlikte yatakta bir bozunma veya ekipman yüzeyi üzerinde birikim istenmez. İkinci olarak, nehir akışlarının çok düşük bir eğimi olmasına karşın, yerçekimiyle ayırım ekipmanlarında eğim çok daha yüksektir. Son olarak ise nehir akışlarındaki yükseklik, yerçekimi ile ayırım yapan ekipmanlara göre çok daha yüksektir. Bu da nehirlerden doğru bir örnekleme yapılmasını güçleştirmektedir [16].

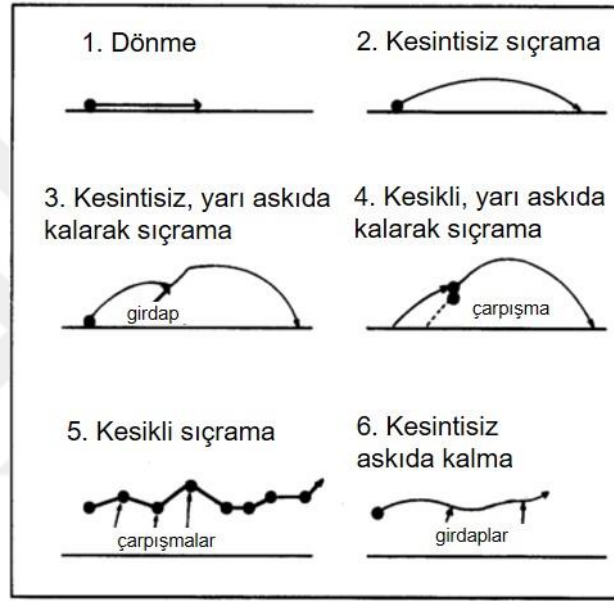
Gaudin tarafından, dönen ya da kayan *tek bir tane* üzerine iki boyutlu laminar bir akışta etki eden kuvvetler belirlenmiştir [11]. Ancak pratikte, taneler üzerine etkiyen kuvvetler Gaudin'in ifade ettiğinden çok daha karmaşıktır. Deneysel olarak sediman taşınımının kontrolü çok zordur. Palp içerisinde hareket halindeki tek bir taneye etki eden kuvvetleri üç boyutta belirleyebilmek, çok düşük konsantrasyonda olmadığı sürece, neredeyse imkansızdır [16]. Francis, tek bir tanenin sabit koşullardaki bir yatak içerisindeki hareketini izleyebilmek için çoklu fotoğraflama tekniğini kullanmıştır [17]. Francis, tanenin konsantrasyonunu göz ardı ederek yaptığı çalışmada, üç farklı tane hareketinden bahsetmiştir:

1. Tanenin her zaman yatakla temas halinde bulunduğu yuvarlanma veya kayma durumu,
2. Akışan içerisinde tanenin zaman zaman sıçrayıp tekrar yatakla temasa geçtiği durum,
3. Akışın dalgalanmasına bağlı olarak tanenin akışkan içerisinde askıda kalarak sürüklendiği durum.

Francis, akışkanın viskozitesi arttıkça laminar akış koşullarında tanenin sıçrama hareketine devam edeceğini söylemiştir [17]. Francis'in çalışmaları daha sonra Abbott ve Francis tarafından genişletilmiştir [18]. Her ne kadar bu yaklaşımın

eksiklikleri olsa da, yerçekimi ile ayırım yapan ekipmanlardaki ayırımı daha gerçekçi ifade etmesi sebebiyle daha çok kabul görmüştür. İlerleyen çalışmalarda, tek bir tanenin türbülanslı akışta ve açık kanalda düz bir yüzeyin dibinden taşınması ve pürüzlü bir yüzeyden taşınması ile ilgili çalışmalara devam edilmiştir [19], [20].

Yüksek konsantrasyonlu taneler ise Leeder tarafından çalışılmış ve Francis'in çalışmasına benzer şekilde Şekil 4.5'te verilen bulgulara ulaşılmıştır [21].



Şekil 4.5. Leeder'in çalışmasına göre tanenin taşınma modları [21]

Farklı boy ve yoğunluktaki tanelerle çalışılan bir yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanında, Şekil 4.5'te verilen modların tamamını görmek mümkündür. Çalışmanın sonuçlarına göre daha yoğun taneler sıçrama ve yuvarlanma modunda olurken, daha az yoğun tanelerin asılı modda olması beklenmektedir [16].

Hetsroni de çalışmasında, Reynold sayısı küçük olan tanelerin bağıl hız ve tane boyuna bağlı olarak türbülanslı akışı baskıladığını; ancak Reynold sayısı 400'den büyük olan tanelerin türbülanslı ortam oluşmasına yardımcı olduğunu öne sürmüştür [22].

Tane konsantrasyonu yüksek olduğunda, palp içerisinde oluşan makaslama direncinde artış olduğu ve hız dağılımında farklılıklar ortaya çıktığı görülmektedir. Bu tip akışların dinamiğiyle ilgilenen Bagnold tarafından birçok farklı çalışma yapılmıştır [13], [23]. Özellikle sediman taşınımının gerçekleştiği nehirlerde makaslama ve normal gerilim değerleri ölçülerek, akışın davranımı fiziksel olarak açıklanmaya çalışılmıştır.

İlerleyen senelerde, daha karmaşık akışları ifade edebilmesi için Bagnold eşitliğinden farklı olarak birçok çalışma yapılmıştır. Nasr-el-Din'in Bagnold yaklaşımını ele alarak kuvars taneleriyle yaptığı deneysel çalışmalarda, yatay bir boru içerisinde geçen palp akışı sırasında oluşan yatay konsantrasyon değişkenleri, batan tanenin ağırlığı göz ardı edilerek ölçülmüştür [24]. Yüksek tane konsantrasyonunda tanelerin boru merkezine doğru kaydığı görülmüştür. Normal ve dağıtıcı gerilim bileşenlerinin etkisinin iri tanelerde ince tanelere oranla daha çok olduğu görülmüştür.

Abdinegoro ve Partridge'in 500 μm tane boyundaki tanelerle daralan oluklarda yaptığı örnekleme çalışmalarında, normal gerilimin, teoride açıklandığı gibi, yalnızca yüksek konsantrasyonda gerçekleştiği görülmüştür [25]. B değeri hesaplandığında, makroviskoz rejim (düşük besleme konsantrasyonu) ile düşük geçiş rejimi (yüksek besleme konsantrasyonu) arasında yer aldığı görülmüştür. Bu da, sürüklenme hızının oldukça düşük olduğunu göstermiştir. Subasinghe ve Kelly de Bagnold'ın normal gerilim etkisini göz önüne alarak daralan oluklarla çeşitli çalışmalar yapmıştır [26].

Sediman taşınım yöntemlerinin modellenmesinde genellikle, kuvarsın yoğunluğunda kabul edilen katı sedimanın akış hızının, hidrodinamik koşullarla ilişkisi ortaya konmuştur. Bu tip modeller Yalin tarafından geliştirilmiştir [27].

5. YERÇEKİMİYLE ZENGİNLEŞTİRME EKİPMANLARI VE MODELLEME PRENSİPLERİ

5.1. Yerçekimi ile Ayrım Ekipmanları

Yerçekimi ile ayırım yöntemlerinden olan ağır ortam uygulamalarında kullanılan ağır ortam siklonu, ağır ortam tamburu ve ağır ortam banyoların yanı sıra oluklar, koniler, jigler, sallantılı masalar, spiral zenginleştiriciler ve altın arama bentleri ile pan gibi ekipmanlar ilk zenginleştirme uygulamalarından itibaren tercih edilmiştir. Sonraları, Floatex yoğunluk ayırıcısı gibi yerçekimi ile ayırım yapma prensibine göre tasarlanmış ekipmanlar geliştirilerek tesislerde kullanılmaya başlanmıştır [28].

Yerçekimi ile ayırım ekipmanlarının ana çalışma prensibini açıklayan dört temel faktör vardır: yoğunluk, tabakalanma, akan sıvı filmi ve yatay makaslama kuvveti. Ekipmanların davranımları bu maddelerden sadece biriyle açıklanamayacağından, bir ya da daha fazla etkenin bir arada olması gerekmektedir. Merkezkaç etkisiyle ayırım yapan yerçekimiyle ayırım ekipmanları, bahsi geçen faktörlerin etkisini arttırarak uygun minerallerde daha etkin bir ayırım gerçekleşmesini sağlamaktadır [28].

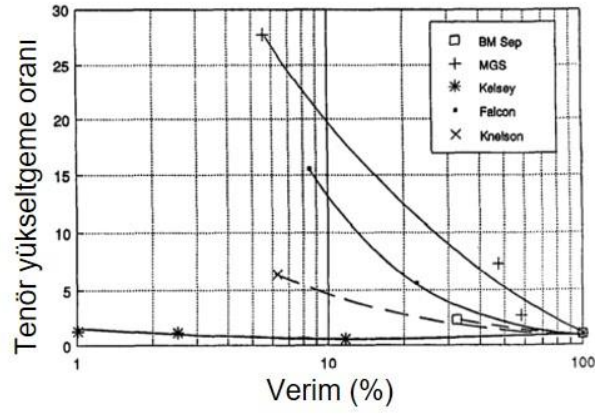
Yerçekimi ile zenginleştirme yöntemlerinde 100 μm 'dan iri tane boylarının zenginleştirilmesi için jigler ve konilerin kullanılması uygundur. Spiral zenginleştiriciler ise en ince 75 μm 'a kadar taneleri etkili biçimde ayırabildiği bilinmektedir. Bu tane boyunda sallantılı masalar da verimli bir ayırım sergilemekle birlikte, ekipmanların işlediği besleme kapasiteleri değişiklik göstermektedir [29].

Yerçekimi ile ayırımı yöntemlerinde çok ince tanelerin (-15 μm) çökmesi problem oluşturduğundan; tanelerin çökme hızını arttırmak için merkezkaç kuvvetinin uygulandığı MGS (Yüksek yerçekimli ayırıcılar), MeGaSep, Falcon zenginleştiricisi, Knelson zenginleştiricisi, Kelsey jigi, Altair jigi ve SL-tipi zenginleştirme üniteleri gibi ekipmanlar geliştirilmiştir [28].

Merkezkaç kuvvetiyle ayırım yapan ekipmanları 3'e ayırmak mümkündür: Düşey eksenli, yatay eksenli ve santrifüj jigleri. Düşey eksenli ekipmanlardan günümüzde en yaygın olarak kullanılanlarından biri Knelson zenginleştiricisidir. İlk olarak yarı kesikli olarak 1982 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Forssberg ve Nordquist [30] her ne kadar Knelson zenginleştiricisinin $37\ \mu\text{m}$ 'dan ince taneleri zenginleştiremediğini ileri sürse de Laplante [31] bunun sebebinin tane boyundan çok tanenin şekliyle ilgili olduğu görüşünü ortaya koymuştur. Falcon zenginleştiricisi de düşey eksenli olarak sayılan ekipmanlardan biridir. Knelson zenginleştiricisinin ayırım mekanizmasıyla benzer özellikler taşıyan bu ekipman tasarım olarak farklılıklar göstermektedir. Falcon zenginleştiricisi ince taneli ve seyreltik palpları ayırma konusunda özelleşmiştir. Yatay eksenli ekipmanlara örnek olarak MGS zenginleştiricisi örnek verilebilir. Ekipmanın çalışması, sallantılı bir tamburun yatay ekseninde belli bir açıyla dönerek mineralleri ayırma prensibine dayanmaktadır. Tamburun eğimi yatayla 10° 'ye kadar çıkabilmektedir. Santrifüjlü jigler kategorisindeyse Kelsey jigi yer almaktadır. Standart özelliklerdeki jigin silindirik biçimde konumlandırılıp yatayda döndürülerek çalıştırılması prensibine dayanmaktadır. Bu sayede daha ince tanelerin kazanımı sağlanmaktadır [32].

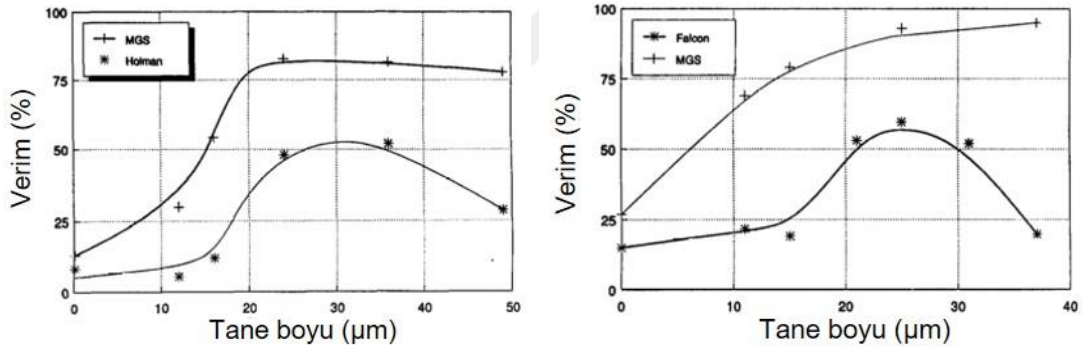
Engelli çökeltme ekipmanları ve hidrolik sınıflandırıcılar uzun senelerdir farklı türdeki minerallerin sınıflandırılması amacıyla kullanılıyor olsalar da, seneler içerisinde bu sınıflandırma ekipmanları, minerallerin yoğunluk ve boy farkına bağlı olarak daha dar tane aralığında zenginleştirme amacıyla da kullanılmaya başlanmıştır [33].

Literatürde konuyla ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, farklı yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarının test edildiği görülmektedir. Örnek olarak, Burt (1995)'in yaptığı çalışmada %45'i $12\ \mu\text{m}$ 'dan ince olan %0.1 tenörlü Ta_2O_5 cevherinden Kelsey jigi, Knelson zenginleştiricisi, Falcon zenginleştiricisi ve MGS gibi çeşitli ekipmanlar denenerek yüksek verimli konsantre üretilmesi hedeflenmiştir [32]. Yapılan deneylerin sonuçları Şekil 5.1'de verilmektedir.



Şekil 5.1. Çeşitli yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarında verim-tenör ilişkisi [32]

MGS ve Falcon zenginleştiricisinin daha yüksek performans gösterdiğinin tespit edildiği bu çalışmada, ekipman bazında tane boyuna bağlı çalışmalar da yapılmıştır. Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, MGS’nin ince tantal tanelerini yakalamada daha başarılı olduğu görülmüştür.



Şekil 5.2. MGS, Holman masası ve Falcon zenginleştiricisinde tane boyuna bağlı verim değerlendirmesi [32]

Yapılan bir diğer çalışmada, farklı besleme hızlarında pilot ölçekli MGS ve tesis ölçekli sallantılı masa kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre MGS’nin veriminin sallantılı masaya oranla %6 daha fazla olduğu görülmüştür [29].

5.1.1. Yerçekimi ile Ayrım Ekipmanlarının Modellenmesi

Modelleme ve optimizasyon işlemleri, doğru mühendislik sonuçlar almak için sistematik ve düzenli data toplamayı gerektiren hassas süreçler olmasının yanı sıra maksimum düzeyde bilgi edinmeyi sağlamak için kullanılabilecek en ekonomik ve en hızlı yoldur. Cevher zenginleştirme yöntemlerinde de modelleme ve simülasyon işlemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak yerçekimi ile zenginleştirme uygulamalarındaki işletim parametrelerinin çokluğu ve değişken olmaları sebebiyle tek bir model oluşturulması oldukça zordur. Bu sebeple ampirik ya da yarı ampirik modellerle uygulamalar denenmektedir [34].

Mackie ve Tucker (1987) tarafından yerçekimi ile zenginleştirme tesislerinde devrenin tümünü ele alan bir simülatör geliştirildiği bilinmektedir [35]. Bunun yanı sıra yerçekimi ile ayırım ekipmanlarının performans eğrilerinden yola çıkarak oluşturulmuş birçok model mevcuttur [36], [37].

Yerçekimi ile zenginleştirme uygulamalarda ekipmanın ve ayırım verimini göstermek için yaygın olarak performans eğrileri kullanılmaktadır. Performans eğrileri ilk olarak Tromp tarafından, kömür zenginleştirme işleminin verimini göstermek amacıyla kullanılmıştır [38]. Sonraları Gottfried ve Jacobsen, ekipmanın performansını gösterecek şekilde, indirgenmiş performans eğrilerini kullanmaya başlamıştır [39]. Bu eğrilerin en önemli kısıtlarından biri, yalnızca tane boyuna bağlı sonuç vermesidir. Prosser, ekipman ve tane karakteristiği arasındaki farklılıkları ortadan kaldırmak amacıyla *ayrım performansı* tanımını geliştirmiştir [40]. Prosser'a göre eğriyi oluşturan yatay eksenin, ekipmandaki ayırım kuvvetine göre oluşan bir özelliği göstermesi gerekmektedir. Bu özellik daha sonra Kelly ve Spottiswood tarafından geliştirilmiş, ayırımı etkileyen ikincil koşulların önemi ve ayırımı nasıl kısıtladığı konusu değerlendirilmiştir [37]. Kelly ve Spottiswood yerçekimi ile ayırım ekipmanlarındaki mekanizmayı ikiye ayırmıştır: birincisi ayırımın gerçekleştiği sıradaki hızı tanımlayan *kinetik mekanizma*, diğeri ise ayırımın gerçekleşmesine olanak sağlayan *termodinamik mekanizma*dır. Bu tanımlamalar ışığında performans eğrileri ayırımın hızını, yoğunluk ise ayırım için itici gücü ifade etmektedir. Tanenin

terminal hızı, ayırımın hızını ölçmede önemli bir parametredir. Ancak terminal hız tek başına ayırımı tanımlayıcı bir parametre değildir. Taneler bir akış içerisinde girdikleri zaman akışkanın özelliğine göre bağlı bir hıza sahip olurlar. Bu sebeple terminal hız, farklı tane boylarının birbirine bağlı hareketlerinin oranını ifade etmelidir.

Bugünkü teknoloji ile MLA (Mineral Liberation Analyser) ve QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by SCANNing electron microscopy) kullanılarak beslemenin ve ürünlerin tane boyu, yoğunlukları ve serbestlik dereceleri gibi karakterizasyon işlemlerinin kolayca tayini mümkündür. Mineralojik veri ne kadar kesin olursa minerallerin zenginleştirme süreçleri o kadar kolay olacaktır. Besleme akışına göre oluşturulan kantitatif mineraloji modellerinin, önceden kullanılan modellere kıyasla daha üstün olması beklenmektedir.

Kantitatif analiz kullanılarak yerçekimi ile ayırım ekipmanlarının performansının belirlendiği örnekler şu şekildedir: Pascoe (2007) kromit cevherini Mozley ayırıcısında test ederken, Philander ve Rozendaal (2014) ile Grobler ve Bosman (2009) ağır mineral içeren kumların ayırımını spiral zenginleştiricide denemiştir ([41]–[43]). Bergmann (2016) sallantılı masada ferrokrom zenginleştirmesinden elde ettiği verileri QEMSCAN kullanarak Rao tarafından geliştirilen Weibull modelinde uygulamıştır [44]. Bu modelde, konsantreye giden malzemenin ağırlık oranının değişimine bakarak sallantılı masanın performansını belirlemeyi hedeflemiştir. Ancak bu model besleme ya da işletim koşullarında oluşabilecek değişiklikleri yansıtmamaktadır.

Kelly ve Subasinghe (1991) yaptıkları çalışmada, yoğunluk kullanarak hesaplanan performans eğrilerini, terminal hız değerleri kullanarak hesaplamayı hedeflemişlerdir [45]. Denklem 15'te verilen fonksiyon, yoğunluk yerine terminal hız değerlerini kullanan dönüştürülmüş bir fraksiyonel performans eğrisidir. Sonuçta, bu denkleme göre elde edilen eğrilerin de anlamlı bir performans eğrisi ortaya koyabildiği görülmüştür.

$$Y = 0.5 - 0.5ref[R(v_{\infty,50})^k(v_{\infty}/v_{\infty,50} - 1)] \quad (15)$$

v_{∞} : Tanenin terminal hızı

$v_{\infty,50}$: Özgül ağırlığın %50'den kestiği terminal hız değeri

R, k: Ekipman sabitleri

Yüzey Tepki Yöntemi (RSM):

RSM, matematiksel ve istatistiki bilgileri bir araya toplayarak modelleme ve mühendislik problemlerinin belirlenmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem kullanılarak hem yeni ürünlerin tasarımı hem de var olan ürünlerin geliştirilmesi sağlanabilmektedir. RSM'in başlıca amacı farklı değişkenlere dayalı yüzey tepkisini belirleyerek optimize etmektir [46]. RSM ayrıca, verilen girdilerle elde edilen yüzey tepkisi arasındaki ilişkiyi ölçebilmektedir.

RSM yöntemi, bir tesisin optimum çalışma koşullarının belirlenebilmesi için mühendislere yararlı çıktılar sağlamaktadır. Analitik yöntemler son yıllarda, deneysel verilerin ön değerlendirmesini yaparak kritik koşulları belirleyebildiği için yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu konuyla ilgili cevher zenginleştirme alanında çalışmalar yapılmış olsa da ([47]–[49]), henüz yeterli ilgiyi görememektedir. Bu yöntem kullanılırken deneysel tasarım için sıklıkla tercih edilen metotlar Box-Behnken ve Doehlert metotlarıdır [46]. RSM yöntemini uygulayabilmek için öncelikle deney sayılarının belirlenmesi gereklidir. Bu sayı Box-Behnken'a göre Denklem 16'daki gibiyken, Doehlert'e göre Denklem 17'deki gibidir:

$$N = k^2 + k + c_p \quad (16)$$

$$N = k^k + 2k + c_p \quad (17)$$

k: Değişken sayısı

c_p : Merkez noktalarının sayısı

5.2. Spiral Zenginleştiriciler

Spiral zenginleştiriciler akan sıvı filmi prensibine göre ayırım yapan ekipmanlardır. Bu ekipmanlar mineral zenginleştirmede yaygın olarak verimli şekilde kullanılmaktadırlar.

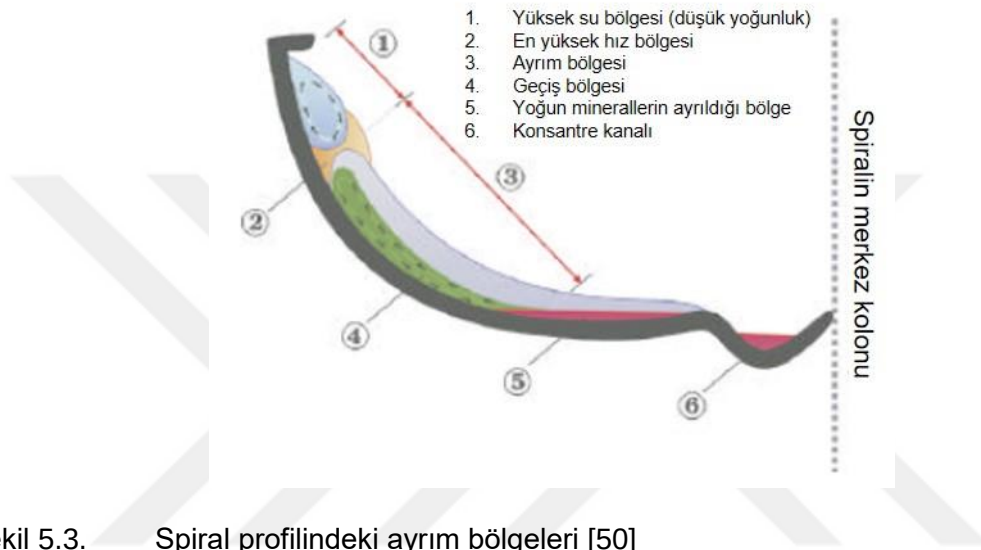
Spiral zenginleştiriciler ilk kez Humphrey tarafından demir ve kromit cevherlerini zenginleştirmek için tasarlanan tek profilli spirallerdi. Sonraları, spirallerin yapımında kullanılan malzeme (PVC, fiberglas, poliüretan), spiralın çapı, boyu, olukların eğimi, oluklar arasında bulunan mesafe, sarmal sayıları, başlangıç sayıları ve yıkama suyu gibi pek çok değişken özelliğe göre farklı tasarımlarda spiraller üretilmeye başlanmıştır [12], [50].

Spiral zenginleştiriciler cevher hazırlama endüstrisinde kullanılmaya başlandıktan bir süre sonra popüleritesini kaybetmiş ve yıllar boyu spiralın tasarımında bir değişiklik yapılmamıştır. Ancak daha sonraları spiral oluğu üzerinde poliüretan kaplı fiberglas kullanılması, çoklu girişe sahip spiral tasarımlarıyla kapasitenin arttırılması, bölücü bıçakların konumu değiştirilerek alınan ürün kalitesinin değiştirilebilmesi ve yıkama suyu kullanılarak daha yüksek tenörlü ürünlerin alınabilmesi sebebiyle spirallerin kullanım oranı tekrar artmaya başlamıştır [50].

Spiral zenginleştiriciler kullanılmaya başlandığı ilk yıllardan itibaren tasarımları üretici firmalar tarafından değiştirilerek nihai ürün veriminde artışların yakalanması hedeflenmiştir. Yaygın olarak kullanılan spiral zenginleştiriciler genellikle 100–500 mm çap ve en fazla 7 sarmala sahip olsalar da, in ve Rusya menşeli üretici firmalar tarafından 2 m çapa ulaşan spiral tasarımları da denenmiştir [50]. Geleneksel olarak ise kaba zenginleştirme yaparken en iyi verim ve tenör değerlerinin 2–4 sarmal sayısına sahip spirallerde elde edildiğı bilinmektedir [51].

Besleme tane boyu dağılımı spiral zenginleştiricilerdeki hassas noktadır. Bu ekipmanda özellikle 75 m'dan ince tanelerin zenginleştirilmesi konusunda problem

yaşanmaktadır [33]. Spirallerde 40 μm 'un altındaki taneler şlam olarak tanımlanmaktadır. Bu boydaki taneler için spirallerde zenginleştirme işlemi verimli şekilde uygulanamadığı gibi sistemi olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Bu sebeple zenginleştirme işlemi öncesinde şlam atılması gerekmektedir. Diğer tüm yerçekimi ile ayırım ekipmanlarında olduğu gibi, en iyi zenginleştirme işlemi dar tane boyu aralığında yapılmaktadır [50].

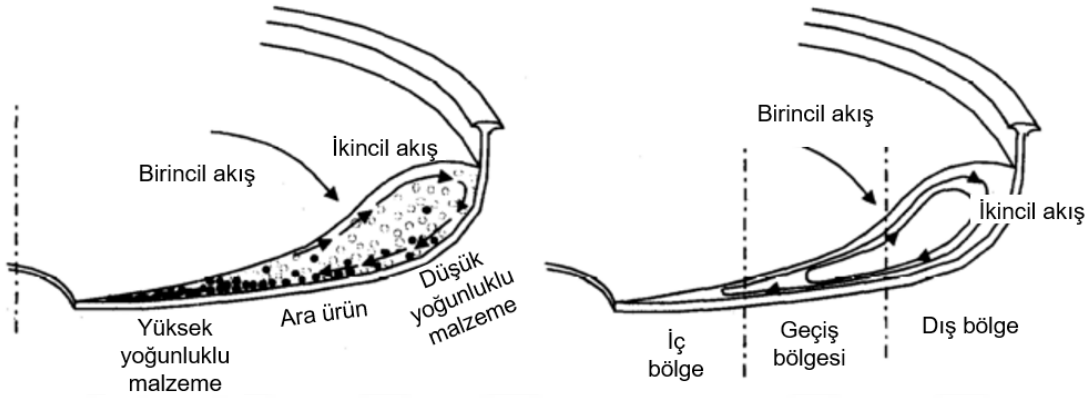


Şekil 5.3. Spiral profilindeki ayırım bölgeleri [50]

Spiral zenginleştiricilerdeki ayırım; yerçekimi kuvveti, merkezkaç kuvveti, sürüklenme kuvveti ve Bagnold kuvvetleri etkisi altında gerçekleşmektedir ([1], [52]–[55]). Palp spirale girdikten sonra her bir tanenin üzerine merkezkaç kuvvetinin etki etmesiyle taneler spiral yüzeyine dağılım gösterir (Şekil 5.3). Spiral yüzeyinde taneler üzerine etkiyen hem yerçekimine bağlı aşağı yönlü bir kuvvet hem de spiral yüzeyi üzerinde oluşan yatay yönlü dairesel bir kuvvet vardır [33].

Spirallerin yüzeyindeki akış koşulları Şekil 5.4'te gösterildiği gibi birincil ve ikincil akış modeli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Birincil akış modelinde palp, spiral oluğunun eğimine göre aşağı yönlü akmaktadır. İkincil akış modelinde ise, bir oluğun kesiti boyunca merkezden çevreye doğru bir akış görülmektedir. Ağır taneler spiral yüzeyi üzerinde tabakalanırken hafif taneler akış içerisinde asılı kalma eğilimindedirler. Üstte kalan tabaka daha suludur ve merkezden spiral çevresine

doğru gitme eğilimindedir. Ortada kalan, daha yoğun tabakadaki taneler ise birbiriyle ve spiral yüzeyiyle etkileşim halindedirler ve bu taneler ters yönde hareket ederek spiralın merkezine doğru gitme eğilimindedirler. Oluşan tabakalanma ve makaslama kuvvetlerinin de etkisiyle daha yoğun taneler spiralın ortasına yakın konumlanırken daha az yoğunluktaki taneler spiralın çevresine gitmektedir [12], [50]. Değerli ince mineraller ya spiral oluğunun dış yüzeyindeki yüksek hızdaki akış bölgesine gitmekte ya da iri tanelerin altına sıkışmaktadırlar. Eğer iri ve değersiz taneler ağır mineral tabakaları arasında kaldılarsa, buradan kurtulup diğer hafif tanelerin ve fazla suyun yöneldiği spiral oluğunun dış yüzeyine ulaşmaları kolay olmamaktadır [33].



Şekil 5.4. Spiral zenginleştiricilerin oluklarındaki birincil ve ikincil akış modelleri [33]

Spiral oluğunun kesit alanı düşünüldüğünde yüzeye çöken taneleri iç bölge, geçiş bölgesi ve dış bölge olmak üzere 3 bölgeye ayırabiliriz. İç bölgede, daha yavaş hareket eden yataklanmış taneler mevcuttur. İç bölgede konumlanmış düşük yoğunluktaki taneler, ikincil akış sayesinde spiralın dış çevresine taşınma eğilimindedirler. Dış bölge verim bölgesi olarak da adlandırılmaktadır. Bu bölge içerisinde yer alan yoğun taneler ikincil akış ile birlikte iç bölgeye taşınma ihtimallerini arttırırlar. Geçiş bölgesinde yataklanma durumundaki taneler haricinde, serbest olarak hareket eden bir akış da mevcuttur. Taneler, bölge içerisindeki konumlarına bağlı olarak ve ikincil akışın etkisiyle spiralın iç ya da dış yüzeyine hareket etme eğilimindedirler [12].

Beslenen tanelerin boyuna, serbestlik derecesine ve ağır-hafif tane miktarına bağı olarak ara ürün bandının genişliği değişiklik göstermektedir. Spiral tasarımlarında, spiral oluşu yüzeyinde çoklu konsantre çıkışlarının bulunması ayırma avantaj sağlamaktadır. Bu sayede zaten konsantre olarak ayrılmış olan akış devreden uzaklaştırılarak, ara ürün akışındaki tanelerin zenginleşme ihtimali artırılmaktadır [50].

Spiral zenginleştiriciler minerallerde kullanıldığı kadar kömür yıkama amacıyla da kullanılmaktadır. Ayrıca spiraller minerallerde ön zenginleştirme yapmak için veya yüksek kapasiteli akışların kaba zenginleştirme işlemleri için de kullanılabilir [12].

Spiraller birbiriyle farklılık gösteren tasarımlarla kaba temizleme, süpürme ve temizleme aşamalarında kullanılmaktadır [50]. Spiral performansının en iyi ve uygulamasının en kolay olduğu aşama, minerallerin kaba zenginleştirme aşaması olarak bilinen, düşük tenörlü cevherin (<%10) spirallere beslendiği uygulamalardır. Öte yandan yüksek yoğunluklu ağır minerallerin zenginleştirildiği temizleme aşamaları uygulamanın en titizlikle gerçekleştirilmesi gereken zorlu aşamasıdır. Bu spirallerde, düşük yoğunluklu tanelerin araya sıkışma ihtimali yüksek olduğundan verim de düşüktür [33].

5.2.1. Spiral zenginleştiriciler ile yapılan uygulamalar

Literatürde yerçekimi ile ayırma ekipmanları hakkında pek çok yayın bulunmasına karşın, yerçekimiyle ayırma mekanizmasının teorisi hakkında çok az rapor bulunmaktadır ([25], [26]). Daralan oluktaki akışın hidrodinamik koşullarıyla ilgili yayınlar yapılmasına rağmen 1990'lara kadar spiral zenginleştiriciler üzerine böyle bir çalışmanın yapılmadığı görülmektedir [50].

Pryor (1965) spirallerdeki ayırma mekanizmasını, merkezkaç kuvveti ve palp akışı sırasında kendiliğinden oluşan ağır ortamın birlikte etkileşimi olarak tanımlamıştır

[56]. Spiral zenginleştiriciler için ilk model ise Tucker (1985) tarafından geliştirilmiştir [57].

Spiral zenginleştiricilerde modelleme tekniği, akışkanlar dinamiğindeki Navier-Stokes eşitliğinden, tamamen ampirik ve istatistiksel modellere kadar değişiklik göstermektedir. Spiralin uzunluğu, spiral oluşunun geometrisi, oluklar arasındaki dikey mesafe, oluşun eğimi, besleme tenörü, beslemenin yoğunluğu, besleme debisi gibi birçok işletim parametresinin yanı sıra palpın viskozitesi, beslemenin tane boyu dağılımı, beslenen tanelerin şekilleri ve mineral serbestleşmesi gibi ayrımı etkileyen ama ayırım sırasında kolaylıkla kontrol edilemeyen değişkenler sebebiyle spirallerin modellenmesi oldukça zordur ([16], [58]–[60]).

Spiral tesislerinde yaşanan problemlerden bir başkası da, süreç sırasında değişiklik gösteren besleme tenörüne göre bölücü bıçak ayarlarının değiştirilememesidir. Büyük spiral tesislerinin bazılarında binlerce spiral başlangıcı bulunmaktadır ve bölücü bıçak ayarlarının her seferinde ayarlanması büyük zaman gerektirmektedir. Bu sorun göz ardı edildiğindeyse, uygulamaya bağlı, ciddi tenör ya da verim kayıpları yaşanabilmektedir. Her seferinde bölücü bıçak ayarlarının değiştirilmesinden, yapılacak değişikliklerle konsantre bandının genişliğini kontrol altında tutabilmenin hem zaman açısından hem de uygulama açısından kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir [61].

İşletim parametrelerinin, spiral yüzeyinde oluşan konsantre bandına etkisini görebilmek amacıyla Steinmüller tarafından bir çalışma yapılmıştır. [61] İlmenit ve silisin besleme numunesi olarak kullanıldığı testlerde, mineral rengine bağlı olarak ışık yoğunluğunu ayarlayan optik bir yöntem geliştirilmiştir. Deneyler sırasında beslemenin katı oranı, tenörü ve debisi sabit tutulmuştur. Holland-Batt (1990)'ın spirallerin modellenmesi için geliştirdiği yaklaşım kullanılarak ampirik bir model oluşturulmuştur [62]. Bu sayede, değişen tenörün besleme debisi, besleme yoğunluğu gibi değişkenlerle etkileşimi ortaya konabilmiştir.

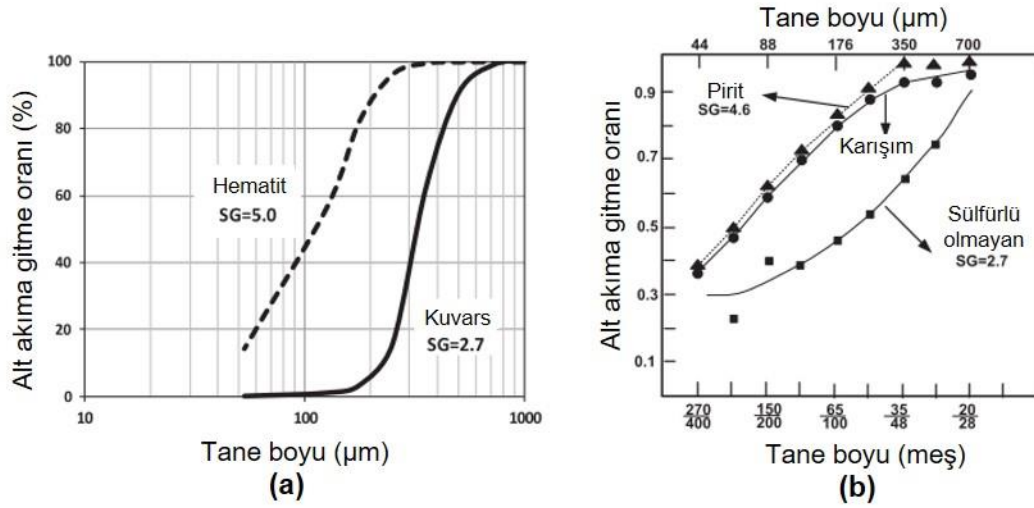
Tane boyuna bağılı verim eğrileri, spiral zenginleştiricilerin çalışma şeklini analiz edebilmeyi sağlayan etkili bir yöntemdir. Spiral zenginleştiricilerde tane boyuna bağılı verim eğrilerine bakıldığı zaman hidrosiklonlar ve hidrolik sınıflandırıcıların aksine iri tane boylarında verimin düşmeye başladığı görülmektedir. Bu düşüş, konsantre olarak alınan değerli cevherde, kaba zenginleştirme, süpürme ve temizleme aşamalarında görülmektedir [55].

Spiral zenginleştiricilerdeki ayırım tanenin yoğunluğuna ve tane boyuna bağılı olduğundan spirallerin işletimi, tane boyu-verim eğrileriyle ya da performans eğrileriyle değerlendirilmektedir. Spiral zenginleştiricilerde performans eğrileri kullanılarak deneysel sonuçların değerlendirilmesinin yapıldığı uygulamalar mevcuttur ([52], [54], [60]). Tane boyu-verim eğrileri kullanılarak yapılan değerlendirmeler ise yalnızca tek kademedeki yapılan spiral zenginleştirme işlemlerinin sonuçlarını göstermektedir ([58], [59], [63]).

Yerçekimi ile ayırım ekipmanlarının performansı, beslemenin konsantreye gitme oranına göre belirlenmektedir. Ayırımı yapılan herhangi bir tane boyu i , mineralin yoğunluğu da ρ ile gösterilirse performans eğrisi hesaplanırken kullanabileceğimiz eşitlik Denklem 31'deki gibi olmaktadır [55]:

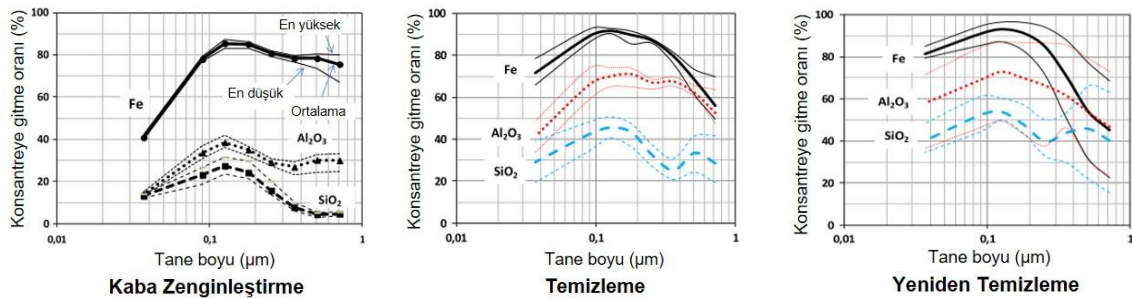
$$Y_{i,m} = \frac{W_C * m_{C,i} * x_{C,i,\rho}}{W_F * m_{F,i} * x_{F,i,\rho}} \quad (18)$$

Bu denklemde W katı akış hızını, m fraksiyonel ağırlığı ve x de tenörü ifade etmektedir. F ve C harfleri ise sırasıyla besleme ve konsantreyi göstermektedir. Şekil 5.5'te de görüldüğü gibi hidrosiklonlar ve hidrolik sınıflandırıcılarda tane boyu veya tanenin yoğunluğu arttıkça konsantreye gitme oranı artmaktadır [55].



Şekil 5.5. Tane boyu ve yoğunluğunun performans eğrisi üzerine etkisi (a [55] , b [64])

Bazin et al. (2014) kaba zenginleştirme spirali ve iki aşamalı yıkama spiralleriyle yaptığı çalışmada, besleme numunesi olarak -850+75 μm tane boyu aralığında %30 Fe içeren cevher kullanılmıştır. Tane boyuna bağlı yapılan performans analizinde demir içeren minerallerde grafiğin 150 μm'a kadar arttığı, 200 μm'dan iri tane boylarında performansın azaldığı gözlenmiştir. Kuvars ve alüminyum içeren minerallerin de ayırım performanslarının benzer şekilde belli bir tane boyuna kadar arttığı, sonrasında düşmeye başladığı Şekil 5.6'da görülmektedir. Değerli minerallerin atığa kaybedilmesinin sebebinin ince tane boylarındaki düşük verimlerden kaynaklandığı düşünülmektedir [55].



Şekil 5.6. Kaba zenginleştirme, temizleme ve yeniden temizleme spirallerinde Fe, SiO₂ ve Al₂O₃ içeren minerallerin tane boyuna bağlı performans eğrileri [55]

Temizleme ve yeniden temizleme spirallerindeki performans ölçümlerinde demir içeren minerallerin -400+100 μm aralığında verimlerin %100'e kadar çıktığı gözlenmiştir. Kaba zenginleştirme ünitesinde 75 μm 'dan ince olan Fe tanelerindeki verim %50'lerdeyken, temizleme spirallerinde bu tane boylarındaki verimin %80'in üzerinde olduğu görülmüştür [55].

İnce mineralleri zenginleştirmek için tasarlanacak spirallerin olukları daha geniş olmalıdır. Bu sayede daha kısa akış yüksekliklerinin oluşması ve tanelerin sistemde alıkonma sürelerinin arttırılarak daha etkili bir ayırım gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir [54].

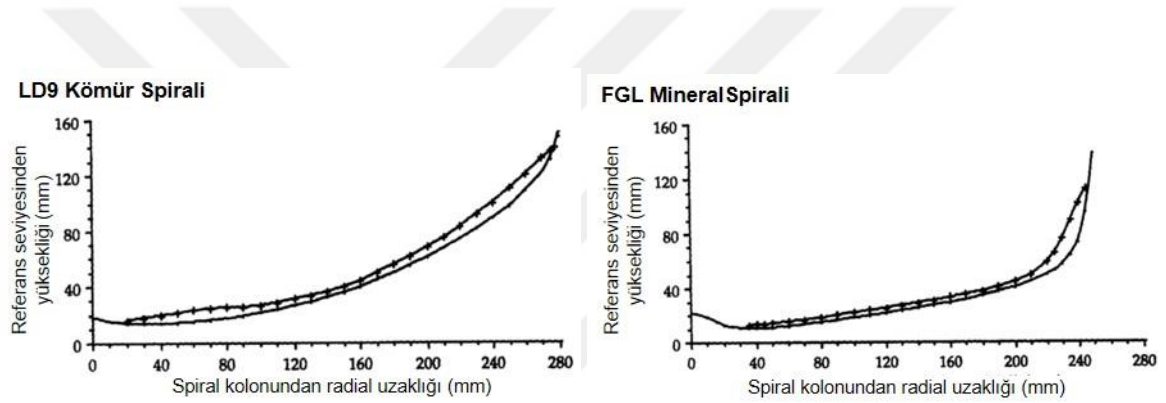
Spiral zenginleştiricilerdeki akışın yüksekliği spiralin merkez kolonuna doğru iç kısımda 1–3 mm arasında görülürken, spiral oluğunun dışına doğru yükselerek 20 mm'lere kadar çıkabilmektedir. Akışın yüksekliği spiralin geometrisine bağlı olduğu kadar beslemenin hızına göre de değişiklik göstermektedir. Spiral oluğunun merkeze doğru olan iç kısmı ne kadar dik olursa olsun, bu bölgeden geçen akışın hızı yavaş olabilmektedir. Aynı şekilde, oluğun dış tarafına doğru olan eğim olabildiğince az tutulsa da, bu bölgedeki akışın hızının maksimuma ulaştığı gözlenebilmektedir. Ancak besleme hızı arttıkça oluğun iç bölgesindeki akış yüksekliğinde bir değişiklik olmadığı halde oluğun dış çeperine doğru yüksekliğin arttığını ve dolayısıyla türbülans koşullarının yaşandığını görmek de mümkündür [54].

Richards et al. (2000) spirallerle yaptığı çalışmada, 1 t/sa kapasiteli spiral zenginleştiricide $d_{80} = 103 \mu\text{m}$ olan, TiO_2 ve ZrO_2 içeren sahil kumu kullanılmıştır. Üç farklı palp yoğunluğunda çeşitli besleme hızlarında deneyler yapılmıştır. 0.5 ve 1.5 t/sa aralığında yapılan besleme hızlarında görülmüştür ki, hız arttıkça TiO_2 verimi düşmektedir [54].

Yukarıda bahsi geçen tane boyu dağılımına benzer özellikteki demir cevheri kullanılarak, bu kez ince mineral zenginleştirmek için tasarlanan spiral ile çalışmalar

tekrarlanmıştır. 1–1.5 t/sa besleme hızlarında yapılan deneylerde de tane boyu arttıkça verim artışı daha sonra düşmeye başladığı görülmüştür. Ancak ince mineral zenginleştirmek için tasarlanan spiralle yapılan deneyler sonucunda, diğer spirale oranla yaklaşık %8’lik bir verim artışı olduğu ortaya konmuştur [54].

Holtham (1992)’ın iki farklı spiralde kuvars mineraliyle %15 sabit besleme konsantrasyonunda yaptığı çalışmalarda LD9 spirale 6 m³/sa, FGL spirale 4 m³/sa’lik hızda beslemeler yapılmıştır [16]. Akış yüzeyini spiral kolonundan başlayarak dışa doğru 8’e bölen çalışmada, LD9 spiralinde ilk bölmelerde daha yüksek konsantrasyon içeriğine rastlanmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. İki farklı spiral zenginleştirici tasarımında yapılan deneyler (solda LD9 spirali, sağda FGL spirali) [16]

Bu farklılıkların Bagnold’un normal gerilim tanımıyla bağlantılı olduğu düşünülmektedir. Bagnold’un normal gerilim davranımını inceleyen Hanes ve Inman ile Savage ve Jeffrey’in yaptığı çalışmalarda, oluşan gerilimin %50’ye kadar olan katı konsantrasyonunda daha az rol oynadığı, ancak bu değer üzerinde gerilimin hızla arttığı tespit edilmiştir ([65], [66]). FGL spiralindeki bölmelerde çok daha düşük konsantrasyon değerlerine rastlanması, yine Bagnold’un normal gerilim değeriyle açıklanabilmektedir. Bu kuvvetler palpın seyrelmesinde yol açtığından spiral yüzeyi üzerinde tabakalanma oluşmasına yardımcı olduğu düşünülmektedir [16].

5.3. Sallantılı Masa

Yaş zenginleştirme masaları, eğimli bir yüzeyde akan sıvı filmi yardımıyla hafif minerallerin suyla birlikte sistemden uzaklaştırılırken ağır minerallerin masanın yüzeye çökmesi prensibine göre ayırım yapan ekipmanlardır. İlk modern sallantılı masa 1896'da Wilfrey tarafından geliştirilmiştir [67].

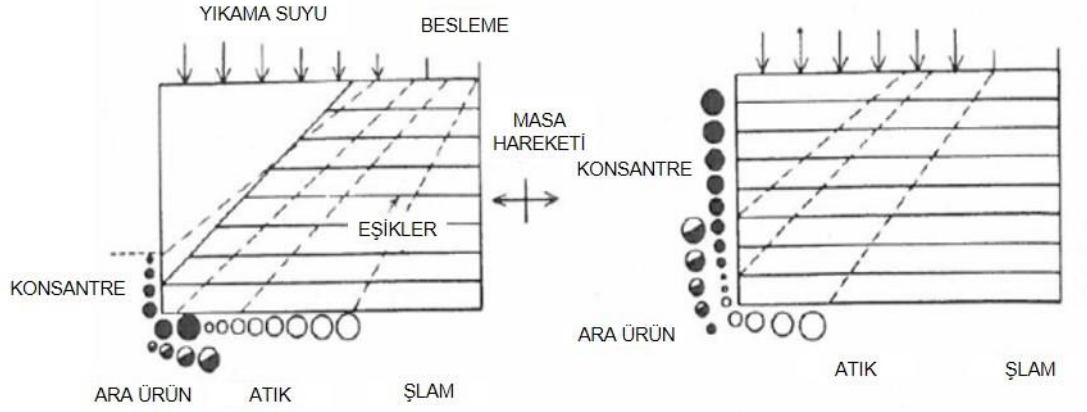
Sallantılı masalarda masanın köşesinden verilen besleme suyu ve ortasından verilen yıkama suyu ile masa yüzeyinde akan sıvı filmi elde edilir. Masanın yüzeyine sabitlenmiş farklı sayı ve yükseklikteki eşikler, masanın ileri geri asimetrik salınım hareketinin de etkisiyle çöken tanelerin tabakalanmasına yardımcı olur. Besleme masaya %25 katı oranlarında verilir. Masanın eğimi, masanın salınımı ve yıkama suyunun da etkisiyle ağır taneler masanın kısa kenarından, ara ürün masanın köşesinden, atıklar ise masanın uzun kenarından alınır [67].

Sallantılı masalarda etkili bir ayırımın gerçekleştiği ortalama tane boyu 500 μm , en ince boy ise 50 μm 'dur. Ancak 100 μm 'dan ince taneleri zenginleştirmek için yüzeyi özel olarak tasarlanan şlam masaları bulunmaktadır [67].

Sallantılı masalarda etkili bir ayırım gerçekleştirebilmek için bazı koşullara dikkat etmek gerekmektedir. Bunlardan biri, beslemenin % katı içeriğini %35'in altında tutmaktır. Düşük katı içeriği çok ince tanelerin atığa gitmesine sebep olabilirken ayırımı olumsuz yönde etkilemez. Etkili bir ayırım için yıkama suyu da optimum düzeyde tutulmalıdır. Her besleme malzemesine özel masa eğimi vardır. Beslemenin içeriği önemli ölçüde değişmediği sürece masanın eğiminin değiştirilmesi önerilmez. Beslemenin tane boyu ve yoğunluğu değiştikçe, ürün bandının genişliği de değişmektedir. Hafif taneler akan sıvı filminden daha fazla etkilenirler [34].

Sallantılı masaların yüzeylerinde bulunan eşiklerin tasarımı, tanelerin yoğunluğuna göre, bazı durumlarda da boya göre tabakalanmasında büyük rol oynar [68]. Şekil

5.8’de farklı tasarımdaki sallantılı masalarda zenginleştirilen tanelerin masa yüzeyine dağılım düzenini görmek mümkündür.



Şekil 5.8. Farklı tasarımdaki sallantılı masalarda tanelerin yoğunluk ve tane boyuna bağlı dağılımları [59]

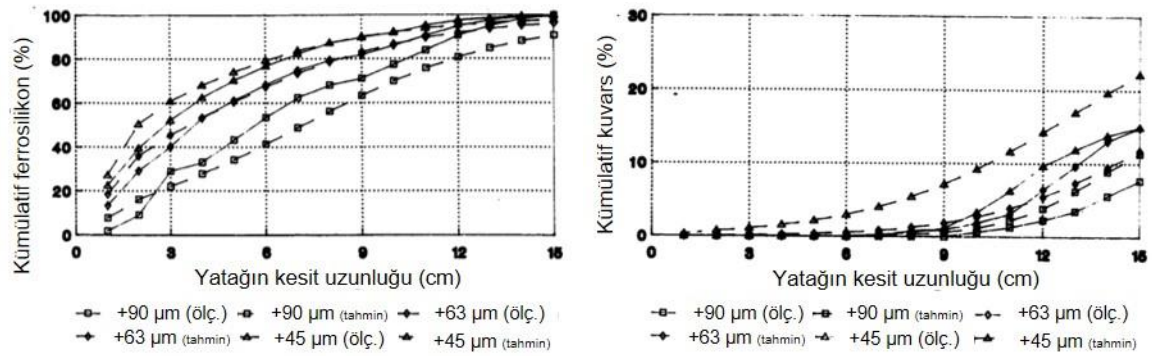
Sallantılı masada tanelerin ayrımı sırasında birçok farklı mekanizma devreye girer, bu sebeple de fiziksel olarak matematiksel modellemesinin yapılması zordur. Yaygın olarak uygulanan yöntem, deneysel verilerin regresyon analizine dayanılarak modellenmesidir [68], [69].

Sallantılı masa modellemesiyle ilgili Manser (1986) ve Luo (1986)’nın yaptığı çalışmalar bulunmaktadır [70], [71]. Razali ve Veasey (1990)’in yaptığı deneysel çalışmalarda sallantılı masada oluşan konsantre bandının pozisyonunun temel belirleyicisinin masanın eğimi olduğu sonucuna ulaşılmıştır [72]. Tucker (1990)’ın sallantılı masada yaptığı çalışmada ise daha hafif tanelerin, yoğun taneler tarafından itilerek konsantre bandından uzaklaştırıldığı gözlenmiştir [73]. Tucker, ürünlerin sallantılı masadan çıkış pozisyonlarına göre bir model geliştirmiştir. Bu modeli geliştirirken tane boyu ve yoğunluğu esas alınmıştır. Sallantılı masanın kenarlarından ayrılan ürünlerin özelliklerine göre kümülatif verimi gösteren bir model hazırlanmıştır. Manser (1991) de Tucker’a benzer bir yöntem izlemiştir [34]. Ferrosilikon, ilmenit ve kuvarstan oluşan suni bir karışım kullanarak sallantılı masada deneyler yapılmıştır. İkinci dereceden denklemler kullanılarak, tane boyu ve mineral yoğunluğu gibi model parametreleri oturtulmaya çalışılmıştır. Bu eşitlikler

her ne kadar verim konusunda iyi tahminde bulunsalar da konsantre tenörünü tahmin etme konusunda aynı şey geçerli değildi. Rao (2004), Weibull eşitliğinden yararlanarak tane boyu ve yoğunluk sınıflarına göre verim hesabı geliştirmiştir [74]. Bu model yalnızca sallantılı masalar için değil, diğer yerçekimi ile ayırım ekipmanları için de kullanılabilir bir model olmuştur. Ancak bu model, beslemedeki değişiklikleri ya da işletim parametrelerindeki değişiklikleri tanımlamamaktadır. Bahsi geçen modellerin hepsi, beslemenin tane boyu ve yoğunluğuna bağlı olarak ayrılmasına göre oluşturulmuştur [68].

5.3.1. Sallantılı masalar ile yapılan uygulamalar

Sallantılı masaya etki eden işletim parametrelerini belirlemek amacıyla Manser (1991) tarafından Wilfley masasına suni bir karışım beslenerek deneyler yapılmıştır [34]. Suni karışımda konsantre olarak ferrosilikon, ara ürün olarak ilmenit ve atık olarak kuvars almak üzere bahsi geçen mineraller karıştırılarak suni besleme kullanılmıştır. İşletim parametreleri olarak; masanın eğimi, yıkama suyu, besleme hızı, besleme tenörü, beslemenin palp yoğunluğu, masanın hızı ve genliğinin ayrıma etkisi incelenmiştir. Bir parametrenin etkisini incelerken diğer parametreler sabit tutulmuştur. Masanın belirli noktalarından alınan örneklerin tane boyuna bağlı verim sonuçları hesaplanmıştır. (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Sallantılı masada ferrosilikon (solda) ve kuvars (sağda) minerallerinin tane boyuna bağlı yataktaki değişimi [34]

Elde edilen sonuçlar kullanılarak, ürün çıkışlarını standart olarak belirleyebilmek için matematiksel bir model geliştirilmek istenmiştir. Polinom, Rosin-Rammler, Rao, Weibull, Erasmus ve Logistic fonksiyonları modelleme için denenmiştir. Son üç model iyi sonuç vermesine karşın, daha az model sabiti bulunduğu ve tahmini daha kolay yapılabildiğinden *Logistic fonksiyonu* (Denklem 19) tercih edilmiştir [34].

$$y_i = \frac{a_3}{1 + \exp(-(a_1 + a_2(x'_i)))} \quad (19)$$

y_i : kümülatif yüzde

x'_i : x_i (yatağın kesit uzunluğu) -1

a_1 : ölçek faktörü

a_2 : şekil faktörü

a_3 : yukarı asimptot

a_1 , a_2 ve a_3 faktörleri tane boyu ve yoğunluğa göre ilişkilendirilmiştir. a_1 'in genellikle tane boyu ve yoğunluk arttıkça düştüğü gözlemlendiğinden Denklem 20'deki gibi bir ilişki oluşturulmuştur:

$$\rho = k_1 + k_2 \cdot \exp(k_3(-a_1)) \quad (20)$$

k_1 : 2.2 g/cm³ (minimum yoğunluk, eğrinin asimptotu)

k_2 : 0.0585d + 0.8224

k_3 : 0.3716 ln(d) - 2.0406

ρ : yoğunluk (g/cm³)

d: tane boyu (mikron)

a_2 eğrinin eğilimini belirlemekte, yoğunluk ve tane boyuyla belirgin bir ilişkisi bulunmamaktadır. a_1 ile ilişkili olduğundan yola çıkılarak Denklem 21'deki eşitlik ortaya konmuştur:

$$a_2 = k_7 + k_8(-a_1)k_9 \quad (21)$$

$$k_8 = 0.0095$$

$$k_9 = 2.785$$

k_7 = optimize edilen parametre

Konsantre kenarında temsil edilen en yüksek verim a_3 ile gösterilmektedir. Bu veri, yoğunluk arttıkça ve tane boyu küçüldükçe artmaktadır. a_3 ile ilgili eşitlik Denklem 22'deki gibidir:

$$a_3 = \frac{k_4}{1 + \exp(-(k_5 + k_6\rho))} \quad (22)$$

$$k_4 = 101.7 \text{ (eğrinin yukarı asimptotu)}$$

$$k_5 = -7.229$$

$$k_6 = 10/\ln(d)$$

Oluşturulan bu model her ne kadar geçerli olsa da bazı durumlarda geçerliliğini yitirmektedir. Örneğin düşük tenörlü beslemelerde dar konsantre bandı oluşacağından bu modeli kullanmak doğru tahminlerde bulunmayı zorlaştıracaktır [34].

Fitzpatrick (2016) Wilfley sallantılı masası kullanarak yaptığı çalışmada, sallantılı masanın performansının belirlenmesinde kullanılan modellerden yola çıkarak, beslemenin kantitatif mineralojik analizine dayalı yeni bir model geliştirmeyi hedeflemiştir [68]. Beslemede oluşacak değişikliklerin ayırım üzerindeki etkisini görme amacıyla yapılan test çalışmalarında, serbest halde bulunan volframit (7.3 gr/cm³), garnet (4.3 gr/cm³), olivin (3.4 gr/cm³) ve silis (2.65 gr/cm³) mineralleri kullanılarak suni bir karışım hazırlanmıştır. Deneyler esnasında beslemedeki volframit tenörü %0.5 ve %2.5 olacak şekilde ayarlanmış, garnet ve olivinin oranı ise %0 ve %5 olarak belirlenmiştir. Sallantılı masanın 6 farklı çıkışından örnekleme yapılmış, her örnek QEMSCAN analizine tabi tutulmuştur [68].

Deneylerde Tucker modeli kullanılmıştır [73]. Model, konsantreye gelen her bir tane boyu / yoğunluk sınıfının %7.5 ve %50'deki kesme noktalarını ($d_{7.5}$ ve d_{50}) tahmin etmek için kullanılmıştır. $d_{7.5}$ ve d_{50} değerleri, konsantrenin kümülatif verim eğrisinin netleşmesini sağlayan noktalardır. Ölçülen ve tahmin edilen $d_{7.5}$ değerleri, birbiriyle uyumlu bulunmuştur. Her bir tane boyu / yoğunluk sınıfının kümülatif verim eğrisi oturabilmesi için hiperbolik tanjant fonksiyonundan yararlanılmıştır. Modelleme çalışmalarından sonra, besleme mineralojisine ait bilgiler kullanılarak tahmini ve ölçülen değerler arasında kıyaslama yapılmıştır. Volframit ve silisten oluşan iki bileşenli beslemenin verim ve tenörleri bu şekilde oldukça iyi tahmin edilebilmiştir [68].

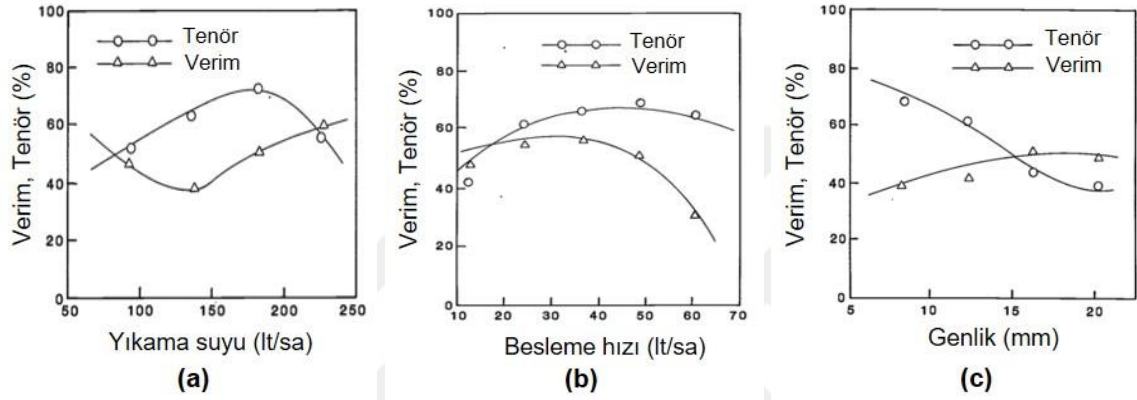
Wang (1993)'in yaptığı çalışmada kuvars-manyetit suni karışımı hazırlanarak ($P_{80} < 50 \mu m$) laboratuvar ölçekli sallantılı masada besleme olarak kullanılmıştır. Tenör ve verimi hesaplamaya yönelik bir model tasarlanmıştır. Besleme karakteristiği ve konsantrenin tenörü kullanılarak sallantılı masa devresinin simülasyon ve optimizasyonunun yapılması hedeflenmiştir [69].

Model oluşturmak için 5 farklı değişkenle (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) 16 deney yapılmış, farklı tenör ve verim değerlerine ulaşılmıştır. Değişkenler; masanın genliği, yıkama suyu, besleme hızı, besleme konsantrasyonu ve masanın eğimidir. Elde edilen verilere dayanarak verim ve tenör için iki regresyon modeli oluşturulmuştur (Denklem 23 ve Denklem 24). Ayrımı etkileyen parametreler birbirinden bağımsız olduğundan, doğrusal olmayan regresyon modelleri kullanılarak verim ve tenör sonuçlarına ulaşılabilmektedir [69].

$$Verim(x_1, \dots, x_5) = -28.32 + 66.02 x_1 + 6.60 x_2 - 14.85 x_4 + 13.32 x_5 - 13.75 x_1^2 - 4.01 x_5^2 + 4.88 x_1 x_3 + 3.49 x_1 x_5 - 5.95 x_2 x_3 + 5.41 x_2 x_4 - 2.57 x_2 x_5 \quad (23)$$

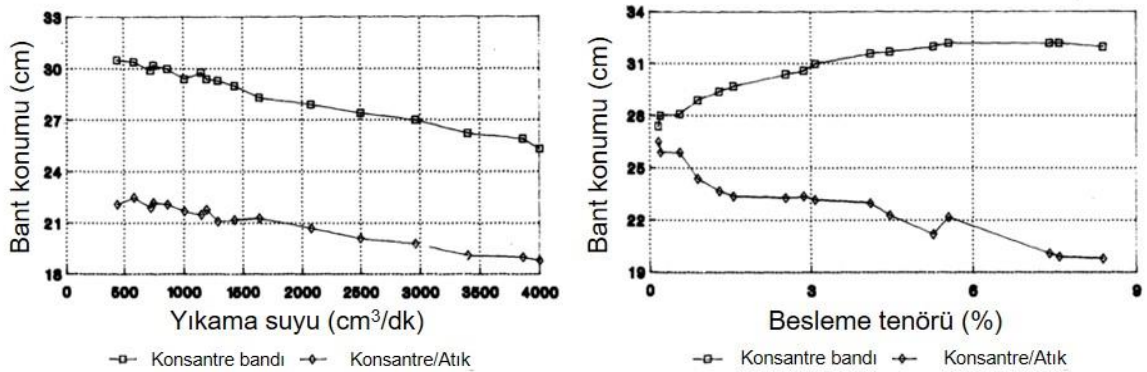
$$Tenör(x_1, \dots, x_5) = 58.03 + 11.45 x_4 - 1.6 x_1^2 - 0.23 x_2^2 - 2.50 x_4^2 + 0.72 x_3 x_5 \quad (24)$$

Elde edilen sonuçlara göre masanın genişliği arttıkça konsantrenin tenörü düşerken verimin düzgün şekilde arttığı gözlenmiştir (Şekil 5.10). Yıkama suyunun hızı 190 lt/sa'e kadar arttıkça konsantre tenörü sabit olarak artmış, bu su hızından daha yüksek hızlarda ani tenör düşüşü yaşanırken verim ters orantılı olarak yükselmiştir. Yüksek besleme hızının ayırım üzerinde olumsuz etkisi olduğu görülmüştür. Sallantılı masadaki ayırımı etkileyen bu üç değişkenin birbirinden bağımsız olduğu ve birbirleriyle doğrusal olmayan ilişkiler sergilediği tespit edilmiştir [69].



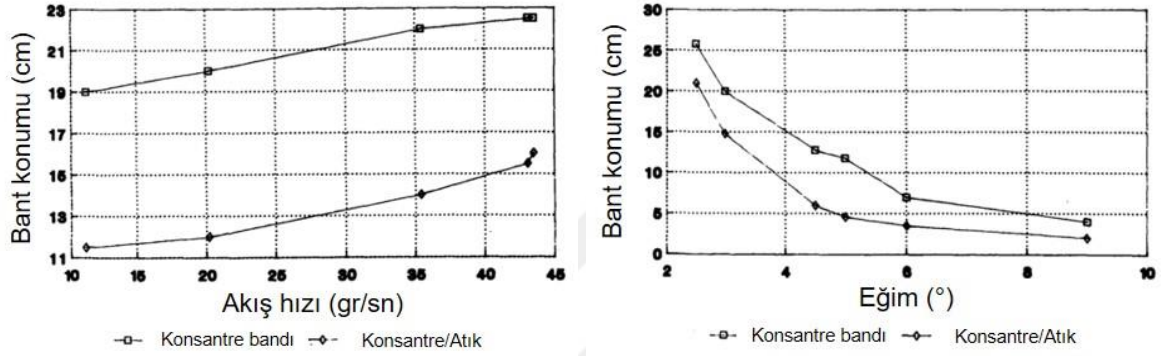
Şekil 5.10. Yıkama suyu (a), besleme hızı (b) ve masanın genişliğinin (c) sallantılı masadaki ayırma etkisi [69]

Manser (1991)'in sallantılı masa ile yaptığı çalışmada yıkama suyu hızı arttıkça konsantre bandının genişliğinin azaldığı (Şekil 5.11) ve yönünün atık çıkışına doğru kaydığı gözlenmiştir [34].



Şekil 5.11. Yıkama suyu (solda) ve besleme tenörünün (sağda) konsantre bandının konumuna etkisi [34]

Yine Şekil 5.11’de görüldüğü gibi besleme tenörü arttıkça konsantre bandı masanın üst kısmına doğru ilerlemekte ve konsantre bandı genişlemektedir. Palp yoğunluğunun, konsantre bandı pozisyonuna etkisi bulunmamakla birlikte bandın genişliğinin hızlıca daralmasına sebep olmaktadır. Besleme %30–35 katı içeriğinin üstüne çıkıldığında verimin düştüğü görülmüştür [34].

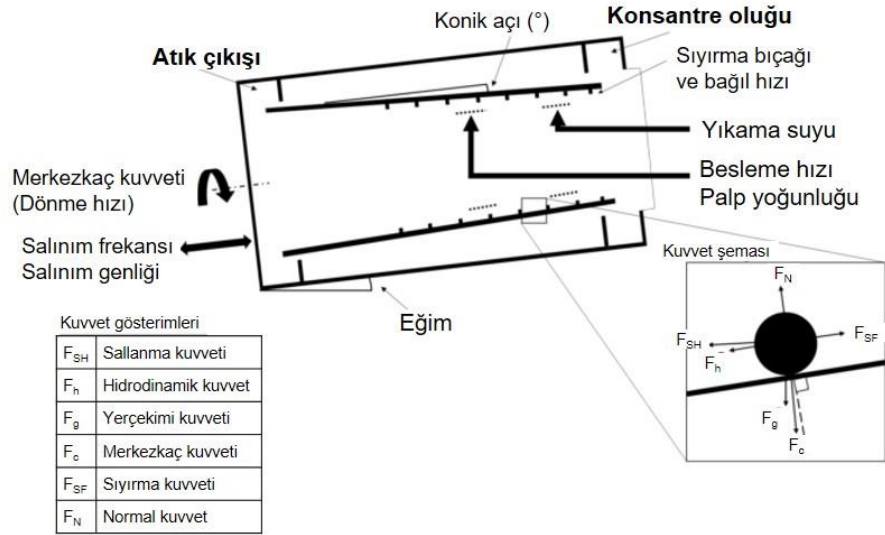


Şekil 5.12. Besleme hızı (solda) ve masanın eğiminin (sağda) konsantre bandının konumuna etkisi [34]

Besleme hızı arttıkça konsantre bandının masanın üst kısmına doğru ilerlediği, masanın eğiminin artmasıyla ise konsantre bandının atığa kaydığı gözlenmiştir. Bu deneylerde en geniş konsantre açıklığı 4.5°–5.5° eğim aralığında görülmüştür [34].

5.4. MGS (Yüksek Yerçekimli Ayırıcılar)

MGS ekipmanı 1980’lerin sonunda, ince boydaki ağır minerallerin kazanımı için tasarlanmıştır. Ekipmanla ilgili çok sayıda değişen olduğu için, MGS ile ilgili çoğu modelleme çalışması optimum koşulların belirlenmesinde kullanılan regresyon analizlerinden oluşmaktadır [75]. Şekil 5.13’te MGS ile ilgili çeşitli işletim ve tasarım parametreleri gösterilmektedir.



Şekil 5.13. MGS'nin işletim ve tasarım değişkenleriyle taneye etki eden temel kuvvetler [75]

Yerçekimi ile zenginleştirme işlemlerinde ince tane boylarını ($-100 \mu m$) zenginleştirmek kolay değildir. Özellikle suyla ayırım yapan yerçekimiyle zenginleştirme ekipmanlarında, ince taneler, suyun akış hızının uyguladığı kuvvete karşı durmakta zorlanmaktadırlar. MGS'nin çalışma esası, geleneksel olarak kullanılan yerçekimiyle ayırma ekipmanlarına alternatif oluşturmakta ve tanelerin yoğunluğuna bağlı merkezkaç kuvveti oluşmasına ortam hazırlayarak ayırım yapılmasını sağlamaktadır [76].

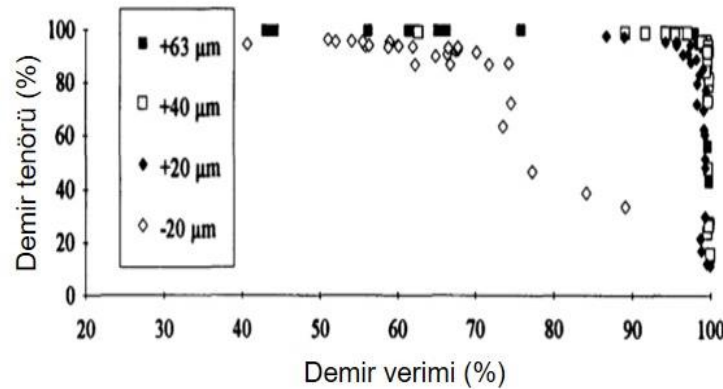
Dönen bir tambur ve ağır tanelerin hareketini sağlayan salınım hareketiyle, ekipmanın saatte 2 tona kadar malzeme işleme kapasitesi vardır. Besleme, tamburun içerisine palp halinde kesintisiz olarak verilir. Beslemeden dolayı oluşabilecek türbülansı engellemek amacıyla tambura entegre ızgaralar vardır ve besleme bunun üzerinden yapılır. Besleme, tambur yüzeyinde spiral şeklinde ilerler. Ağır taneler, palpın oluşturduğu filmi delerek tambur yüzeyine yakın kısımda konumlanırlar. Tamburun ileri geri salınım hareketiyle tambur yüzeyinde ilerleyen ağır taneler, beslemeye ters yönden konsantre olarak alınır. Palpın üzerinde konumlanan hafif taneler ise yıkama suyuyla birlikte, konsantre çıkışına ters yönden atık olarak alınırlar. Ekipmandaki salınım hareketi, tambur yüzeyinde oluşan tabakaları hareket ettirerek tabakalar arasında oluşan kaçakların azalmasına yardımcı olur. MGS'de tek bir tane üzerine uygulanan merkezkaç kuvveti, sallantılı

masada uygulanan yerçekimi kuvvetinden çok daha büyük olduğundan, prensipte MGS'lerin çok daha yüksek performansta ayırım yapmaları beklenmektedir [76].

5.4.1. MGS ile yapılan uygulamalar

MGS'deki işletim parametrelerinin performans üzerine olan etkisini görebilmek amacıyla Traore (1995), suni karışım kullanarak deneyler yapmıştır. Tane boyu 80 μm 'dan ince, tenörü %13.6'lık ferrosilikon numunesi besleme olarak kullanılmıştır. 45 kg/sa'lik hızla MGS'ye besleme yapılmış, sistemin dengeye gelmesi için bir saatlik bekleme süresinden sonra numune alma işlemi gerçekleştirilmiştir [76].

Yapılan deneylerde MGS'de ayırım için ideal boyun 40 μm 'dan iri taneler olduğu ortaya konmuştur (Şekil 5.14). -40+20 μm tane boyu aralığında performansta bozulmaların yaşanmaya başladığı görülürken, 20 μm 'dan ince tanelerde performansın iyice düştüğü gözlenmiştir [76].



Şekil 5.14. Suni beslemenin çeşitli tane boylarında MGS'deki performansı [76]

Aynı ekipmanda tungsten cevheri kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda ise %0.3 WO_3 tenörüne sahip 100 μm 'dan ince besleme kullanılmış; tamburun dönme hızı, genlik ve frekansın performansa olan etkisi incelenmiştir [76].

Çalışmalar sonucunda genlik ve frekansın konsantre tenörü ve verimi üzerine önemli bir etkisinin bulunmadığı görülürken, bu çalışma için ideal genlik değeri 15 mm, ideal frekans değeri 5.5 Hz, tambur hızı ise 168 rpm olarak tespit edilmiştir. MGS'de performansı etkileyen asıl parametrelerin ise yıkama suyunun hızı ile tamburun eğimi olduğu görülmüştür. Yıkama suyunun optimum hızı 5 lt/dk olarak belirlenmiştir. Tamburda eğim arttıkça verimin düştüğü ancak tenörün arttığı bilinmektedir. Ancak fazla eğim, değerli ağır minerallerin süpürülmesine neden olacağından dikkatli çalışılması gerekmektedir [76].

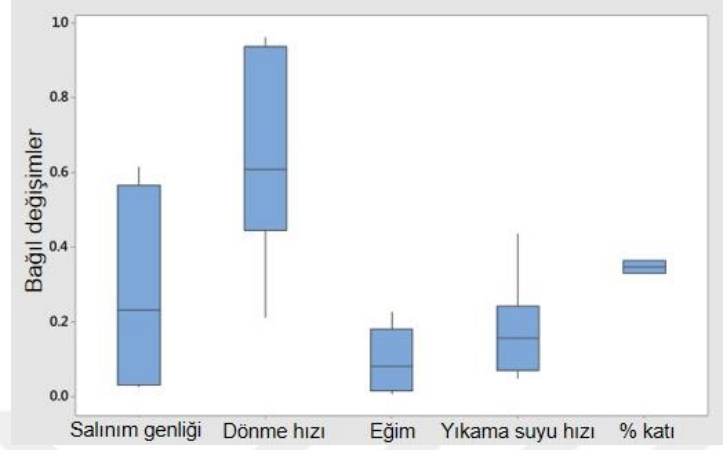
Cevher zenginleştirme tesislerinde %1, %2'lik verim ya da tenör artışları çok ciddi ekonomik getiriler sağladığından tesisin optimizasyonunun doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir [46].

Aslan (2007)'nın yaptığı çalışmada, MGS ekipmanında selestit (SrSO_4) konsantresi üretimini simüle edebilmesi için MGS'nin bazı işletim parametreleri, üç aşamalı Box-Behnken faktöriyel tasarımı ve RSM yöntemi birlikte kullanılarak modellenmiş ve optimizasyonu yapılmıştır. Değişken parametreler olarak tamburun hızı, tamburun eğimi ve tamburun salınım genliği gözlenmiş ve modellemede kullanılmıştır. MGS ekipmanındaki optimum verim ve tenörü belirleyebilmek amacıyla MATLAB yazılımında karesel programlama kullanılmıştır [46].

Selestitin verim ve tenörünü belirleyebilmek için ikinci dereceden tepki fonksiyonları oluşturulmuştur. %96.91'lik maksimum SrSO_4 tenörü alınacak şekilde karesel programlama yardımıyla optimizasyon yapıldığında, tambur hızı 150 rpm, tambur eğimi 6° ve genlik de 20 mm olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde %98.35'lik maksimum verime ulaşacak şekilde optimizasyon yapıldığında ise tambur hızı 250 rpm, tambur eğimi 2° ve genlik 10 mm olarak bulunmuştur [46].

MGS ile yapılan çalışmalarda tenör ve verimi etkileyen en önemli parametre olarak tamburun dönme hızı bulunmuştur [46]. Literatürde yer alan çalışmalarda MGS'deki işletim parametrelerinin MGS performansına etkisini nicel olarak sergileyebilmek

için, bağıl değişiklikler R^2 ile modellenerek grafiksel olarak Şekil 5.15'teki gibi kutu diyagramıyla ifade edilmiştir [75].



Şekil 5.15. MGS'deki işletim değişkenlerinin, düzeltilmiş R^2 ölçümüne göre bağıl değişimleri [75]

Şekil 5.15'te görüldüğü gibi MGS'de performansı etkileyen ana parametre tamburun dönme hızıdır. Salınım genliğinin geniş bir skalada etkili olduğu görülmekle birlikte eğim, yıkama suyu ve palp yoğunluğunun etkilerinin oldukça düşük olduğu gözlenmektedir [75].

Fitzpatrick (2017)'in MGS ile yaptığı deneysel çalışmalarda, besleme numunesi olarak $P_{80}=61 \mu\text{m}$ olan düşük tenörlü tungsten içeren ferberit (FeWO_4) cevheri kullanılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde, malzemeyi konsantre olarak alabilmenin en kolay yolunun düşük yıkama suyu hızıyla başlamak olduğu tespit edilmiştir. Bu sayede taneler yatak oluşturacak şekilde çökebilmekte, sonrasında arttırılan su hızıyla birlikte de istenilen nitelikte ürün alınabilmektedir [75].

MGS'nin optimum test koşullarını belirleyebilmek maksadıyla istatistiksel RSM yöntemi kullanılmıştır. Değişken parametreler; tamburun dönme hızı, palp yoğunluğu ve yıkama suyu hızıdır. Seçilen üç işletim değişkeni dışındaki parametreler sabit kabul edilmiştir. Bu değişkenlerle CCRD yöntemi kullanılarak bir

deney programı oluşturulmuştur. Bu deneyler neticesinde Minitab® 17 programında RSM yöntemi kullanılarak MGS modellemesi yapılmıştır [75].

Elde edilen bilgilere göre ayrımı etkileyen en önemli parametrelerin tambur hızı ve yıkama suyu hızı olduğu görülmüştür. Modelleme sonucunda elde edilen grafiklere göre tambur hızı azaldıkça tenörün arttığı gözlenmiştir. Yıkama suyu ve beslemenin katı içeriğinin artmasının tenör üzerine çok az etkisinin olduğu tespit edilmiştir. %38–36 palp yoğunluğunda, tambur hızının yüksek ve yıkama suyu hızının düşük olduğu koşullarda verimin arttığı saptanmıştır [75].

5.5. Falcon / Knelson Zenginleştiricileri

Cevher rezervleri gittikçe daha ince saçınımlı minerallerden oluşmaya başladıkça, bu minerallerin zenginleştirilmesi güçleşmektedir. İnce öğütme, serbestleşme gibi sebeplerden ötürü geleneksel zenginleştirme yöntemleri yetersiz kalmaktadır.

Falcon ve Knelson zenginleştiricileri, yüksek yoğunluklu mineralleri akışkan bir yatakta merkezkaç kuvveti etkisiyle ayırmayı sağlayan, yarıkesikli veya sürekli çalışma gösteren ekipmanlardır ([77], [78]). Knelson zenginleştiricisi her ne kadar altın zenginleştirme yöntemi olarak kullanılmaya başlandıysa da, düşük maliyeti ve çevresel etkisinin az olması sebebiyle düşük yoğunluklu cevherlerin zenginleştirilmesi alanında da incelenmeye başlanmıştır. Bu ekipman kromit, kasiterit, kömür, demir, nadir toprak mineralleri, tantal ve sahil kumları gibi pek çok farklı türün zenginleştirilmesi için denenmiştir [3].

5.5.1. Falcon / Knelson zenginleştiricileri ile yapılan uygulamalar

Falcon ve Knelson zenginleştiricilerinde suni besleme kullanılarak pek çok çalışma yapılmıştır ([79]–[81]). Bunlardan biri, Marion (2017)'un yaptığı çalışmadır [3].

Bu çalışmada 53 µm'dan ince manyetit ve kuvars mineralleri kullanılarak suni bir besleme hazırlanmıştır. %1 tenörlü besleme hazırlanarak Knelson zenginleştiricisinin düşük tenörlü ince cevherlerdeki ayırım performansının incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada çanağın dönme hızı (G), su hızı (lt/dk) ve katı besleme hızı (gr/dk) değerleri ölçülmüştür (x_1 , x_2 , x_3). Üç değişkenin de birbiriyle ilişkisini incelerken Minitab® 17 yazılımı kullanılarak tahminlerde bulunulmuştur. Bunun için kullanılan matematiksel model ise Denklem 25'teki gibidir ([82]–[86]):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \varepsilon \quad (25)$$

y: Tahmini tepki (verim, tenör)

β_0 : Model sabiti

β_1 , β_2 ve β_3 : Doğrusal sabitler

β_{12} , β_{13} ve β_{23} : Vektörel çarpım sabitleri

β_{11} , β_{22} ve β_{33} : İkinci dereceden sabitler

Deneylerden elde edilen gerçek tenör ve verim değerleri kullanılarak ikinci dereceden denklem oluşturulmuştur. Buna göre modellenen tenör (y_1) ve verim (y_2) denklemleri Denklem 26 ve Denklem 27'deki gibidir:

$$y_1 = 56.9 - 2.054x_1 + 6.052x_2 + 0.615x_3 - 1.929x_1^2 - 0.686x_2^2 - 0.098x_3^2 + 0.75x_1x_2 + 0.368x_1x_3 - 0.83x_2x_3 \quad (26)$$

$$y_2 = 40.31 + 8.601x_1 - 4.763x_2 + 0.429x_3 - 4.398x_1^2 - 0.835x_2^2 - 0.187x_3^2 + 2.40x_1x_2 - 0.89x_1x_3 + 0.83x_2x_3 \quad (27)$$

Çanağın dönme hızı, su hızı ve katı besleme hızı verileri, RSM yöntemi kullanılarak grafiğe uyarlanmıştır. Buna göre Knelson zenginleştiricisinde tenörü etkileyen en önemli faktörün su hızı olduğu görülmüştür. Su hızı arttıkça konsantre tenörünün de arttığı gözlenmiştir (~5 lt/dk). Çanağın dönme hızının konsantre tenörü üzerine çok

az bir etkisi olduğu görülmüştür. Yüksek konsantre tenörü elde edebilmek için düşük dönme hızlarının tercih edilmesinin daha uygun olacağı belirlenmiştir (~45–50 G). Besleme hızının ise tenör ve verim üzerinde belirleyici bir etkisinin bulunmadığı görülmüştür [3].

Deneysel çalışmalarda en yüksek tenör değerine 300–350 gr/dk'lık besleme hızıyla, 60 G'lik çanağın dönme hızıyla ve 3.9 lt/dk'lık yıkama suyu hızıyla ulaşılabildiği görülmüştür. En yüksek verim alınacak şekilde değerlendirildiğindeyse besleme hızının 100 gr/dk, çanağın dönme hızının 80 G, yıkama suyu hızının ise 1.1 lt/dk olması gerektiği ortaya konmuştur [3].

Knelson zenginleştiricisinin kuru sistem olarak çalıştırılabileceği Greenwood (2013) ve Kokkilic (2015) tarafından yapılan çalışmalarla da bilinmektedir ([83], [87]). Uygulama sırasında yüksek miktarlarda su harcayan Knelson zenginleştiricisinde kuru beslemenin, su olmadan, hava ortamında ayırımın sağlanabilmesi maksadıyla Zhou (2016) tarafından da bir çalışma yapılmıştır [86].

Modelleme ve optimizasyon için, en yaygın kullanılan RSM yönteminden olan, merkezi kompozit tasarımı (CCD) tercih edilmiştir. CCD'nin kullanım amacı; bağımsız değişkenler ($x_1, x_2, \dots, x_n$) ile tahmini tepki (y) arasındaki ilişkiyi incelemek ve değişkenler arasındaki olası etkileşimlerle bunların ayırım performansı üzerine etkilerini belirleyebilmektir. Optimize edilen bağımsız değişkenler (x_1, x_2, x_3); motor gücü (%), hava basıncı (psi) ve katı besleme hızı (gr/dk); tahmini tepki (y) ise tungsten verimidir [86].

Değişkenlerle tahmini tepki arasındaki matematiksel ilişkiyi kurgularken Denklem 25'te verilen ikinci dereceden model kullanılmıştır. İkinci dereceden regresyon modelini oluşturmak için deneysel verilerden yararlanılarak Varyans Analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Model doğrulandıktan sonra değişkenlerin birbiriyle etkileşimlerini görebilmek için Student's t-test kullanılmıştır [86].

Yapılan deneylere göre değişkenlerin önem sıralaması en yüksekten en düşüğe doğru sırasıyla motor gücü, hava basıncı ve katı besleme hızdır. Knelson zenginleştiricisinde beslenen tane boyu küçüldükçe motor gücünün artması gerekmektedir. Tane boyu küçüldükçe yerçekimi ile zenginleştirmede verim düşmektedir. Merkezkaç kuvveti ve akışkan ortam artırılarak bu problemin üstesinden gelinebilmektedir [88].



6. DOĞRUSAL DEVRE ANALİZİ

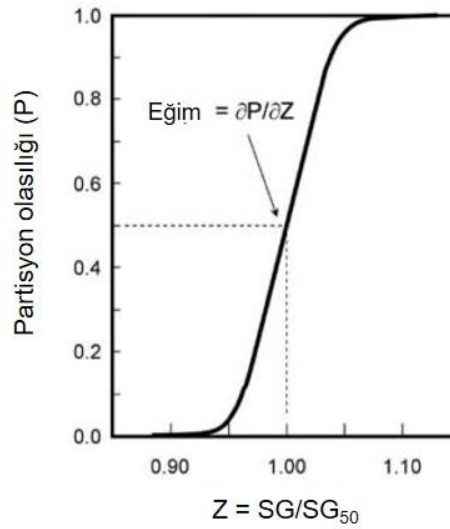
Yerçekimi ile ayırım süreçleri, ağır mineral kumlarını bir veya daha fazla değerli ürüne dönüştürmek için kullanılan rutin yöntemlerdendir. Endüstriyel tesisler, bu ürünlerin tenör ve verimlerini yükseltmek amacıyla, yerçekimi ile ayırım ekipmanlarını birbirini takip edecek şekilde bünyesinde bulundurur. Tesislerde genellikle süpürme ve yıkama devrelerinde bunun örnekleriyle karşılaşılmaktadır. Eğer devre içerisinde gerekli koşulları sağlamayan akış kolları olursa, bu akışlar devrenin başka kollarıyla birleştirilerek yeniden işlemde geçmeleri sağlanır. Yeniden yönlendirilen akış kolları çoğunlukla isteğe bağlı olmaktadır. Benzer tenördeki akışlar birleştirilebileceği gibi, kapasiteyi arttırmak amacıyla bölünerek başka akışlara da yönlendirilebilmektedir. Tesisteki devre elemanları, satılabilir ürün çıkarmaya yönelik ya da beslenen malzemenin kalitesine göre değişiklik gösterebilmektedir. Tesis tasarımıyla ilgili alınan birçok kararda temel mühendislik ve zenginleştirme prensipleri ne yazık ki çoğu zaman göz ardı edilmektedir. Bu şekilde zayıf tasarlanmış tesisler verimsiz çalışmakta, daha pahalı işletim ve bakım masraflarına yol açmaktadırlar [89].

Çok kademeli yerçekimi ile ayırma devrelerinin tasarımındaki en önemli tesis mühendisliği araçlarından birisi *doğrusal devre analizi yöntemi*dir. Bu teknik, birden fazla zenginleştirme ünitesinin olduğu işletim koşullarında, ayırım verimini maksimize etmek için gerekli olan koşulları matematiksel yaklaşım kullanarak göstermektedir. Devre analizi ilk olarak Meloy (1983) tarafından, farklı ayırım ekipmanlarındaki bağıl verimliliği kıyaslamak için kullanılmıştır [90]. Bu yaklaşım daha sonraları endüstride, kömür spirallerinin ve manyetik ayırıcıların işletim performanslarını arttırmak amacıyla da kullanılmıştır ([91], [92]).

Cevher zenginleştirmedeki doğrusal analiz devrelerinde, ürünün değerli cevher ya da atık kollarına gitme olasılığı, taneler arası etkileşimin olmadığı düşünülerek hesaplanmaktadır. Buna göre, örneğin; devrenin besleme kapasitesi iki veya üç katına çıkarılsa bile ürünlerdeki tane dağılımının karakteristiğinde bir değişiklik olmadığı varsayılır. Gerçekte bu mümkün değildir, çünkü besleme hızındaki

değişiklikler ayırım özelliğinin değişmesine sebep olmaktadır. Ancak tesis tasarlarken, belli bir kapasiteye göre hesaplama yapılır ve o devrenin kaldırabileceği kadar geniş ekipmanlar seçilerek devre tamamlanır. Bu sebeple, tasarım aşamasındaki devrenin doğrusal olduğu kabul edilir ([89], [90]).

Doğrusal devre analizinde konsantrenin beslemeye oranı (C/F), olasılık fonksiyonu olan P ile tanımlanır. P , taneleri bir ya da daha fazla fiziksel özelliğe göre seçerek yüksek yoğunluklu konsantreye gitme olasılıklarını değerlendirir. Yoğunluğa bağlı ayrımlarda P , partisyon eğrisinden ampirik olarak kestirilir [7]. Bahsi geçen partisyon eğrisi, normalleştirilmiş özgül ağırlık oranının (Z) SG/SG_{50} olarak verildiği durumda, farklı değerlere karşılık gelen olasılık fonksiyonunu (P) ifade eder (Şekil 6.1). Daha dik bir partisyon eğrisi daha keskin olan bir ayırımı ifade ettiğinden, $Z=1$ ve $P=0.5$ durumundaki eğrinin eğimi bu yöntemde ayırım keskinliğini tespit etmek için kullanılmaktadır. Matematiksel olarak, C/F 'nin Z 'ye göre türevini alarak eşitlikler oluşturulmaktadır [89].



Şekil 6.1. Yoğunlukla ayırım yapan ekipmanların genel olasılık dağılım fonksiyonu [89]

Bir ve birden fazla ünitelerden oluşan devrelerin matematiksel değerlendirmesi yapıldığında, doğrusal devre analizinin yalnızca devrede süpürme ile yıkama üniteleri birlikte olduğunda ve atık kolları her seferinde bir önceki devrenin beslemesi

olacak şekilde sisteme geri döndürüldüğünde ayırım keskinliğini arttırmaya yönelik kullanılabilen bir yaklaşım olduğu görülmektedir. Atık kollarını devreye geri döndürmek, kaçan tanelerin yeniden kazanılma şansını arttırdığından partiyon eğrisini dikleştirilmekte yani daha iyi bir ayırım olmasını sağlamaktadır. Ana süpürme ve temizleme devrelerinden türeyen akış kollarının başka birimlere yönlendirilmesinin ayırım verimliliği üzerine olumlu bir etkisi bulunmamıştır. Pratikteki tesis uygulanmalarında her ne kadar birçok ekipman kullanılarak tasarlanan karmaşık devreler, işlenen malzeme kapasitesini arttırmak için kullanılıyorsa da, bu tercih işletim kaynakları ile ekipman maliyeti ve bakım/onarım masraflarını da beraberinde arttırmaktadır [89].

Ayırım verimliliği / Ayırım Performansı:

Cevher zenginleştirmede kullanılan her bir ekipmanın kendine özgü ayırım olasılık fonksiyonu (R) vardır. Her bir fonksiyon kendine özgü olmakla birlikte, çoğu durumda S biçiminde grafik verecek şekilde ayırım fonksiyonları oluşur (Denklem 28):

$$R = \frac{e^{-KZ}}{e^{-KZ} + e^{KZ}} \quad (28)$$

Z'nin ağır ortam koşulları için bağımsız bir değişken olduğu düşünülürse, Denklem 29'a göre hesaplama yapılabilir:

$$Z = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \quad (29)$$

ρ_s katı tanelerin özgül ağırlığını, ρ_f ise sıvının özgül ağırlığını gösterirken, Z birimsizdir. Z'nin sıfır olduğu noktadaki olasılık fonksiyonu 1/2'ye eşittir. K sabiti ise eğrinin eğimini vermektedir [89].

Verim ve tenör değerleri her zaman ayırımın niteliğini ölçmede yeterli olmayabilmektedir. Özellikle birden fazla aşamaya sahip zenginleştirme sonuçlarını değerlendirirken ayırım performansı (E) değerini kullanmanın daha sağlıklı olacağı Schulz tarafından yapılan çalışmayla açıklanmış, Denklem 30'da verilen eşitlik şeklinde ifade edilmiştir [93]. Bu yaklaşım sonraları pek çok yerçekimiyle ayırım ekipmanı için tercih edilmiştir [94], [62], [95], [96].

$$E = R \left[1 - \frac{f(c_{max}-c)}{c(c_{max}-f)} \right] \quad (30)$$

R: Verim

f: Besleme tenörü

c: Konsantre tenörü

c_{max} : Maksimum konsantre tenörü

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez kapsamında, yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarından olan sallantılı masa, spiral zenginleştirici, Falcon zenginleştiricisi ve MGS (Yüksek Yerçekimi Ayırıcılar) gibi ekipmanlarda, zenginleştirilen ürünün tane boyuna bağlı ayırım performansları test edilmiştir. Çalışmalardan elde edilen tenör, tenör yükseltgeme oranı (TYO), ağırlık (W), verim (R) ve ayırım performansı (E) gibi veriler birbiriyle kıyaslanmıştır.

Sonuçlarda doğrudan konsantre tenörlerinin kıyaslanması yerine, besleme tenöründe oluşan farklılıkları ortadan kaldırıp daha doğru bir kıyaslama yapılmasına olanak sağladığı için tenör yükseltgeme oranlarının (TYO) kıyaslanması tercih edilmiştir. Konsantre tenörünü besleme tenörüne oranlayarak TYO değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca doğrudan verim (R) değerlerinin kıyaslanmasının ötesinde, Denklem 30'da gösterilen şekilde hesaplanan ayırım performanslarının (E) birbiriyle kıyaslanması daha uygun bulunmuştur.

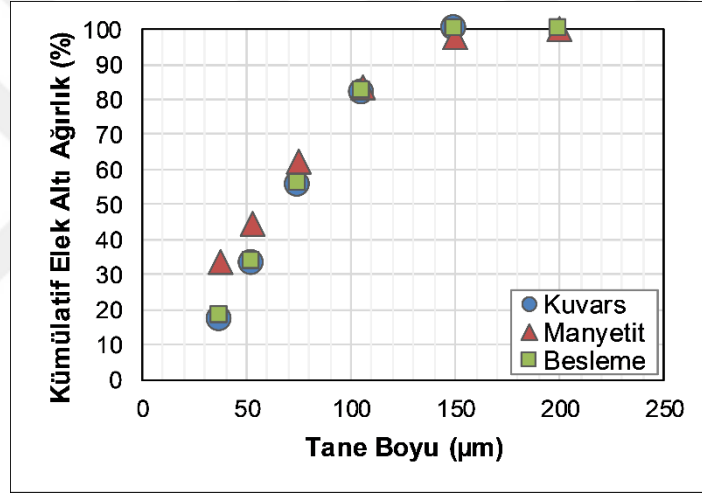
Deneysel çalışmalar; RWTH Aachen Üniversitesi cevher zenginleştirme birimi (AMR) laboratuvarları, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü cevher hazırlama laboratuvarları ve Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü cevher zenginleştirme laboratuvarları ile Sivas'ın Yellice bölgesinde yer alan Aksu Madencilik A.Ş.'ye ait bir kromit zenginleştirme tesisinde yapılmıştır.

7.1. Numune Özellikleri

Laboratuvarlarda gerçekleştirilen testlerde manyetit-kuvars suni karışımı besleme olarak kullanılırken, tesis çalışmasında değirmen çıkışı kromit cevheri besleme olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin özellikleri ile uygulanan analiz yöntemleri Numune-I, Numune-II ve Numune-III başlıkları altında detaylıca incelenmiştir.

7.1.1. Numune-I

Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan sallantılı masa (Masa_B) ve spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile MTA laboratuvarlarında bulunan MGS ekipmanında gerçekleştirilen ayırım testlerinde suni besleme kullanılmıştır. Deneylerde, yerçekimi ile zenginleştirme yapan bir tesisten alınan nihai manyetit numunesi ile kuvars numunesi karıştırılarak, %5 tenörlü suni beslemeler hazırlanmıştır. Manyetit ve kuvars numunesi ile beslemeye ait tane boyu dağılımları 200 μm , 150 μm , 106 μm , 75 μm , 53 μm ve 38 μm 'luk elekler kullanılarak yaş elek analizi yöntemiyle belirlenmiştir (Şekil 7.1).



Şekil 7.1. Kuvars, manyetit ve besleme numunesine ait tane boyu dağılımları

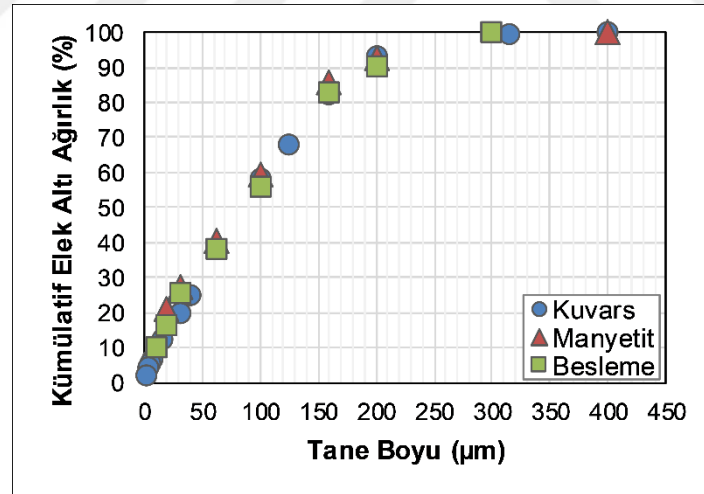
Kuvars ve manyetitin tane boylarının birbirine yakın seçilmesine özen gösterilmiştir. Buna göre yaklaşık %34'ü 38 μm 'dan ince olan $d_{80} = 85 \mu\text{m}$ manyetit ile %17'si 38 μm 'dan ince olan $d_{80} = 87 \mu\text{m}$ 'luk kuvars numunesi suni besleme oluşturulmak üzere karıştırılmıştır.

Piknometreyle yapılan ölçümler sonucunda manyetit numunesinin yoğunluğu 4.87 gr/cm^3 , kuvars numunesinin yoğunluğu da 2.63 gr/cm^3 olarak bulunmuştur. Titrasyon yöntemine göre manyetit numunesinin %95.00 oranında Fe_3O_4 içerdiği tespit edilmiştir.

Tane boyuna bağılı ayırım performanslarını değerlendirebilmek için tüm deneylerde yaş elek analizi yapılmıştır. Bütün fraksiyonlar analiz için MTA'ya gönderilmiştir. Numuneler 105°'de kurutulduktan sonra Termo ARL marka XRF cihazıyla manyetit analizleri yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarının tane boyu bazındaki kütle dengliği JKSİmMet yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

7.1.2. Numune-II

RWTH Aachen Üniversitesi Cevher Zenginleştirme Bölümü (AMR) laboratuvarında bulunan sallantılı masa (Masa_B) ve Falcon zenginleştiricisinin kullanıldığı zenginleştirme çalışmalarında suni besleme kullanılmıştır. Deneylerde kuvars ve manyetit numuneleri kullanılarak %1 ve %5 manyetit numunesi içerecek şekilde beslemeler hazırlanmıştır.



Şekil 7.2. Kuvars, manyetit ve besleme numunesine ait tane boyu dağılımları

Deneylerde, Quarzwerke şirketinden alınan W3 kodlu tane boyu karakteristiğine sahip kuvars numunesi kullanılmıştır. W3 kodlu kuvars numunesinin tane boyu dağılımı Şekil 7.2'de verilmektedir. Kuvars numunesinde $d_{95} = 220 \mu\text{m}$, $d_{80} = 155 \mu\text{m}$ ve $d_{50} = 90 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir ve numunenin ağırlıkça %14.3'ü $20 \mu\text{m}$ 'un altındadır.

Kuvars numunesinin katalog değerlerine göre numunenin yoğunluğu 2.65 gr/cm³tür ve kimyasal analiz içerikleri Çizelge 7.1'deki gibidir. Numunenin ateşte kayıp (LOI) değeri 1000°C'da %0.25, nem değeri ise %0.1'dir.

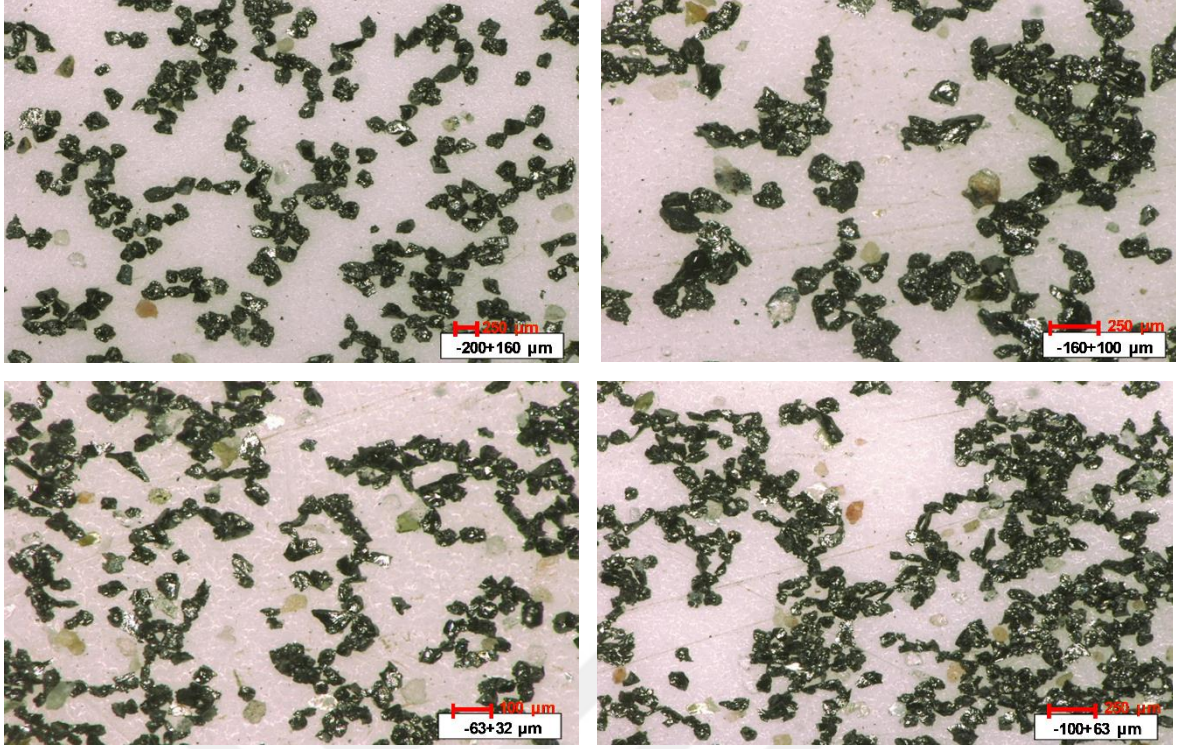
Çizelge 7.1. Kuvars numunesine ait kimyasal analiz bilgileri

Mineral	Ağırlık (%)
SiO ₂	99.00
Al ₂ O ₃	0.30
Fe ₂ O ₃	0.05
CaO + MgO	0.10
Na ₂ O + K ₂ O	0.20

Deneylerde kullanılan bir diğer numune olan manyetit ise, bir zenginleştirme tesisinin nihai konsantresinden alınmıştır. Manyetit numunesine ait tane boyu dağılımı da Şekil 7.2'de verilmektedir. Tane boyu dağılımı 200 µm, 160 µm, 100 µm, 63 µm ve 32 µm'luk elekler kullanılarak yaş elek analizi yöntemiyle ve daha ince boylar için Malvern Mastersizer 2000 türü cihazda lazer ışını saçınımı yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

Stereo mikroskop kullanılarak serbestleşme dereceleri incelenen manyetit numunesinin çeşitli fraksiyonlardan alınan görüntüler ise Şekil 7.3'te verilmektedir. 100 µm'dan ince manyetitin %90'ın üzerinde serbestleşmeye sahip olduğu tespit edilmiştir.

İri ve ince tane boylarına ait görüntülerde bağlı ve serbest tanelerle birlikte, manyetit harici safsızlıkların da olduğu görülmektedir. Bu safsızlıkları, manyetit harici tanımlanan diğer mineraller oluşturmaktadır. Parlak kesit hazırlanarak yapılan cevher tanımlamasına göre numune içerisinde %88.79 oranında manyetit belirlenmesinde karşın, %3.71 kuvars, %2.83 apatit, %2.5 mika, %1.72 karbonatlı mineraller ve %0.44 hematit de tespit edilmiştir.



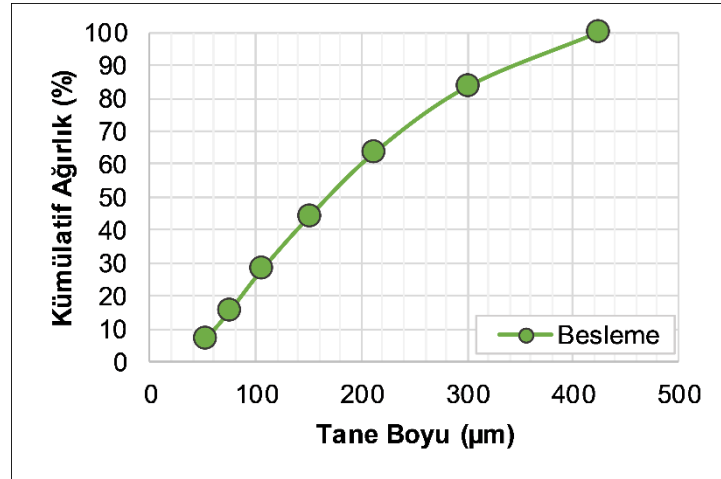
Şekil 7.3. Stereo mikroskopta farklı fraksiyonlardaki manyetit görüntüsü

7.1.3. Numune-III

Spiral zenginleştiriciler kullanılarak kromit zenginleştirme yapılan tesiste gerçekleştirilen çalışmalarda değirmen çıkışı kromit cevheri besleme olarak kullanılmıştır. Hem besleme hem de ürünler yaş elek analizine tabi tutulmuştur. Buna göre besleme numunesinin d_{80} değeri 285 μm olarak belirlenirken, numunenin yaklaşık %20'sinin 75 μm 'dan küçük olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.4).

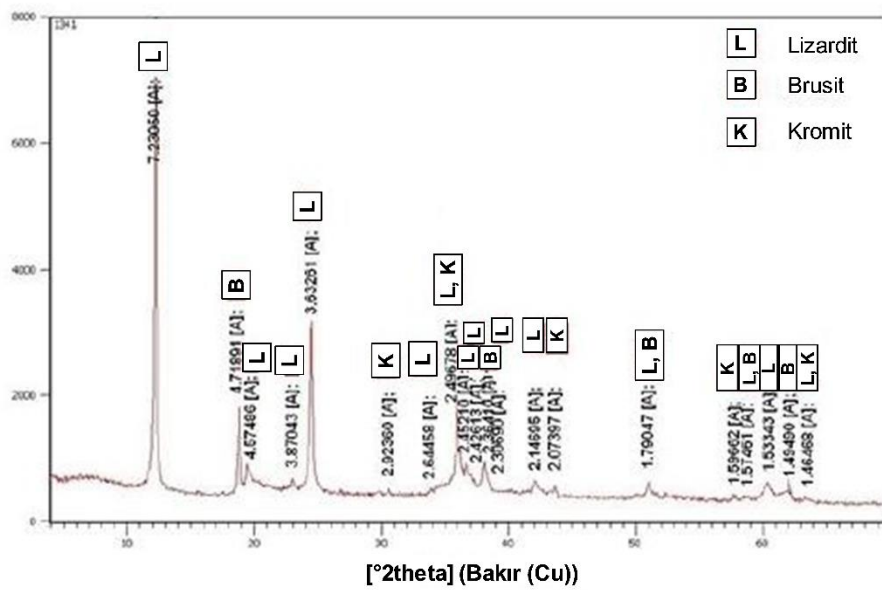
Her bir fraksiyonun kromit içeriğini belirlemek için numuneler MTA (Maden Tetkik ve Arama) Genel Müdürlüğü laboratuvarlarına gönderilmiştir. Numunelerin tenörleri XRF yöntemiyle belirlenmiştir. Buna göre beslemenin ortalama tenörü %5.13 Cr_2O_3 olarak ölçülmüştür.

Cevherin mineral içeriğini belirlemek amacıyla MTA laboratuvarlarında XRD analizi (X-ışınları Difraktometresi) yapılmıştır. Şekil 7.5'teki XRD deseninde de verildiği üzere, besleme numunesinde lizadit, brusit ve kromit mineralleri tespit edilmiştir.



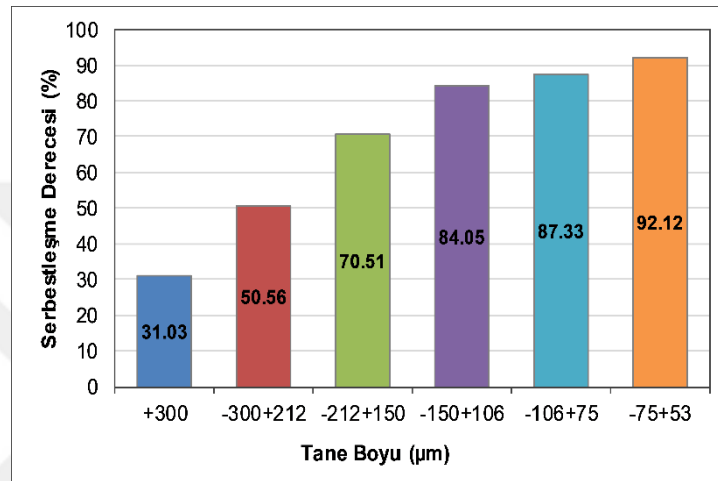
Şekil 7.4. Spiral zenginleştiricilerin (Spiral_B) beslemesine ait tane boyu dağılımı

Cevherin detaylı karakterizasyonu, MTA laboratuvarlarında bulunan FEI 650F model MLA cihazıyla yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre kromit mineralinin yanı sıra lizardit ($\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)$; $\rho = 3.27 \text{ gr/cm}^3$), brusit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$; $\rho = 2.40 \text{ gr/cm}^3$), kalsit (CaCO_3 ; $\rho = 2.71 \text{ gr/cm}^3$), kuvars (SiO_2 ; $\rho = 2.63 \text{ gr/cm}^3$) ve dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$; $\rho = 2.85 \text{ gr/cm}^3$) mineralleri de tespit edilmiştir. Diğer minerallerin yoğunluğunun kromitin yoğunluğundan daha az olmasının, spiral zenginleştiricilerde yapılacak ayırım için bir avantaj olacağı düşünülmüştür.



Şekil 7.5. Besleme numunesine ait XRD deseni

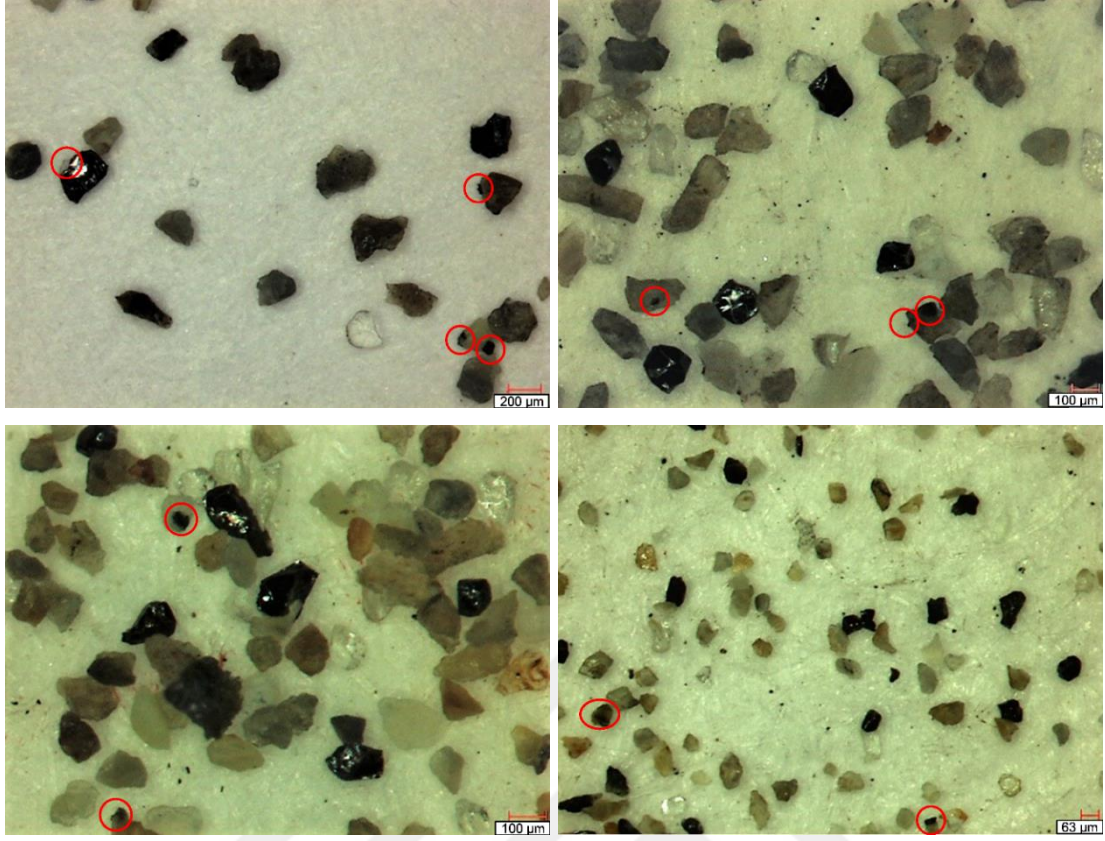
Cevherin serbestleşme analizinde Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Stereo mikroskop ve Clemex Vision P.E. 5.0 görüntü analiz sistemi ile birlikte optik mikroskop kullanılmıştır. Serbestleşme analizinde her bir fraksiyonda 625 tane sayılmış ve diğer minerallerle olan bağlılık durumlarına göre serbestleşme dereceleri hesaplanmıştır (Şekil 7.6).



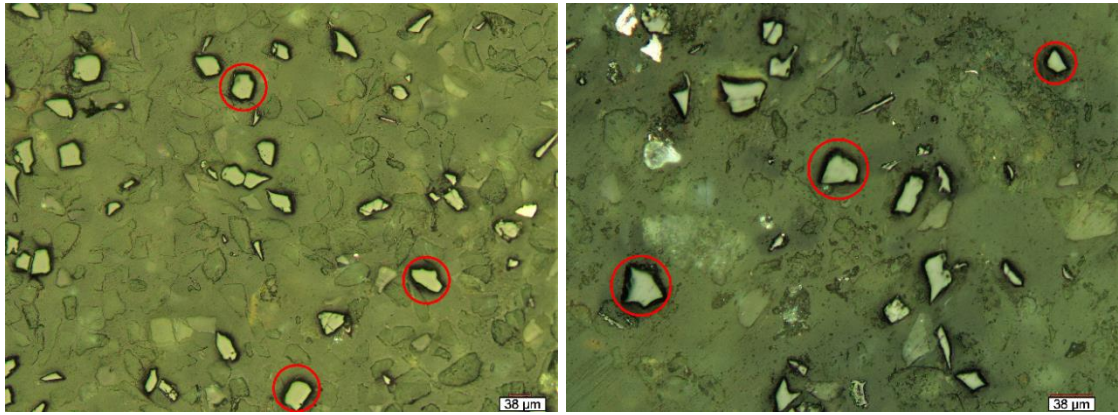
Şekil 7.6. Besleme numunesinin fraksiyonel serbestleşme derecesi

-150+106 µm tane boyu aralığındaki besleme numunesinde %80'in üzerinde serbest taneler gözlenirken, -75+53 µm aralığındaki tanelerin %90'dan fazlasının serbest olduğu tespit edilmiştir. -53+38 µm ve -38 µm fraksiyonları da tane sayımı için hazırlanmıştır. Ancak -75+53 µm tane boyunda yüksek serbestleşme oranları tespit edildikten sonra, daha ince boylarda daha da yüksek serbestleşme oranları olacağı düşünülerek sayım işlemine gerek duyulmamıştır.

Stereo mikroskopla yapılan analiz işlemi sırasında çeşitli fraksiyonlardan elde edilen görüntüler Şekil 7.7'de verilmektedir. Kırmızı daire içinde gösterilen taneler, bazı bağlı kromit tanelerini göstermektedir.



Şekil 7.7. Farklı fraksiyonlardaki besleme numunesine ait stereo mikroskop görüntüleri



Şekil 7.8. Farklı fraksiyonlardaki besleme numunesine ait optik mikroskop görüntüleri

53 µm'dan ince fraksiyonların serbestleşme analizi için tane sayımı yapılmamasına karşın görüntülerine optik mikroskopta bakılmıştır. -53+38 µm ve -38 µm fraksiyonlarının optik mikroskop altındaki görüntüleri Şekil 7.8'de verilmektedir. Burada kırmızı daire içinde gösterilen taneler serbest krom tanelerini belirtmektedir.

7.2. Sallantılı Masalarla Yapılan Deneysel Çalışmalar

RWTH Aachen Üniversitesi Cevher Zenginleştirme Bölümü (AMR) laboratuvarında yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan sallantılı masa Masa_A, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarlarında yapılan çalışmalarda kullanılan sallantılı masa ise Masa_B olarak tanımlanmıştır.

7.2.1. Masa_A deneyleri

Sallantılı masa (Masa_A) deneyinde, Wifley 87100 model sallantılı masa kullanılmıştır (Şekil 7.9). Deneylerde, Bölüm 7.1.2’de bahsedilen, benzer tane boyu dağılımlarına sahip manyetit ve kuvars karışımı kullanılarak (Numune-II), %1’lik ve %5’lik manyetit içeren suni karışımlar hazırlanmıştır. Besleme ve ürünlere ait tane boyu dağılımları, yaş elek analizi yöntemiyle belirlenmiştir. Şekil 7.2’de beslemeye ait tane boyu dağılımı verilmektedir. Buna göre beslemenin %80’inin 154 μm ’dan ince olduğu görülmektedir. Yapılan elek analizine göre tanelerin %25’inin 38 μm ’dan %10’unun da 10 μm ’dan ince olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.9. Wifley 87100 sallantılı masası

Sallantılı masa deneyleri sonunda ürün olarak konsantre, ara ürün ve atık alınmıştır. Farklı tane boyu dağılımı ve besleme tenörünün etkilerini görmek amacıyla

toplamda dört adet sallantılı masa testi yapılmıştır (T1, T2, T3, T4). Deney koşullarına (Masa_A) ait bilgiler Çizelge 7.2’de verilmektedir.

Çizelge 7.2. Sallantılı masa (Masa_A) deneylerine ait koşullar

DENEYLER	Besleme Tenörü Fe_3O_4 (%)	Besleme Tane Boyu	P_{80} (μm)
T1	%1	- 300 μm	150
T2	%1	-300+160 μm	264
T3	%1	-160 μm	120
T4	%5	-300 μm	157

Maksimum tane boyu 300 μm olan suni besleme haricinde, aynı numune 160 μm ’luk elekten elenerek iri ve ince tane boylarındaki zenginleşme davranımlarının ayrı ayrı gözlenmesi hedeflenmiştir. Bu sebeple +160 μm ve -160 μm taneler için aynı işlemin kontrollü olarak tekrarlanmasına karar verilmiştir. Bu şekilde, dar tane boyu aralığında yapılan beslemenin, uygulamayı ne yönde değiştireceğinin görülmesi hedeflenmiştir. Deneyler sabit besleme hızı ve su hızında, 324 rpm masa hızında ve 1°’lik masa eğiminde yapılmıştır.

Tüm numunelerin tenör değerleri Niton marka cihazda XRF (X-ışınları Floresans spektroskopisi) yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Sallantılı masa deneylerine ait ağırlık dağılımı, verim, tenör ve tenör yükseltgeme oranlarını gösteren tüm sonuçlar Çizelge 7.3’te verilmektedir.

Çizelge 7.3’te verilen değerlere göre T1, T2 ve T4 numaralı deneylerde malzemenin ağırlıkça büyük bir kısmının (%51–65) ara ürüne gittiği görülmektedir. Bahsi geçen deneylerde %73–85 oranlarında konsantre verimlerine ulaşıldığı görülmektedir. T3 deneyinde ise malzemenin ağırlıkça %73 gibi büyük bir çoğunluğunun atığa gittiği görülmektedir.

T1 ve T4, besleme tane boyları ve test koşulları anlamında benzer testlerdir. Yalnızca, besleme tenörleri %1 ve %5 olarak değişmektedir. Deney sonucunda TYO ve verimler birlikte değerlendirildiğinde konsantre, ara ürün ve atığın her bir testte

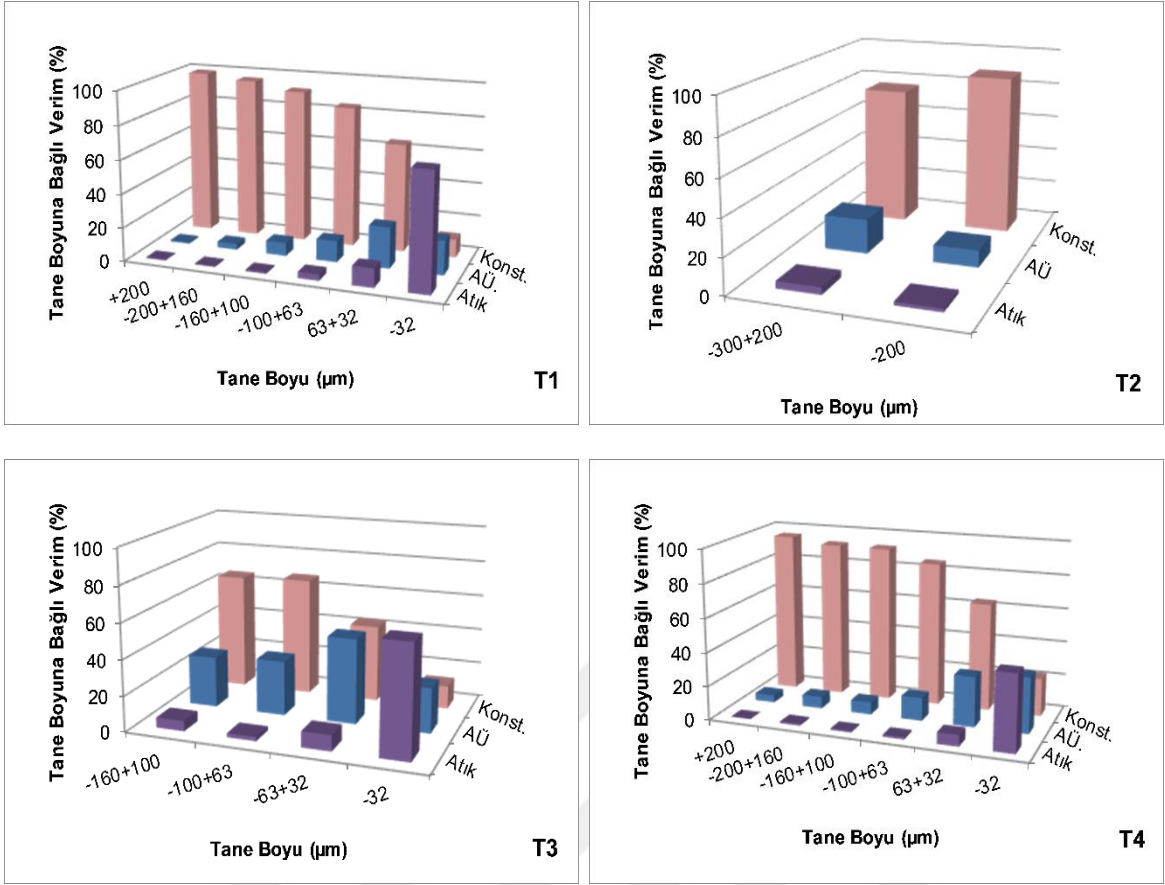
benzer eğilimler sergilediği görülmüştür. T2 deneyinde ise ağırlıkça yalnızca %1.64'lik konsantre, 51.95 gibi yüksek bir TYO ile alınmıştır.

Çizelge 7.3. Sallantılı masa (Masa_A) deneylerine ait sonuçlar

MASA_A	Ağırlık (%)	Verim (%)	Fe ₃ O ₄ (%)	TYO
T1	Konsantre	9.25	72.99	7.92
	Ara Ürün	51.49	12.55	0.25
	Atık	39.26	14.46	0.37
	Besleme	100.00	100.00	1.00
T2	Konsantre	1.64	85.19	52.16
	Ara Ürün	65.16	12.28	0.19
	Atık	33.20	2.53	0.08
	Besleme	100.00	100.00	1.00
T3	Konsantre	2.05	48.43	23.62
	Ara Ürün	24.97	33.47	1.34
	Atık	72.98	18.10	0.25
	Besleme	100.00	100.00	1.00
T4	Konsantre	7.48	79.26	52.98
	Ara Ürün	52.81	13.84	1.31
	Atık	39.71	6.91	0.87
	Besleme	100.00	100.00	5.00

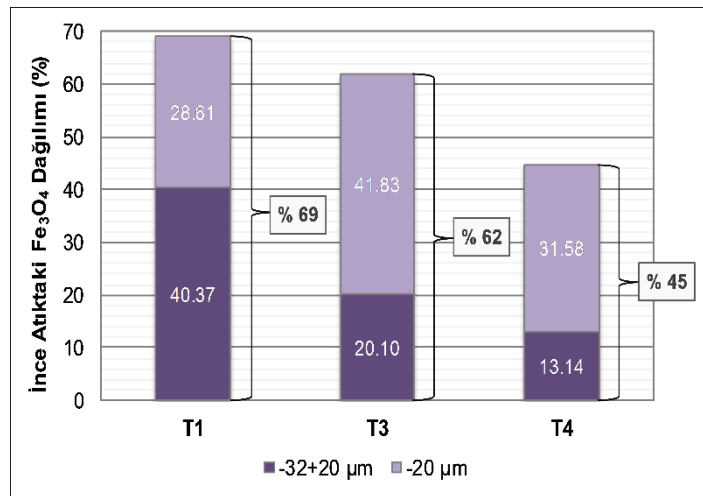
Tane boyu bazında kazanılan/kaybedilen manyetit miktarını tespit edebilmek amacıyla ürünlerin tamamı uygun elek boyundan elenmiş ve manyetit içerikleri XRF yöntemiyle tespit edilmiştir. Elek serisi olarak 300 µm, 200 µm, 160 µm, 100 µm, 63 µm ve 32 µm'luk laboratuvar ölçekli elek serisi kullanılarak yaş eleme yapılmıştır. Şekil 7.10'da T1, T2, T3 ve T4'ün ürünlerine ait tane boyuna bağlı verim değerleri gösterilmektedir.

Şekil 7.10'da ilk olarak dikkat edilmesi gereken nokta, iri tane boyunda yapılan T2 deneyi hariç diğer bütün deneylerde 32 µm'dan ince tanelerde manyetitın çoğunun atığa kaybedildiğidir. T2'de yalnızca iri tanelerin davranımı test edildiğinden, atığa ve ara ürüne kaybedilen manyetit miktarının çok az olduğu, neredeyse bu boydaki manyetitın tamamının sallantılı masada konsantre olarak kazanılabildiği görülmüştür. Ancak T1'de -32 µm'daki manyetitın %69'u atığa kaybedilirken bu oran T3'te %62, T4'te ise %45'tir.



Şekil 7.10. Sallantılı masa (Masa_A) ürünlerinin tane boyuna bağlı verim değerleri

32 μm 'dan ince tanelerin büyük çoğunluğunun atıktan kaybedilmesi üzerine T1, T3 ve T4'teki atık numuneleri 20 μm 'dan elenmiş ve manyetit 20 μm 'dan ince tanelerdeki dağılımı incelenmiştir.

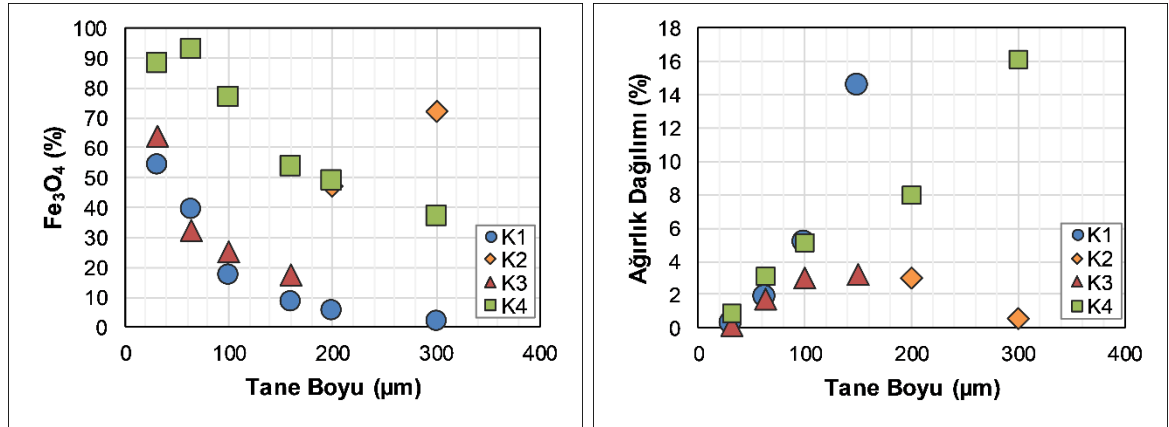


Şekil 7.11. 32 μm 'dan ince boydaki detaylı atık verimi

Şekil 7.11’de bahsi geçen testlerde atıktaki manyetit kaybı dağılımları -32+20 μm ve -20 μm ’da daha detaylı incelenmektedir. Burada, 32 μm ’dan ince olan manyetitin T3 ve T4’te yaklaşık %70’inin, T1’de ise yaklaşık %40’ının 20 μm ’dan ince olduğu görülmektedir. Çok ince manyetit tanelerinin sallantılı masada atıktan kaybedildiği bu şekilde görülmektedir.

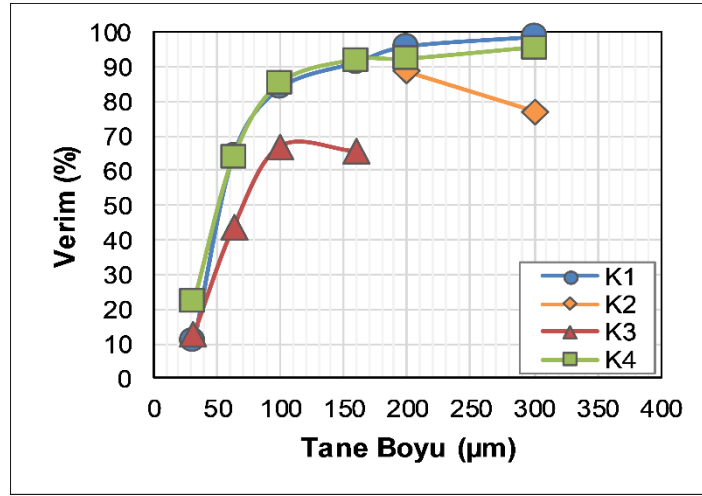
Tüm testlerdeki konsantrelerin tane boyuna bağlı tenör ve ağırlık dağılımları Şekil 7.12’de verilmektedir. T1, T2, T3 ve T4 testlerin konsantre gösterimleri sırasıyla K1, K2, K3 ve K4 olarak yapılmaktadır.

Fraksiyonel tenör dağılımları incelendiğinde, tane boyu irileştikçe manyetit içeriğinin azaldığı tespit edilmiştir. Yalnızca T2’de diğer testlerden aykırı bir davranım gözlenmiştir. Konsantrelerin ağırlık dağılımı grafiklerine bakıldığında ise tane boyu arttıkça, kazanılan malzeme miktarının da genel itibariyle arttığı görülmektedir.



Şekil 7.12. Sallantılı masa (Masa_A) konsantrelerinin tane boyuna bağlı manyetit içerikleri (solda) ve ağırlık dağılımları (sağda)

160 μm ’dan daha ince boylarla yapılan T3 çalışması, diğer verilerle uyumlu sonuçlar sergilemesine karşın 160 μm ’dan daha iri boydaki malzemeye yapılan T2 verilerinde farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu bilgilere dayanarak elde edilen konsantrelerin fraksiyonel verim dağılımı sonuçları ise Şekil 7.13’teki gibidir.

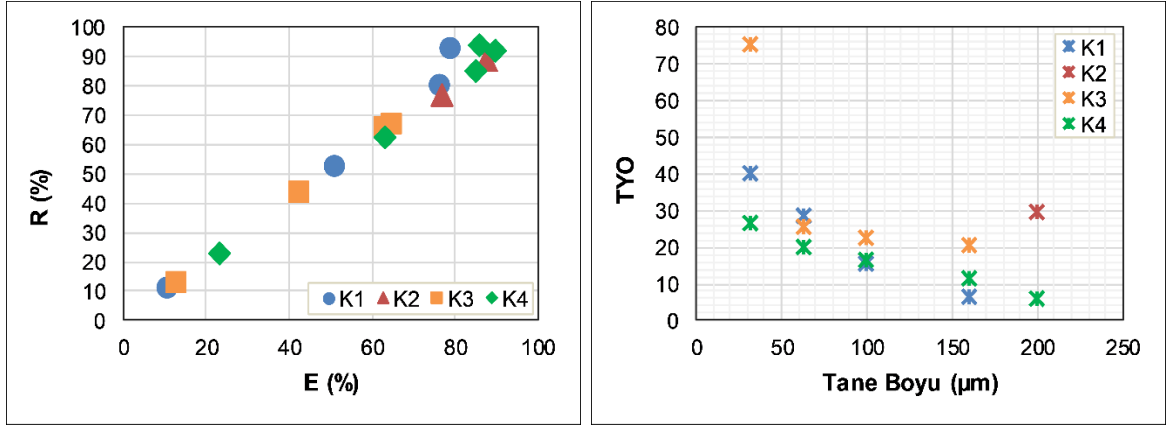


Şekil 7.13. Sallantılı masa (Masa_A) konsantrelerinin tane boyuna bağlı verim kıyaslamaları

K1 ve K4 sonuçlarına bakıldığında besleme tenörleri farklı olsa da sallantılı masada tane boyuna bağlı verim değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Tane boyu 150–300 µm aralığında manyetitinin %90'dan fazlasının konsantre olarak kazanılabildiği görülmüştür. T3 deneyinde tane boyu bazında yüksek verim değerlerine ulaşılammış, en fazla 100 µm tane boyunda %67'ye ulaşabildiği gözlenmiştir. Sadece iri boylar kullanılarak yapılan T2 deneyinde de T1 ve T4 deneyine aykırı olarak tane boyu irileştikçe verimin düştüğü bulgusuna ulaşılmıştır.

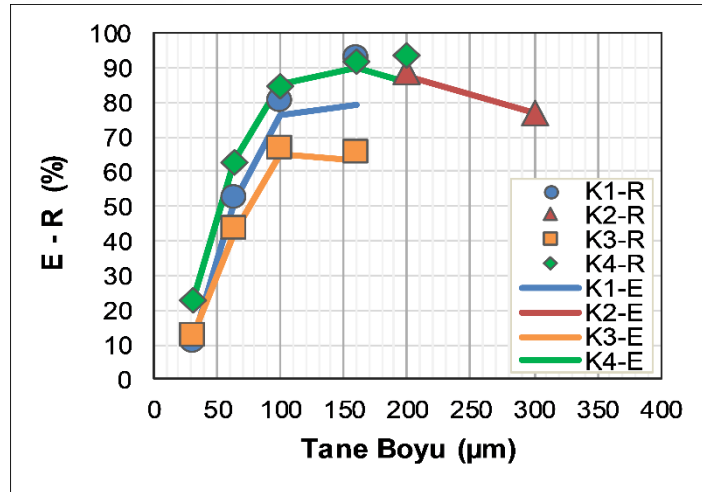
Nihai sallantılı masa konsantrelerine ait verim (R), ayırım performansı (E), ağırlık (W) ve tenör yükseltgeme oranları (TYO) kendi içlerinde kıyaslanmış ve Şekil 7.14 ile Şekil 7.15'te verilmiştir.

Şekil 7.14'teki grafiklere göre her bir deneyde tane boyu arttıkça TYO'nun azaldığı görülmektedir. Konsantre verimi ve ayırım performansı değerleri de genel olarak doğrusal bir ilişki sergilemişlerdir. Şekil 7.15'te nihai konsantrelerin tane boyuna bağlı ayırım performansı ve verim ilişkileri verilmektedir.



Şekil 7.14. Sallantılı masa (Masa_A) konsantrelerine ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrelerin tane boyuna bağlı TYO ilişkileri (sağda)

Konsantrelerin verim ve ayırım performansları tane boyuna bağlı olarak daha detaylı değerlendirildiğinde sonuçların uyumlu bir dağılım sergilediği görülmektedir. T1 ve T4 deneyleri birbiriyle yakın sonuçlar vermesine rağmen, verim ve tenör sonuçları birlikte değerlendirildiğinde T4 deneyinin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 7.15. Sallantılı masa (Masa_A) konsantrelerine ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi

7.2.2. Masa_B deneyleri

Sallantılı masa (Masa_B) deneylerinde Super Duty RH 15S SD model, laboratuvar ölçekli sallantılı masa kullanılmıştır (Şekil 7.16). Deneylerde, Numune_I'de bahsedilen özelliklerde %5 Fe_3O_4 içerecek şekilde besleme numunesi hazırlanmıştır.



Şekil 7.16. Sallantılı masa (Masa_B) deneyine ait laboratuvar çalışması

Sallantılı masa deneyleri (Masa_B) 2 farklı koşulda (T1 ve T2) yapılmıştır. Deneylerin sonunda konsantre ve atık olmak üzere 2 adet ürün elde edilmiştir. Çizelge 7.4'te deneylere ilişkin koşullar yer almaktadır.

Çizelge 7.4. Sallantılı masanın (Masa_B) besleme koşullarına ait veriler

BESLEME KOŞULLARI	1. Koşul (T1)	2. Koşul (T2)
Besleme Ağırlık (gr)	2560.72	3815.06
Yıkama Suyu (lt/dk)	20.4	16.7
Besleme Suyu (lt/dk)	7.1	6.3
Toplam Su Hızı (lt/dk)	27.5	23
Eğim (°)	1	0
Besleme Süresi (dk)	22	40
Katı Besleme Hızı (kg/sa)	7.0	5.7

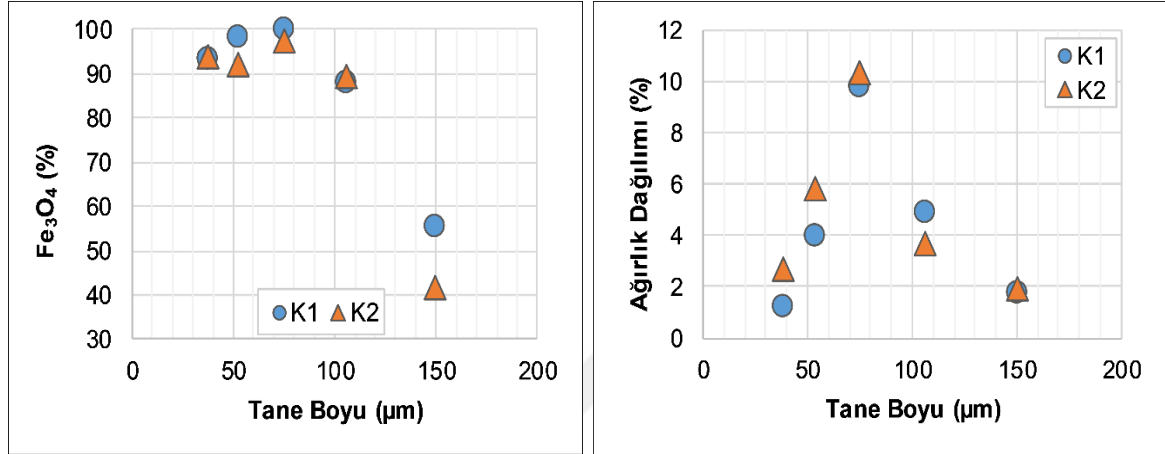
T2 koşulunda besleme hızı ve suyun hızı T1'e göre daha yavaştır. Deneyden elde edilen sonuçlar Çizelge 7.5'te verilmektedir.

Çizelge 7.5. Sallantılı masa (Masa_B) deneyine ait sonuçlar

MASA_B		Ağırlık (%)	Verim (%)	Fe ₃ O ₄ (%)	TYO
T1	Konsantre	5.15	83.08	92.99	16.14
	Atık	94.85	16.92	1.03	0.18
	Besleme	100.00	100.00	5.76	
T2	Konsantre	5.10	78.69	89.76	15.42
	Atık	94.90	21.31	1.31	0.23
	Besleme	100.00	100.00	5.82	

Deneyler için her ne kadar %5 manyetit tenörüne sahip besleme hazırlanmış olsa da, ürünlerin tenörlerinden geriye dönük hesaplamalar yapıldığında besleme tenörünün yaklaşık %5.8'e denk geldiği görülmektedir (Çizelge 7.5). Sallantılı masaya beslenen malzemeler, besleme hızları farklı olmasına rağmen benzer davranımlar sergilemişlerdir. Her iki koşulda da beslemenin ağırlıkça yaklaşık %5'i %90 manyetit tenöründe yüksek verimlerle alınmıştır. Sonuçlara göre, yüksek tenörlü konsantrelerin yüksek verimlerle elde edildiği görülmektedir. Bu tane boyunda eğim ve besleme hızının ayrıma büyük bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Konsantrenin TYO değerlerine bakıldığında oranların 1:16'ya kadar çıktığı görülmektedir.

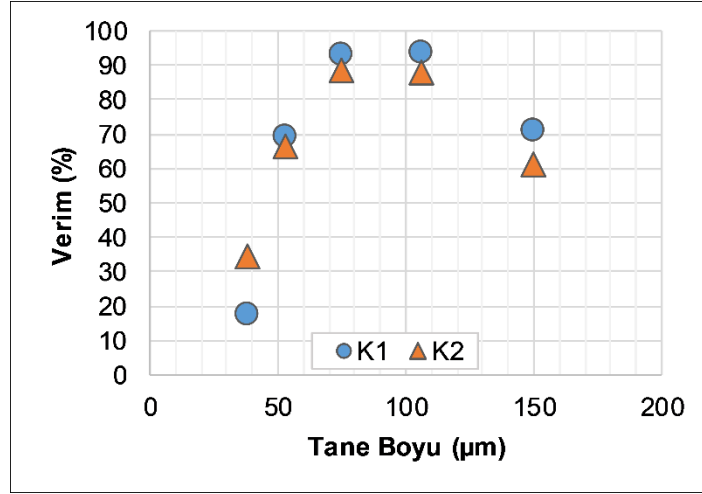
Konsantre olarak alınan ürünler 1. koşul için K1, 2. koşul için K2 ile belirtilmektedir. Elde edilen tüm ürünler 150 μm , 106 μm , 75 μm , 53 μm ve 38 μm 'luk elekler kullanılarak yaş elek analizine tabii tutulmuştur. Şekil 7.17'de K1 ve K2'nin tane boyuna bağlı tenör ve ağırlık dağılımları yer almaktadır.



Şekil 7.17. Sallantılı masa (Masa_B) konsantrelerinin tane boyuna bağlı manyetit içerikleri (solda) ve ağırlık dağılımları (sağda)

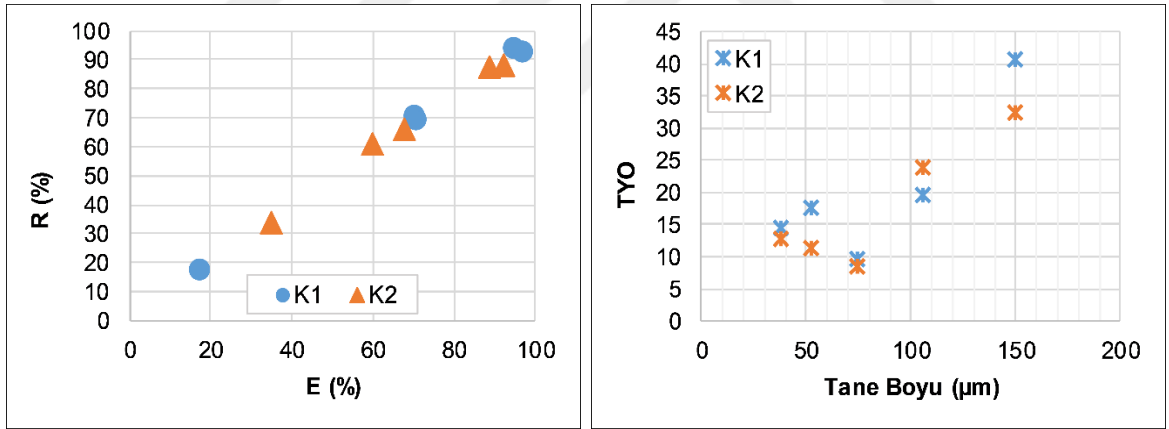
Şekil 7.17'deki sonuçlara göre 100 μm 'a kadar %90'ın üzerinde olan tenör, tane boyu irileştikçe %40'lara kadar düşmüştür. Malzemenin konsantreye gitme eğiliminin 75 μm 'a kadar arttığı, 75 μm 'dan sonra taneler irileştikçe azaldığı görülmektedir. Buna göre konsantrelerin tane boyu bazındaki verim ilişkisi Şekil 7.18'de verilmektedir.

Konsantre olarak alınan ürünlerin tane boyuna bağlı verim davranımlarının birbirine çok yakın olduğu Şekil 7.18'de görülmektedir. İnce tane boylarında verimler %20–30 bandında seyrederken, tane boyu irileştikçe konsantre verimlerinin arttığı ve 75 - 100 μm aralığında verimin %90'ın üzerine ulaştığı görülmektedir. Ancak tane boyu 100 μm 'dan daha iri boylara ulaştığında verimin tekrar düşmeye başladığı görülmektedir. Konsantre verimleri açısından değerlendirildiğinde bu deney için sallantılı masada en yüksek verime ulaşılan tane boyunun 75 μm ile 100 μm tane boyu aralığında olduğu söylenebilmektedir.



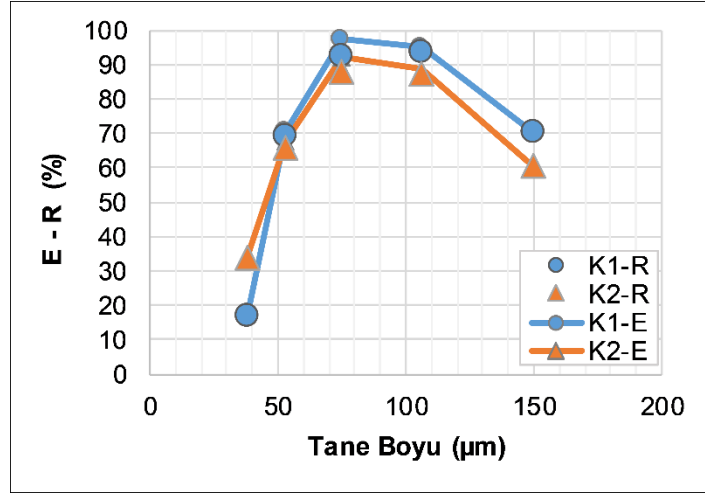
Şekil 7.18. Sallantılı masa (Masa_B) konsantrelerinin tane boyuna bağlı verim kıyaslamaları

Öte yandan verim ve ayırım performansı arasındaki ilişki değerlendirilmiş ve tane boyuna bağlı TYO sonuçları ile birlikte Şekil 7.19'da verilmiştir.



Şekil 7.19. Sallantılı masa (Masa_B) konsantrelerine ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrelerin tane boyuna bağlı TYO ilişkileri (sağda)

Buna göre verim ve ayırım performansı sonuçları birbiriyle uyumlu doğrusal sonuçlar vermiştir. Tane boyuna bağlı TYO ilişkilerinde ise en düşük oran 75 µm'da saptanmış, tane boyu irileştikçe TYO'nun arttığı görülmüştür. Şekil 7.20'de T1 ve T2'de alınan konsantrelerin tane boyuna bağlı verim ve ayırım performansı kıyaslaması yer almaktadır.



Şekil 7.20. Sallantılı masa (Masa_B) konsantrelerine ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi

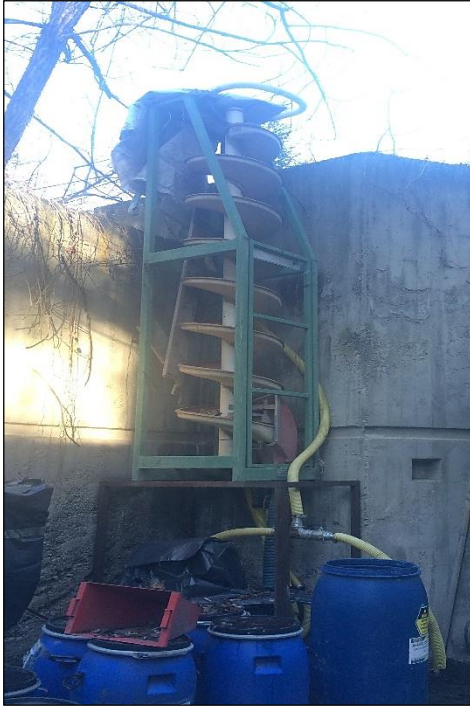
Buna göre elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Tane boyuna bağlı verim grafiğinde de görüldüğü üzere bu deneyde sallantılı masanın ideal çalışma tane boyu aralığı 75–100 μm olarak saptanmıştır. Daha ince veya daha iri tanelere gittikçe verim ve ayırım performansının düştüğü tespit edilmiştir.

7.3. Spiral Zenginleştiricilerle Yapılan Deneysel Çalışmalar

Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan spiral zenginleştirici kullanılarak yapılan deneyler Spiral_A olarak tanımlanırken, Sivas'ın Yellice bölgesinde yer alan Aksu Madencilik A.Ş.'ye ait kromit zenginleştirme tesisindeki spiral zenginleştiriciler kullanılarak yapılan kromit zenginleştirme testleri Spiral_B ve Spiral_C olarak tanımlanmıştır.

7.3.1. Spiral_A deneyleri

Spiral zenginleştirici (Spiral_A) deneylerinde, Mineral Deposit A87D model bir spiral zenginleştirici kullanılmıştır (Şekil 7.21). Hazırlanan deney düzeneğinde besleme, spiralin altında yer alan karıştırıcı bir haznede %35 katıda hazırlanmıştır. Haznedeki palp, bir pompa yardımıyla spiralin girişine basılmış ve spiral yüzeyinde kararlı bir akış sağlanıncaya kadar malzeme, kapalı devre bir akışta döndürülmüştür.



Şekil 7.21. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yapılan deneysel çalışmalara ait görüntüler

Spiral zenginleştiricinin çıkışında 3 farklı ürün alınmasını sağlayan 2 adet bölücü bıçak bulunmaktadır. Bıçaklar konsantre ve atık olarak 2 ürün alacak şekilde ayarlanmış, ara ürüne giden numune akışı atık ile birleştirilmiştir. Spiral zenginleştiriciye (Spiral_A) ait fiziksel özellikler Çizelge 7.6'da verilmektedir.

Çizelge 7.6. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ait fiziksel özellikler

Spiral Zenginleştirici Özellikleri	
Çap (mm)	600
Uzunluk (m)	5
Sarmal adedi	7
Eğim İç Çeper – Dış Çeper (°)	10 – 18
Kapasite (t/sa)	1

Numune-l'de bahsi geçen özellikte, tane boyu 150 µm'dan ince ve %5 manyetit tenörü olan besleme numunesi ile 3 farklı debide deneyler yapılmıştır. Deneylerde bölücü bıçak konumları sabit tutulmuştur. Testler T1, T2 ve T3 olarak gösterilmektedir ve sırasıyla 3.22 m³/sa (1.03 t/sa), 1.00 m³/sa (0.37 t/sa) ve 0.40 m³/sa (0.15 t/sa) debide deneyler gerçekleştirilmiştir. Geriye dönük besleme tenörü hesaplandığında tenörün %4.19–4.84 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 7.7'de verilmektedir.

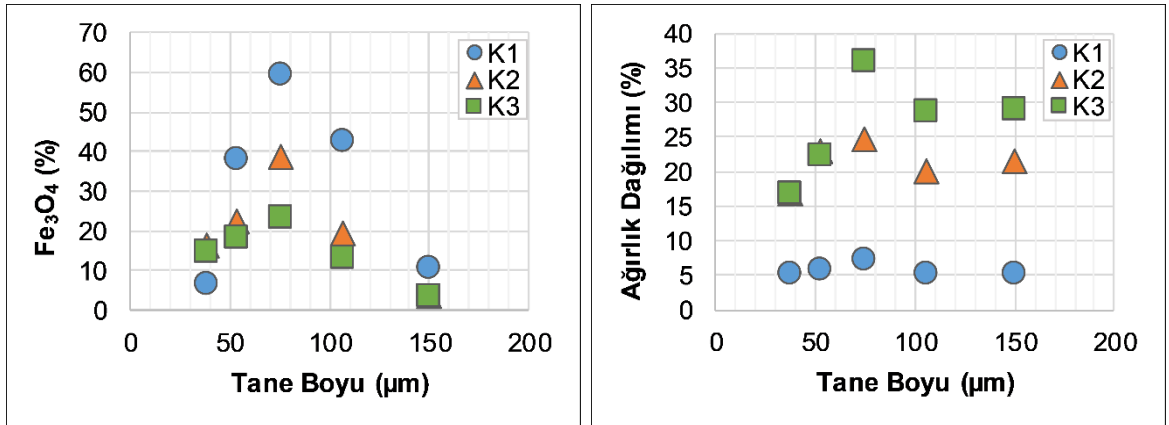
Çizelge 7.7. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yapılan deneylere ait sonuçlar

SPİRAL_A		Ağırlık (%)	Verim (%)	Fe₃O₄ (%)	TYO
T1	Konsantre	5.67	49.14	36.29	8.66
	Atık	94.33	50.86	2.26	0.54
	Besleme	100.00	100.00	4.19	
T2	Konsantre	21.11	88.22	20.24	4.18
	Atık	78.89	11.78	0.72	0.15
	Besleme	100.00	100.00	4.84	
T3	Konsantre	26.96	78.06	14.02	2.90
	Atık	73.04	21.94	1.45	0.30
	Besleme	100.00	100.00	4.84	

Yapılan deneylerde en yüksek konsantre verimi orta hızdaki T2’de sağlanmıştır. T2 ve T3’te ağırlıkça yakın miktarlarda konsantre alınmasına karşın tenör ve verim T2’de daha yüksek sonuçlar vermiştir. Atık tenörü olarak bakıldığında da en düşük atık tenörünün T2’de olduğu görülmektedir.

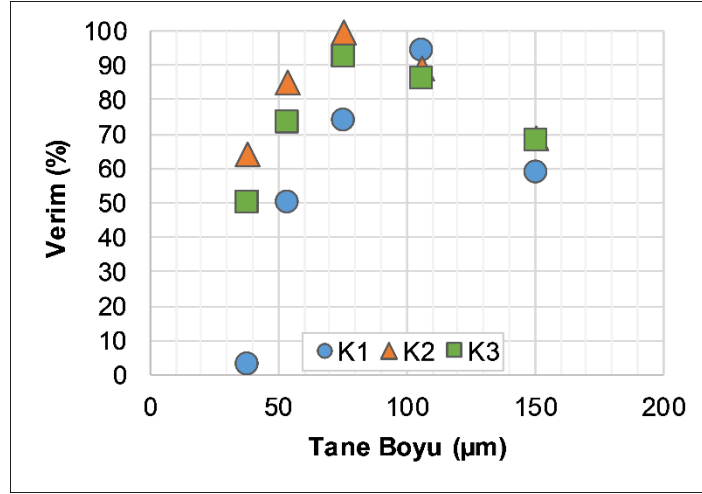
Deney sonuçlarının fraksiyonel bazdaki davranımını görmek için ürünlere yaş elek analizi yapılmıştır. 150 μm , 106 μm , 75 μm , 53 μm ve 38 μm boyutundaki elekler kullanılarak elde edilen fraksiyonların manyetit içerikleri XRF yöntemiyle tespit edilmiştir. Konsantrelerin tane boyuna bağlı tenör ve ağırlık dağılımları Şekil 7.22’de verilmektedir.

Hızlı, yavaş ve orta hızdaki spiral beslemesi deneylerinin her birinde, 100 μm ’a kadar tane boyu arttıkça tenör değerlerinin arttığı, 100 μm ’dan sonra tane boyu irileştikçe tenörün düşmeye başladığı Şekil 7.22’de görülmektedir. Ağırlık dağılımları grafikleri incelendiğinde düşük debide, malzemenin konsantreye gitme miktarı daha fazlayken, besleme debisi arttıkça konsantreye gitme miktarı azalmaktadır.



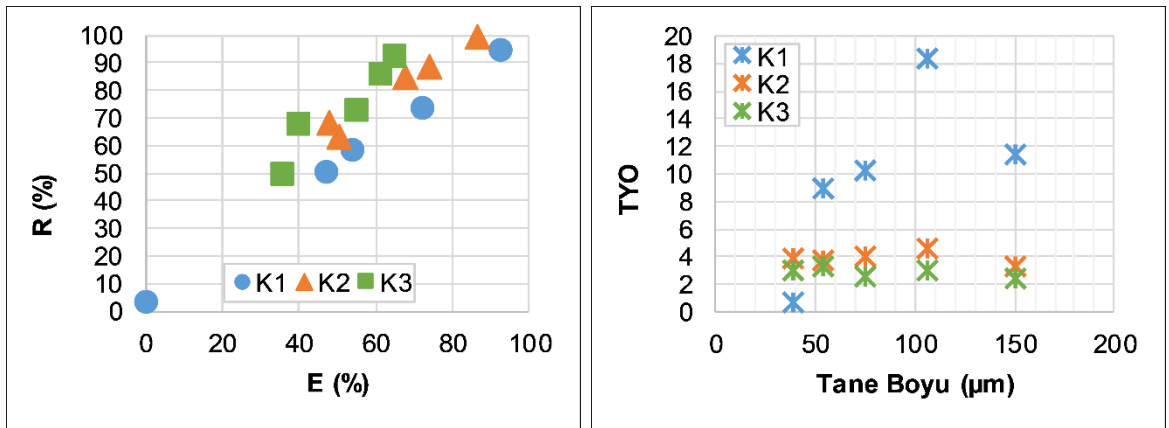
Şekil 7.22. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) konsantrelerinin tane boyuna bağlı manyetit içerikleri (solda) ve ağırlık dağılımları (sağda)

Deneylerin tane boyuna bağlı verim değerlerine ait kıyaslamalar Şekil 7.23’te verilmektedir.

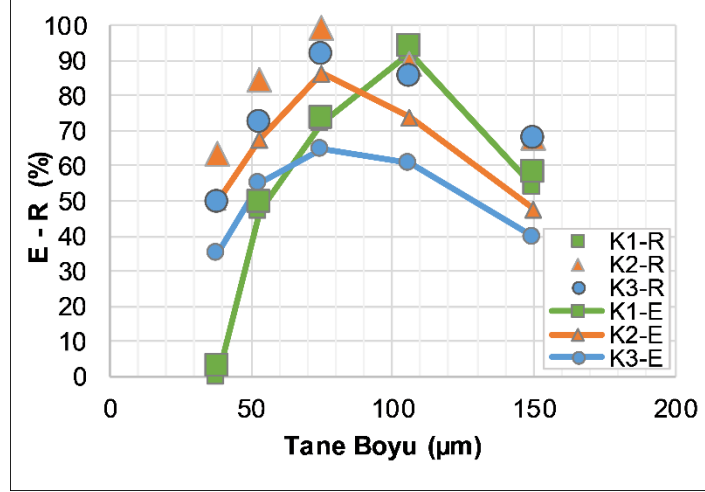


Şekil 7.23. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) konsantrelerinin tane boyuna bağlı verim kıyaslamaları

Spiral zenginleştiriciyle yapılan her bir deneyde tane boyu irileştikçe verim belli bir boya kadar artmış, 75 μm 'dan daha iri tanelerde azalmaya başlamıştır. T2 ve T3 deneylerindeki konsantre verimleri birbirine yakın davranım sergilerken, yüksek debide yapılan T1 deneyi daha farklı sonuç vermektedir. Özellikle ince tane boyundaki konsantre veriminin %3'lere kadar düştüğü, tane boyunun irileşmesiyle birlikte arttığı görülmektedir. Bu veriler, yüksek hızdaki debilerde ince boydaki manyetit tanelerinin atığa kaybedildiğini göstermektedir. Konsantre verimleri (R) ve ayırım performansları (E) ilişkileri ile birlikte konsantrelerin TYO değişimlerini gösteren grafikler Şekil 7.24'te verilmektedir.



Şekil 7.24. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) konsantrelerine ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrelerin tane boyuna bağlı TYO ilişkileri (sağda)



Şekil 7.25. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) konsantrelerine ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi

Spiral deneylerindeki konsantrelerin ayırım performanslarıyla verimleri birbiriyle doğrusal bir ilişki ortaya koymuşlardır. TYO K1 ve K2'de tane boyu arttıkça aynı kalmakla beraber K3'te tane boyu arttıkça artmıştır. Tane boyuna bağlı verim ve ayırım performansı kıyaslaması ise Şekil 7.25'te grafiksel olarak yapılmıştır. Buna göre sonuçların birbiriyle uyumlu değerler ortaya koyduğu görülmektedir.

7.3.2. Spiral_B deneyleri

Spiral zenginleştiriciler kullanılarak zenginleştirme yapan bir tesiste Multotec firmasına ait 2 adet kaba zenginleştirme spirali, 2 adet 1. temizleme ünitesi spirali, 2 adet 2. temizleme ünitesi spirali ile 2 adet süpürme ünitesi spirali mevcuttur. Spiral zenginleştiricilere ait görseller Şekil 7.26'da verilmektedir. Besleme olarak Numune-III'te bahsedilen özelliklerdeki numune kullanılmıştır.

Spirallerin çıkışları, konsantre, ara ürün ve atık olarak üç farklı ürün alınmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Yapılan testlerde, ara ürün akışı atık akışıyla birleştirilerek konsantre ve atık olmak üzere iki ürün alınacak şekilde modifiye edilmiştir. Yüzeyi poliüretan malzeme kullanılarak üretilen bu spiral

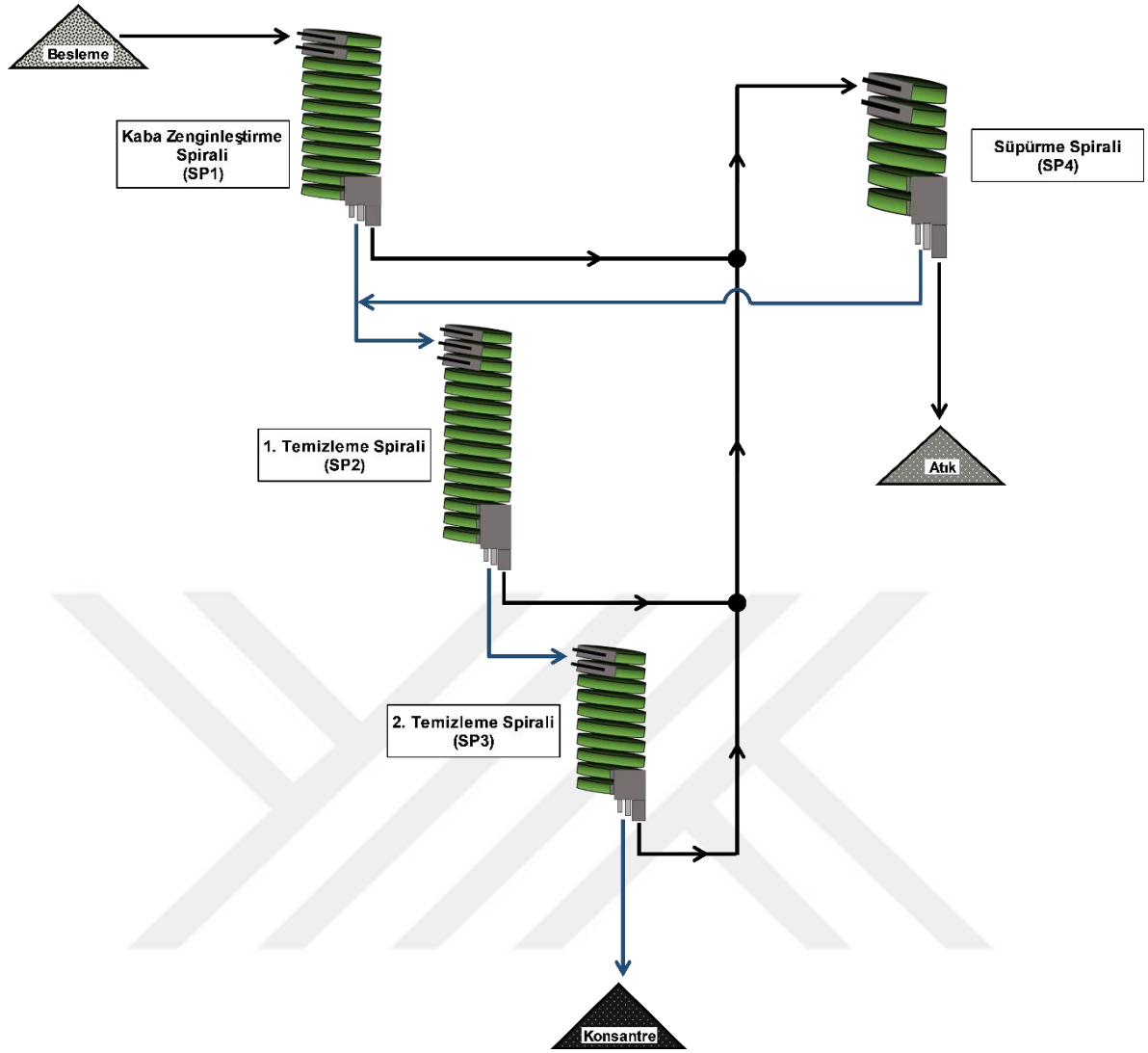
zenginleştiricilere ait özellikler Çizelge 7.8'de verilmektedir. Tesisin spiral zenginleştiricilere (Spiral_B) ait akım şeması ise Şekil 7.27'de verilmektedir.



Şekil 7.26. Kaba zenginleştirme ve süpürme spirallerine ait tesis görüntüsü (solda), 3'lü başlangıca sahip Multotec spirali (sağda)

Çizelge 7.8. Tesiste yer alan spiral zenginleştiricilere ait özellikler

ÖZELLİKLER	Kaba Zenginleştirme (SP1)	1. Temizleme (SP2)	2. Temizleme (SP3)	Süpürme (SP4)
Spiral Modeli	HX5 Twinstart	SC21 Triplestart	SC21/5 Triplestart	HX3 Twinstart
Spiral Çapı (mm)	1000	600	600	1000
Başlangıç sayısı	2'li	3'lü	2'li	2'li
Eğim (°)	19	21	21	19
Sarmal Sayısı	5	5	5	3
Ara Bıçak Sayısı	2	3	3	1
Ara Bıçağın Bulunduğu Sarmal	3, 4	2, 3, 4	2, 3, 4	2



Şekil 7.27. Spiral devresine ait akım şeması

Değirmen çıkışı sonrası hidrosiklonda sınıflandırılan malzemenin irisi, spiral beslemesi olarak kullanılmıştır. Besleme akışı SP1'e gönderildikten sonra elde edilen konsantre SP2'ye beslenmiş ve SP2'den elde edilen konsantre de SP3'e beslenmiştir. SP3 konsantresi nihai konsantre olarak alınmıştır. SP1, SP2 ve SP3'ün atıkları ise SP4'e beslenmiş ve elde edilen atık akışı nihai atık olarak sistemden uzaklaştırılmıştır. SP4 konsantresi ise SP1 konsantresi ile birleştirilmiş ve SP2 beslemesi olarak sisteme geri döndürülmüştür.

Spiral devresinden (Spiral_B), farklı günlerde numuneler alınmıştır. 3 farklı günde alınan konsantre değerleri sırasıyla K1, K2 ve K3 olarak gösterilmiştir. Analizlerden

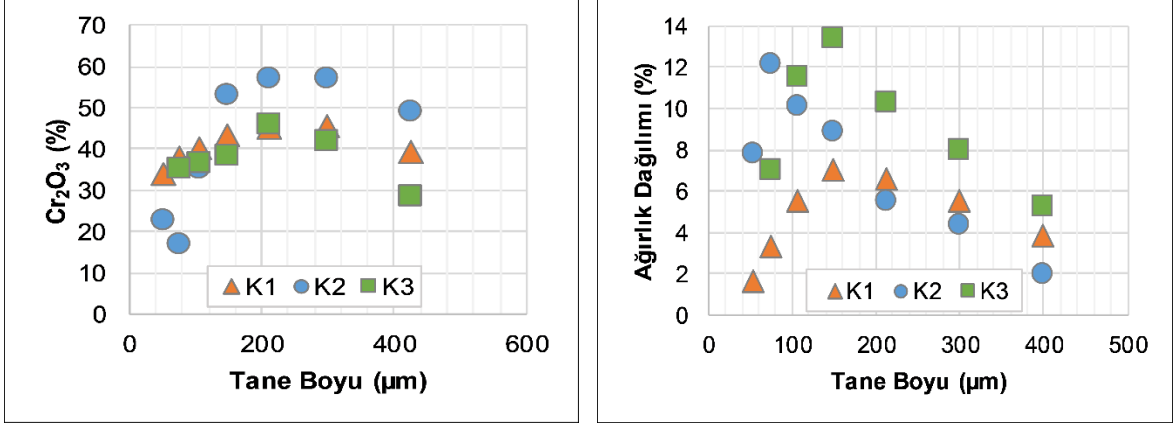
elde edilen kromit içerikleri JKSİmMet programında kullanılarak tesisin tane boyu bazındaki kütle denklığı yapılmıştır. Ayrım performansı (E), konsantre verimi (R), konsantre ağırlığı (W) ve tenör yükseltgeme oranlarının dağılımı (TYO) hesaplanmış ve sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır

Elde edilen verilere göre hesaplanan sonuçlar Çizelge 7.9'da verilmektedir. 1., 2. ve 3. günde yapılan spiral deneyleri, ayırıcı bıçak ayarları değiştirilmeksizin yalnızca besleme hızı değiştirilerek yapılmıştır. T1 en yüksek debi, T2 orta hızdaki debi, T3 ise en düşük debideki değerleri ifade etmektedir.

Çizelge 7.9. Farklı günlerde yapılan spiral çalışmalarında elde edilen veriler

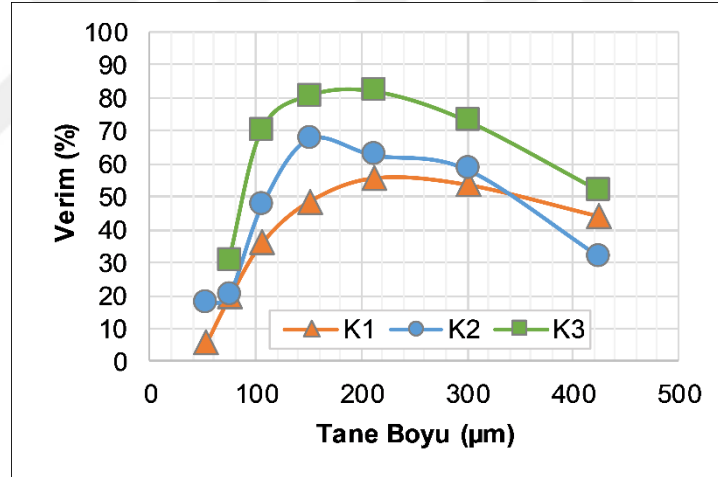
SPİRAL_B		Ağırlık (%)	Verim (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	TYO
T1	Konsantre	5.20	40.55	42.90	7.80
	Atık	94.80	59.45	3.45	0.63
	Besleme	100.00	100.00	5.50	
T2	Konsantre	5.83	51.57	46.76	8.86
	Atık	94.18	48.43	2.72	0.52
	Besleme	100.00	100.00	5.28	
T3	Konsantre	9.06	63.86	39.09	7.06
	Atık	90.94	36.15	2.20	0.40
	Besleme	100.00	100.00	5.54	

%5.3–5.5 kromit içeriğine sahip beslemeyle yapılan deneylerde konsantre tenörleri %42.90, %46.76 ve %39.09 olarak tespit edilmiştir. Konsantrenin miktarca fazla olması dolayısıyla en yüksek verim değerinin %63.86 ile K3'te olduğu görülmektedir. Tenör yükseltgeme oranlarıyla verim değerleri birlikte değerlendirildiğinde ise, bu testlerdeki en ideal ayırmanın K2'de olduğu görülmektedir. Konsantrelerin tane boyuna bağlı kromit içerikleri ile ağırlık dağılımları Şekil 7.28'de verilmektedir.



Şekil 7.28. Nihai spiral konsantrelerinin (Spiral_B) tane boyuna bağlı kromit içerikleri (solda) ve ağırlık dağılımları (sağda)

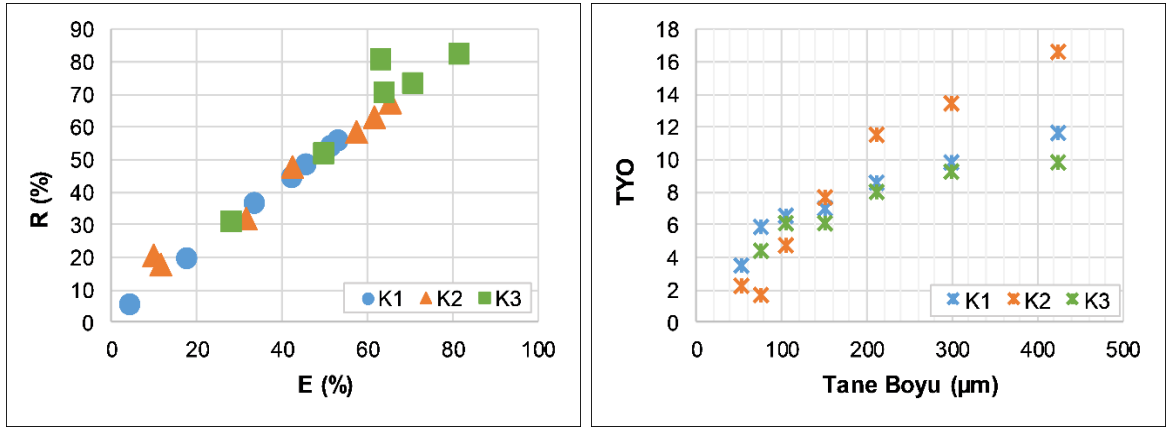
Farklı tarihlerde yapılan spiral deneylerinden elde edilen nihai konsantrenin tane boyuna bağlı verim kıyaslamaları ise Şekil 7.29'da verilmektedir.



Şekil 7.29. Nihai spiral konsantrelerinin (Spiral_B) tane boyuna bağlı verim kıyaslamaları

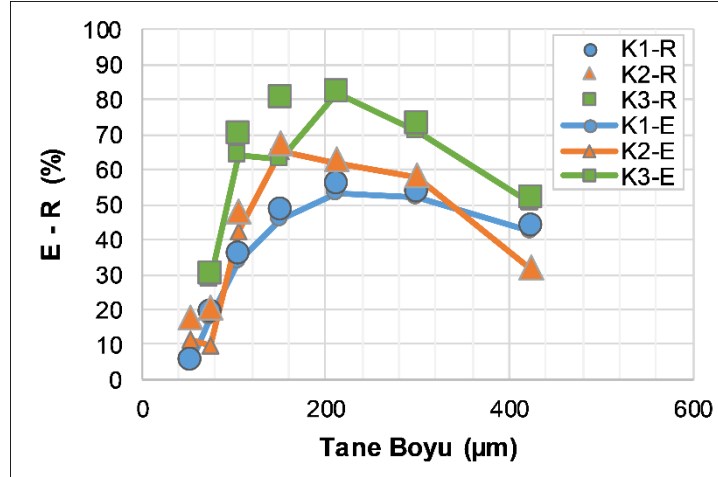
Şekil 7.29'da görüldüğü üzere tane boyuna bağlı verim, ince tane boyunda oldukça düşükken tane boyu irileştikçe belli bir boya kadar artmıştır. Ancak özellikle 200 µm'dan daha iri tanelerde verimin tekrar düşmeye başladığı görülmektedir.

Şekil 7.30'da nihai konsantrelerindeki ayırım performansı ile verim ilişkisi ve tane boyları ile tenör yükseltgeme oranları arasındaki ilişkiler verilmektedir.



Şekil 7.30. Nihai spiral konsantrelerine (Spiral_B) ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrelerin tane boyuna bağlı TYO ilişkileri (sağda)

Şekil 7.30'daki grafiklere göre, ayırım performansı ile verim arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu görülmektedir. Öte yandan her üç farklı konsantrde de, tane boyu arttıkça tenör yükseltgeme oranlarının arttığı izlenmiştir. Şekil 7.31'de nihai konsantrelere ait ayırım performansları ve verimlerin tane boyuyla ilişkisi verilmektedir.



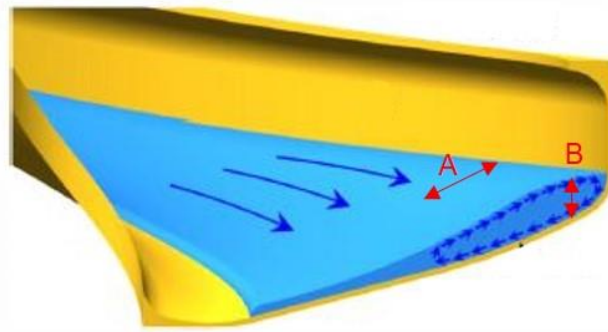
Şekil 7.31. Nihai spiral konsantrelerine (Spiral_B) ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi

Şekil 7.31'de, konsantrelerin verimi ile ayırım performansları birlikte değerlendirildiğinde sonuçların birbiriyle uyumlu bir dağılım sergilediği

görülmektedir. Yalnız K3'te 100–150 µm tane boyları arasında verim ve ayırım performansları dağılımında sapmalar olduğu, ancak bunun dışındaki tane boylarında genel dağılımın birbirine yakın davranım sergilediği görülmektedir.

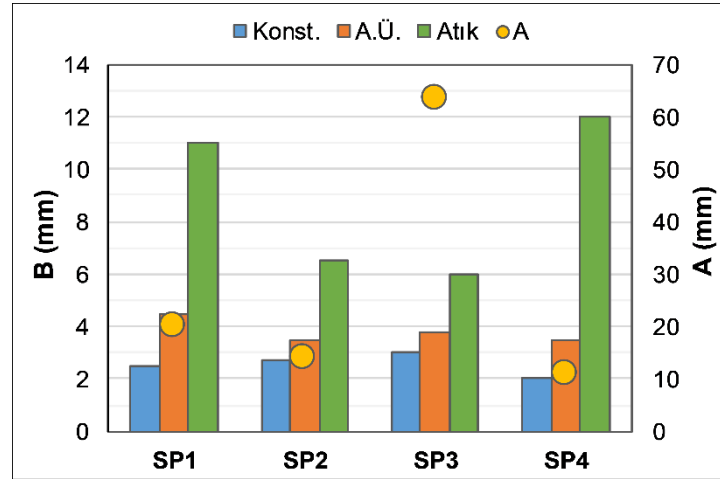
Spiral zenginleştiricilerde konsantre yatağı yüksekliği ile konsantre bandı genişliği arasındaki ilişki

Spiral zenginleştiricilerle yapılan çalışmalar sırasında, tüm spirallerdeki konsantre, ara ürün ve atık bantlarının yükseklik ve genişlikleri cetvel yardımıyla ölçülerek birbiri arasındaki ilişkinin ortaya konması hedeflenmiştir. Ölçümler, her spiralın belirlenen bir sarmalında tekrarlı olarak yapılmıştır. Akış yüksekliği ölçümlerinde spiralın seçilen sarmalının kesiti boyunca konsantre, ara ürün ve atığı temsil edecek şekilde üç standart nokta belirlenmiştir. Konsantre bandının genişliği gözle izlenmiştir. Bu genişlik belirlenirken kromit cevherinin sarmal üzerindeki konumlanmasına ve renk skalasına bakılmıştır. Palpın en koyu olduğu, spiralın merkez kolonuna en yakın nokta ile daha açık olduğu ve ara ürün bandına geçiş yaptığı orta nokta konsantre bandı genişliği olarak belirlenmiştir. Şekil 7.32'de konsantre bandı genişliğinin (A) ve yatak yüksekliğinin (B) gösterimi yer almaktadır.



Şekil 7.32. Spiral zenginleştiricide (Spiral_B) akış sırasında konsantre bandı genişliği ve yatak yüksekliğinin gösterimi

Şekil 7.33'te, bahsi geçen ölçümlere ilişkin veriler yer almaktadır. Her bir spiraldeki konsantre, ara ürün ve atık verileri değerlendirildiğinde konsantreden atığa gittikçe akış yüksekliğinin (B) beklenildiği üzere arttığı görülmektedir.



Şekil 7.33. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ürünlerinin yatak yüksekliği (B) ile konsantre bandı genişlik değerleri (A)

Şekil 7.33'te sarı noktayla gösterilen değerler konsantre bandı genişlikleridir (A). Konsantre bandı genişlikleri sırasıyla SP3>SP1>SP2>SP4 şeklindedir. 2. temizleme spirali olan SP3'te açık ara en geniş konsantre bandının olması, temizleme spirallerinde yoğunluklu olarak konsantre ürünlerinin işlendiğinin bir göstergesidir.

Bantların genişlik ve yükseklikleri akışın debisine bağlı olmakla birlikte, spirallerin tasarımıyla da ilişkilidir. Örneğin konsantre bandı akış yüksekliğinin en fazla olduğu noktada yapılan ölçümlerde, temizleme ünitesi spiralleri olan SP2 ve SP3 spiralleri en fazla akış yüksekliği değerini vermiştir. Bu spirallere bakıldığında 600 mm çaplı ve 21° eğimli spiraller olduğu görülmektedir. 1000 mm çaplı 19° eğimli kaba zenginleştirme ve süpürme ünitesi spirallerinden olan SP1 ve SP4 spiralleri ise en düşük akış yüksekliği değerini vermişlerdir.

Bunların yanı sıra SP1 ve SP4 spirallerinin, belirlenen konsantre, ara ürün ve atık noktalarından anlık debi ve % katı ölçümleri yapılmıştır (Çizelge 7.10).

Çizelge 7.10. SP1 ve SP4 spirallerinin tek sarmalındaki akışlarda yapılan ölçümler

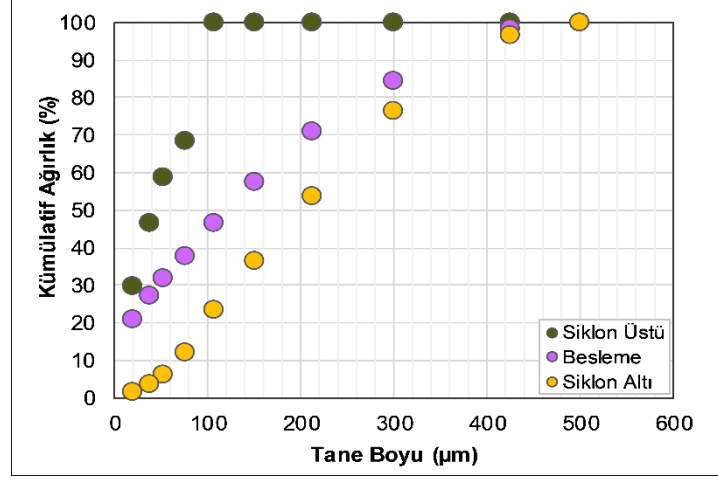
Tek Spiral Sarmalında Yapılan Ölçümler		% Katı	Cr ₂ O ₃ (%)
SP1	Konsantre	69	22.12
	Ara Ürün	63	4.74
	Atık	52	1.45
	Besleme		5.54
SP4	Konsantre	60	14.66
	Ara Ürün	59	4.77
	Atık	42	2.92
	Besleme		3.46

Süpürme ünitesinin (SP4) % katı içeriğinin kaba zenginleştirme ünitesine (SP1) göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Hem kaba zenginleştirme ünitesinde (SP1) hem de süpürme ünitesinde (SP4) konsantrenin % katı içeriği beklendiği üzere yüksek bulunmuş, atığa gittikçe % katı miktarının ise azaldığı teyit edilmiştir.

7.3.3. Spiral_C deneyleri

Bölüm 7.3.2’de bahsi geçen kromit zenginleştirme tesisinin akım şemasında ve akış debisinde değişiklikler yapılarak ek çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tesiste değirmen çıkışı akış hidrosiklonunda sınıflandırılmaktadır. İnce taneler ($d_{80} = 86 \mu\text{m}$, $d_{50} = 42 \mu\text{m}$) hidrosiklon üst akımıyla sistemden uzaklaştırılırken, hidrosiklon alt akımındaki iri taneler ($d_{80} = 302 \mu\text{m}$, $d_{50} = 255 \mu\text{m}$) spirallere beslenmektedir. Siklon beslemesi 60 t/sa olarak ölçülmüştür. Hidrosiklon beslemesine, hidrosiklon alt akımı ve üst akımına ait tane boyu dağılımları Şekil 7.34’te verilmektedir.

Spiral devresi (Spiral_C) 2 adet paralel çalışan kaba zenginleştirme spirali (SP1) ve 2 adet paralel çalışan yakalama spiralinin (SP2) oluşmaktadır. Spiral zenginleştiricilere ait özellikler Çizelge 7.8’de verilmektedir. Tesiste, hidrosiklon alt akımı spirallere beslenip bir süre sistemin dengeye gelmesi beklendikten sonra spiral devresi etrafından örnekleme çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 7.34. Hidrosiklon etrafındaki akışlara ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımları

Tüm örneklerle yaş elek analizi yapılmış, bu şekilde elde edilen her bir fraksiyona da XRF yöntemiyle kromit analizi uygulanmıştır. Tüm akışlardan alınan numunelere 425 µm'dan 53 µm'a kadar elek analizi yapılmıştır. Fraksiyonların kromit analizi değerleri Çizelge 7.11'de verilmektedir.

Çizelge 7.11. Tesis ürünleri fraksiyonel kromit değerleri

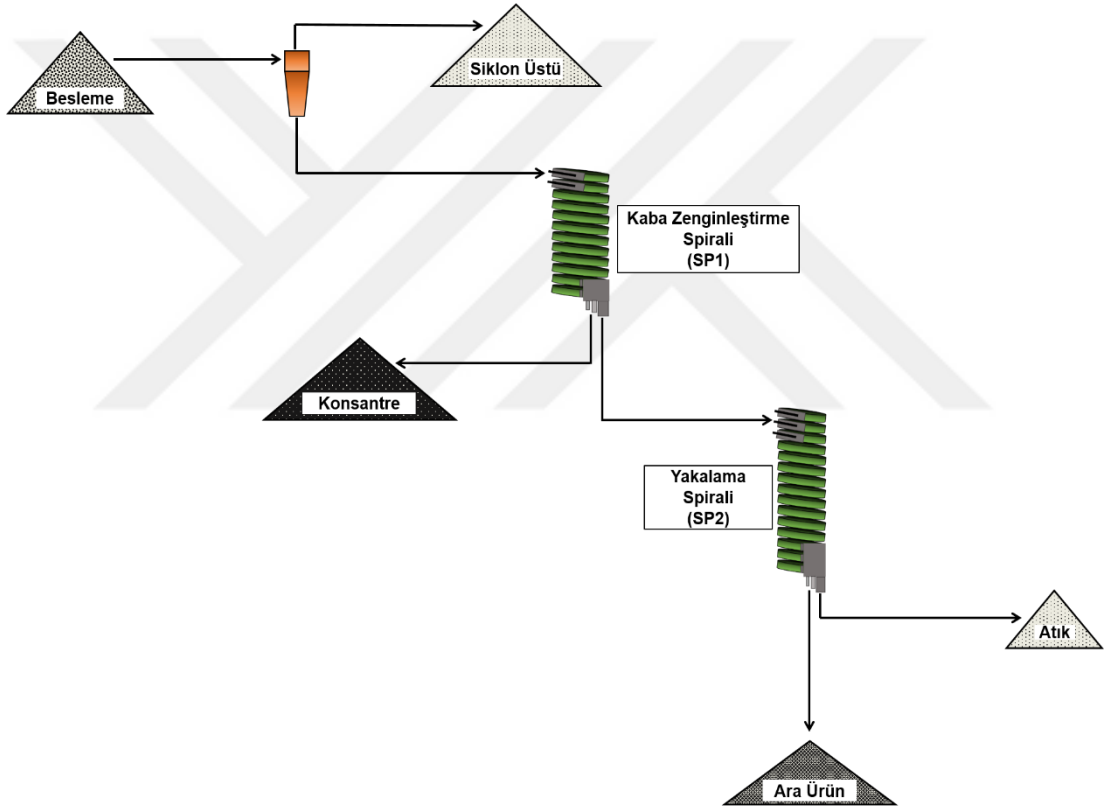
Tane Boyu (µm)	Cr ₂ O ₃ (%)						
	SP1 Konsantre	SP1 Atık	SP2 Konsantre	SP2 Atık	Siklon Besleme	Siklon Üstü	Siklon Altı (Spiral Besleme)
+425	6.85	1.48	1.50	1.28	3.54	-	3.54
-425+300	31.08	2.33	2.51	1.30	6.59	-	6.59
-300+212	36.82	1.86	1.96	1.25	6.61	-	6.61
-212+150	39.53	2.46	2.61	1.29	7.50	-	7.50
-150+106	34.97	2.88	3.03	1.58	8.72	-	8.72
-106+75	22.79	3.13	3.41	1.99	6.45	3.14	7.90
75+53	20.81	4.67	4.82	3.84	6.39	2.64	9.18
-53	22.61	7.19	7.68	5.23	3.60	2.54	10.72
Toplam	30.01	2.78	2.93	1.85	5.93	2.60	7.55

Şekil 7.35'te devrenin akım şeması verilmektedir. Spiral devresinde, %7.55'lik kromit beslemesinden elde edilen SP1 konsantresi nihai konsantre olarak alınırken SP1 atığı yakalama spirallerine gönderilmiştir. SP2 konsantresi sistemin ara ürünü,

SP2 atığı ise sistemin nihai atığı olarak alınmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarının kütle dengliği, JKSimMet programı kullanılarak yapılmıştır (Tablo 7.1).

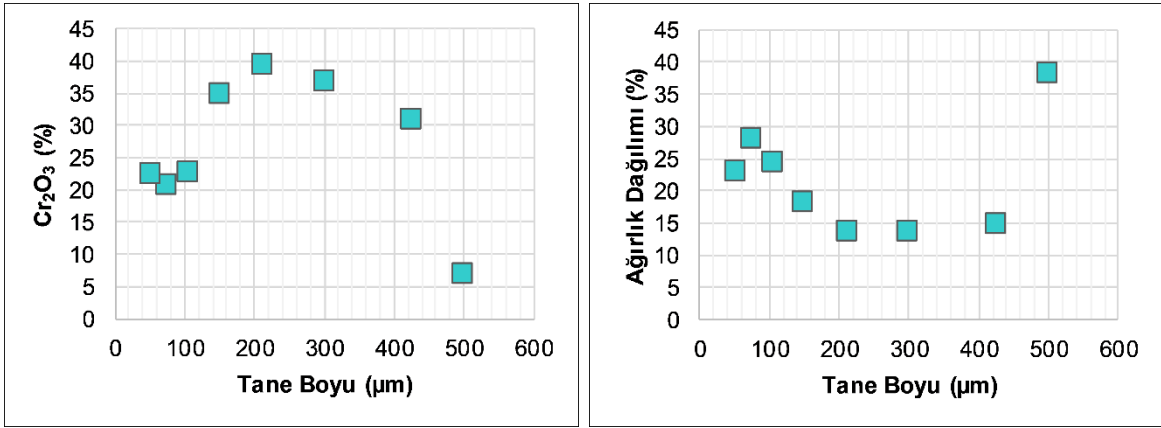
Tablo 7.1. Spiral_C ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarına ait veriler

SPİRAL_C		Ağırlık (%)	Verim (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	TYO
T	Konsantre	17.50	69.62	30.01	3.97
	Ara Ürün	71.03	27.56	2.93	0.39
	Atık	11.46	2.81	1.85	0.25
	Besleme	100.00	100.00	7.55	



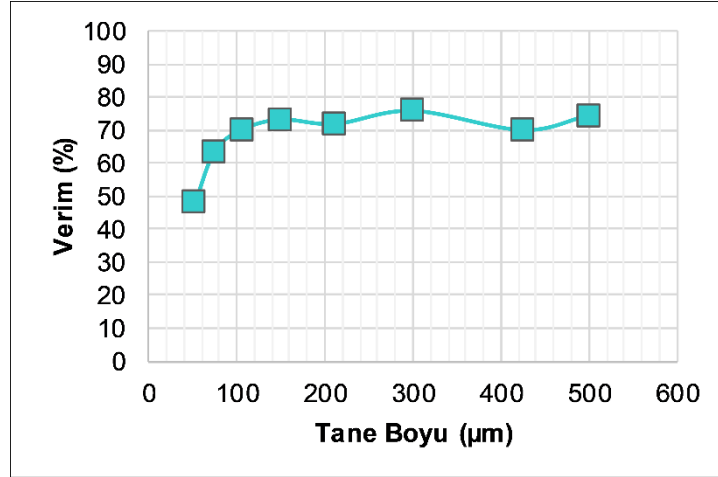
Şekil 7.35. Tesiste yapılan çalışmaya ait akım şeması

Devreden elde edilen sonuçlara göre saatte 7.1 tonluk %30.0 kromit tenörüne sahip konsantre üretilirken, saatte 4.6 tonluk %1.85 kromit tenöründe atık atılmıştır. Spiral beslemesinin ağırlıkça %71.0'lık büyük bir kısmı ise %2.93 kromit tenörüyle ara ürün olarak ayrılmıştır. Fraksiyonel ağırlıkları ve kromit içerikleri bilinen ürünlerden elde edilen konsantre sonuçları Şekil 7.36'da verilmektedir.



Şekil 7.36. Spiral konsantresinin (Spiral_C) tane boyuna bağlı kromit içeriği (solda) ve ağırlık dağılımı (sağda)

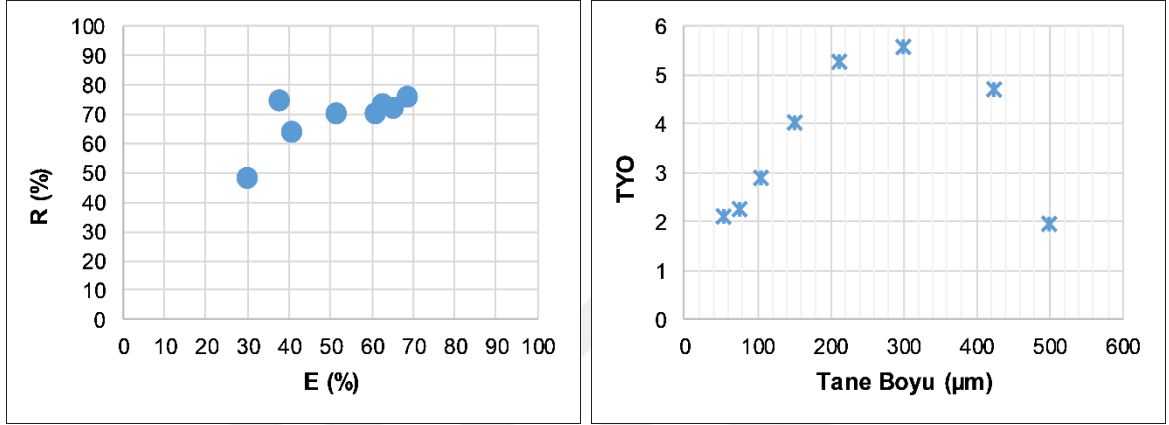
Tane boyu irileştikçe tenörün arttığı, -212+150 μm boyunda en yüksek değerine ulaştığı, ancak bu tane boyundan daha iri tanelerde Cr_2O_3 tenörünün azaldığı görülmektedir. Konsantrenin ağırlıkça dağılımına bakıldığında ise, en iri tane boyu hariç ortalama %15–20 bandında olduğu görülmektedir. Bu veriler doğrultusunda elde edilen konsantre verimi Şekil 7.37'deki gibidir.



Şekil 7.37. Spiral konsantresinin (Spiral_C) tane boyuna bağlı verim dağılımı

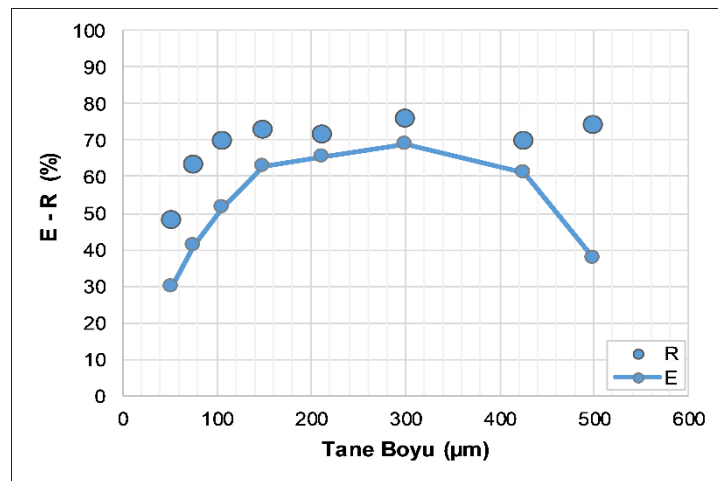
Spiral konsantresinin en ince boyunda %50'lere varan verime ulaşıldığı, tane boyu irileştikçe verimin arttığı görülmüştür. İri tane boylarında verim değerlerinin %70–80 bandına yükseldiği görülmektedir.

Şekil 7.38'deki grafiklerde ayırım performansı (E) ile verim (R) arasındaki ilişki ortaya konmaktadır. Konsantrenin tenör yükseltgeme oranlarına (TYO) bakıldığında, konsantrenin tenör grafiğindeki benzer bir eğilim olduğu görülmektedir. Tane boyu 300 μm 'a kadar arttıkça TYO artmakta, tane boyu daha irileştikçe TYO azalmaktadır.



Şekil 7.38. Spiral konsantresine (Spiral_C) ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrenin tane boyuna bağlı TYO dağılımı (sağda)

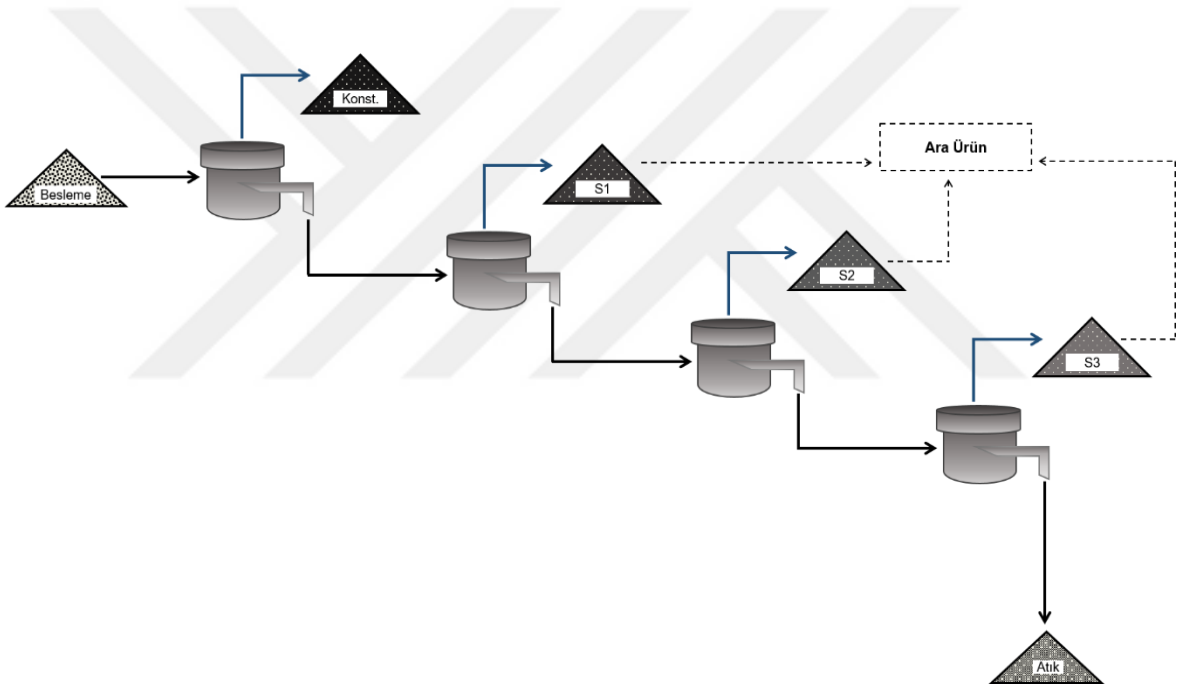
Şekil 7.39'da konsantreye ait ayırım performansı ve verimin tane boyuna bağlı ilişkisi verilmektedir. Konsantrelerin verimi ile ayırım performansları birlikte değerlendirildiğinde sonuçların uyumlu bir dağılım sergilediği görülmektedir. Yalnızca en iri tane boyunda verimin yükselmesi bir sapmaya neden olmuştur.



Şekil 7.39. Spiral konsantresine (Spiral_C) ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi

7.4. Falcon Zenginleştiricisiyle Yapılan Deneysel Çalışmalar

Falcon zenginleştiricisiyle yapılan deneylerde laboratuvar ölçekli L40 model yarı kesikli Falcon zenginleştiricisi kullanılmıştır. Manyetit ve kuvars numuneleri karıştırılarak, %1 ve %5 Fe_3O_4 içerecek şekilde suni beslemeler elde edilmiştir. Numune-II'de bahsi geçen özelliklere sahip $d_{80} = 155 \mu\text{m}$ olan suni besleme -200+20 μm tane boyu aralığında olacak şekilde hazırlanarak Falcon zenginleştiricisine beslenmiştir. 2 farklı besleme tenöründe toplamda 2 adet deney yapılmış (T1 ve T2), ikisinde de aynı yöntem izlenmiştir. Şekil 7.40'ta deneye ait akım şeması verilmektedir.



Şekil 7.40. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan deneye ait akım şeması

2 kg katı besleme numunesi %20 katı içerecek şekilde hazırlanmış ve Falcon zenginleştiricisine beslenmiştir. Ekipman içi su basıncı 1 bar'a ayarlanmış ve 55 Hz (148 G) rotasyon hızında deney gerçekleştirilmiştir. Toplamda 5.30 dakika boyunca besleme yapılmış ve tüm malzeme beslendikten sonra konsantre kabından yaklaşık 200 gr ürün elde edilmiştir. Elde edilen ürün kaba zenginleştirme konsantresi (K) olarak ayrılmıştır. Tane boyuna bağlı yapılan manyetit analizleri sonucunda ince tane boyundaki manyetitlerin konsantreye kazanılamadığı, atıkta olduğu tespit

edilmiştir (Şekil 7.42). Bunun üzerine atık olarak ayrılan ürün Falcon zenginleştiricisine tekrar beslenmiş, atıkta bulunan iri kuvars ve ince manyetitler sebebiyle rotasyon hızı 50 Hz (123 G)'e düşürülmüştür [97]. Deney sonunda konsantre kabından elde edilen ürün süpürme devresi konsantresi (S) olarak ayrılmıştır. Geriye kalan atık iki kez daha aynı koşullarda Falcon zenginleştiricisine beslenmiş ve alınan her konsantre süpürme konsantresi olarak (S1, S2, S3) ayrı ayrı alınmıştır. Atıkta bulunan ince manyetitleri

Falcon zenginleştiricisi ile yapılan laboratuvar çalışmalarına ait görüntüler Şekil 7.41'de verilmektedir.



Şekil 7.41. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan çalışmalara ait resimler

Falcon zenginleştiricisinde K konsantre olarak alınmış, S1, S2 ve S3 ise birleştirilerek ara ürün olarak değerlendirilmiştir. Çizelge 7.12'de verilen sonuçlarda konsantre, ara ürün ve atığa ait verim, tenör ve tenör yükseltgeme oranları verilmektedir.

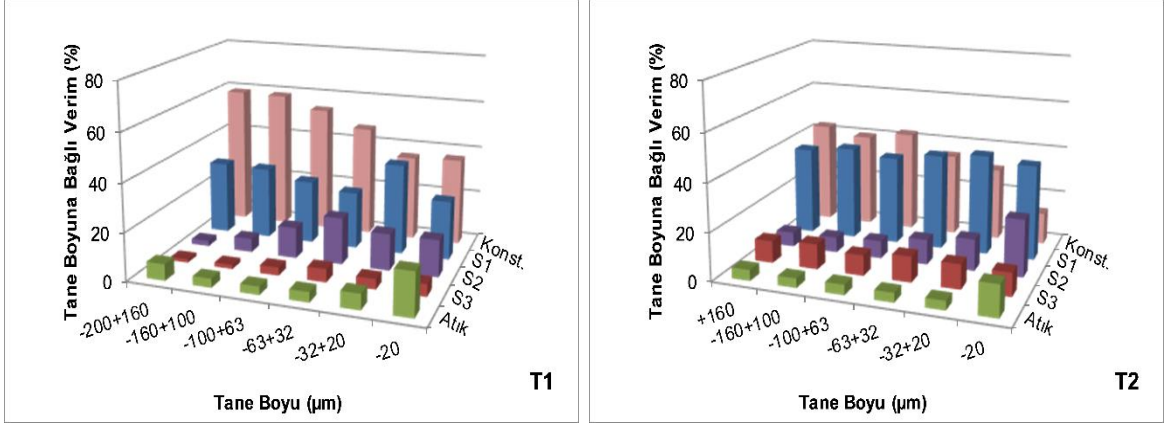
Çizelge 7.12. Falcon zenginleştiricisi deneyine ait sonuçlar

	FALCON	Ağırlık (%)	Verim (%)	Fe ₃ O ₄ (%)	TYO
T1	Konsantre	7.46	50.85	6.83	6.83
	Ara Ürün	34.13	43.16	1.27	1.27
	Atık	58.41	5.99	0.10	0.10
	Besleme	100.00	100.00	1.00	
T2	Konsantre	5.78	36.81	31.87	6.37
	Ara Ürün	38.16	58.26	7.64	1.53
	Atık	56.06	4.93	0.44	0.09
	Besleme	100.00	100.00	5.00	

T1 deneyinde %1 manyetit içeriğine sahip besleme kullanılırken T2 deneyinde %5'lik besleme kullanılmıştır. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde, beslemenin ağırlıkça yaklaşık %57'lik kısmının atığa gittiği görülmektedir. Her iki deneyde de konsantre ve atığın ağırlıkça birbirine yakın oranlarda dağılım gösterdiği görülmektedir. T1'de konsantre verimi %51'lere ulaşırken T2'de %37'lerde kalmıştır. Atık tenörü T1'de %0.10, T2'de ise %0.44 olarak tespit edilmiştir. TYO'lar ise her iki testte de birbirine çok yakındır.

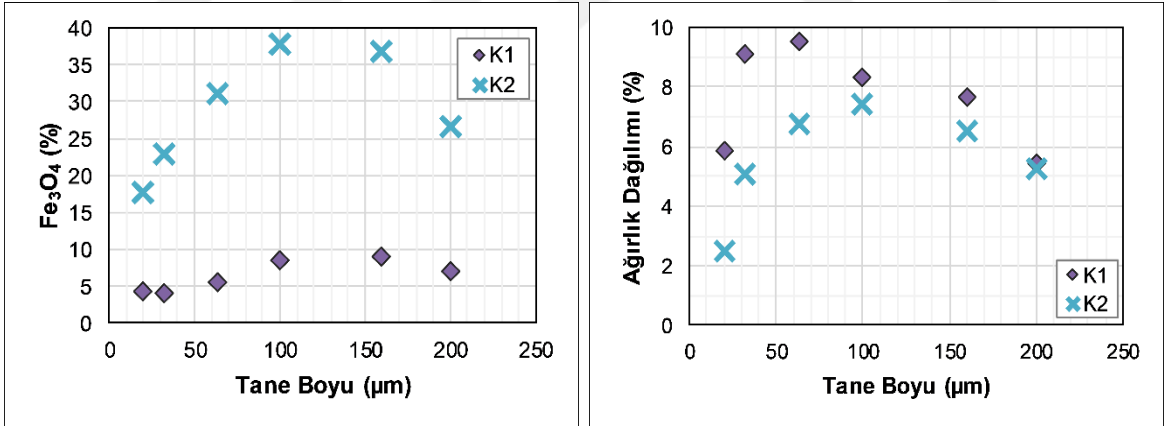
Tane boyuna bağlı verim ve tenör kıyaslaması yapabilmek amacıyla her bir ürün yaş elek analizine tabii tutulmuş ve fraksiyonlara titrasyon yöntemiyle demir analizi yapılmıştır. Elde edilen verim dağılımları Şekil 7.42'deki gibidir.

Sonuçlara göre, T1'in fraksiyonlarında %60'lara ulaşan konsantre verimleri görülürken T2'de konsantre veriminin en fazla %40'larda kaldığı görülmektedir. Atık fraksiyonlarındaki manyetit verimlerine bakıldığında ise sallantılı masa sonuçlarına benzer şekilde 20 µm'dan ince tanelerde manyetit kaçağının olduğu görülmektedir. Bu oran T1'de %18 iken T2'de %13'lerdedir. Bu değer, atığın diğer tane boylarındaki manyetit verimine oranla yüksek olmasına rağmen, sallantılı masanın en ince boydaki atık verileriyle kıyaslandığında oldukça düşüktür.



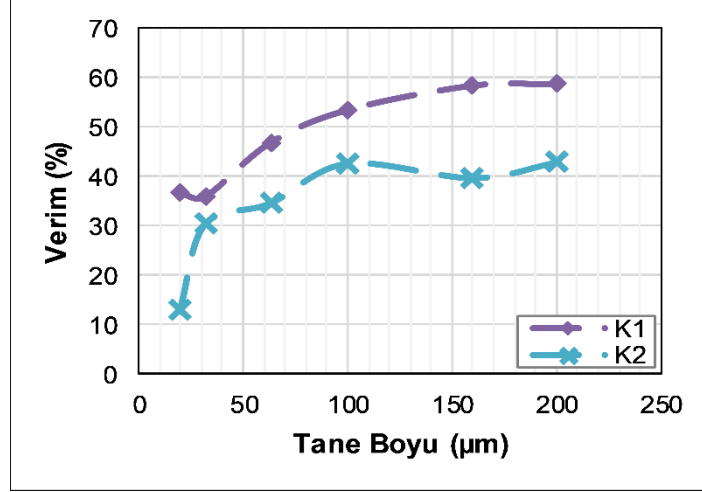
Şekil 7.42. Falcon zenginleştiricisi ürünlerinin tane boyuna bağlı verim değerleri

Şekil 7.43'te Falcon konsantresi fraksiyonlarına ait bir değerlendirme yer almaktadır. Tane boyu bazında tenör sonuçlarına bakıldığında, %5 tenörlü besleme ile yapılan T2 deneyinin T1 sonuçlarına oranla çok daha yüksek değerler verdiği görülmektedir. K1 ve K2 sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, fraksiyonel bazda ağırlık dağılımının ise her iki koşulda da nerdeyse birbiriyle aynı olduğu görülmektedir.



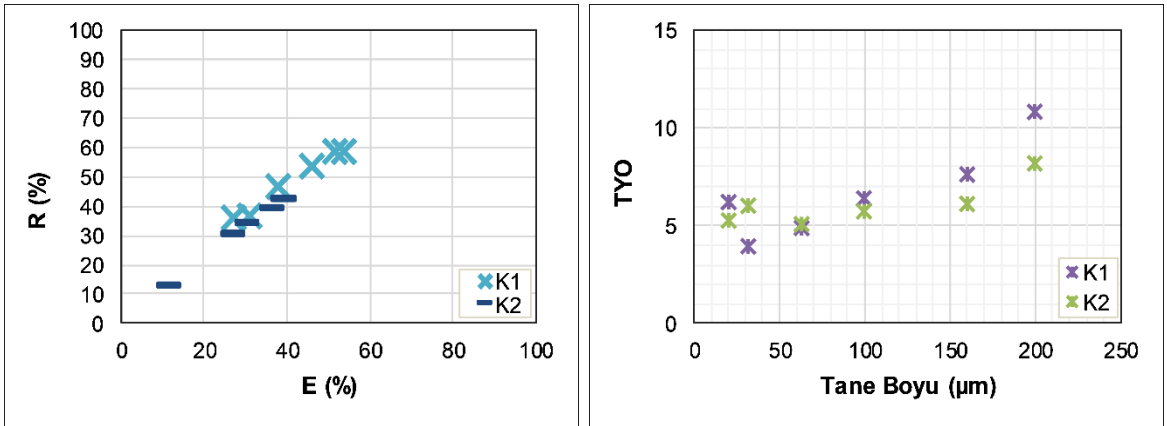
Şekil 7.43. Falcon zenginleştiricisi konsantrelerinin tane boyuna bağlı manyetit içerikleri (solda) ve ağırlık dağılımları (sağda)

T1 ve T2 deneyinin tane boyuna bağlı verim sonuçları Şekil 7.44'te verilmektedir. Bu sonuçlara göre %1 tenöre sahip beslemeyle yapılan T1 deneyinin fraksiyonel konsantre verimi T2'ye göre daha yüksek bulunmuştur. Her iki deneyde de tane boyu arttıkça konsantre veriminin artan bir eğilimde olduğu görülmektedir.



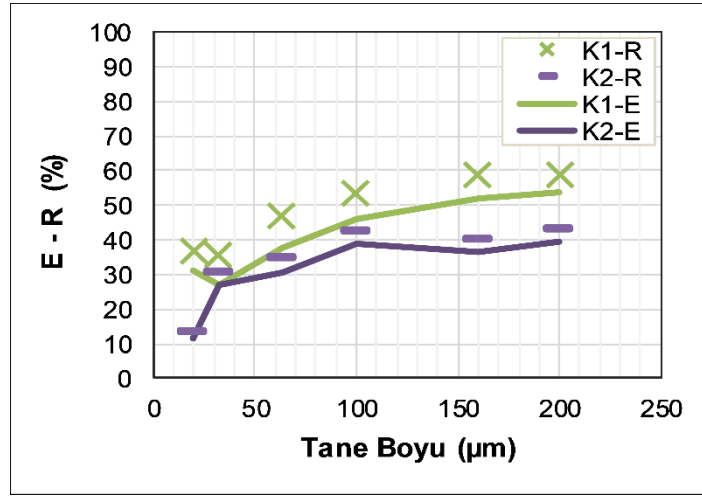
Şekil 7.44. Falcon zenginleştiricisi konsantrelerinin tane boyuna bağlı verim kıyaslamaları

Deneylerde konsantre verimleri ve ayırım performansı arasındaki ilişki değerlendirildiğinde Şekil 7.45'te görülebileceği gibi doğrusal bir ilişki elde edilmiştir. Besleme tenörleri farklı olmasına rağmen TYO'lar birbiriyle nerdeyse aynı oranları vermiştir.



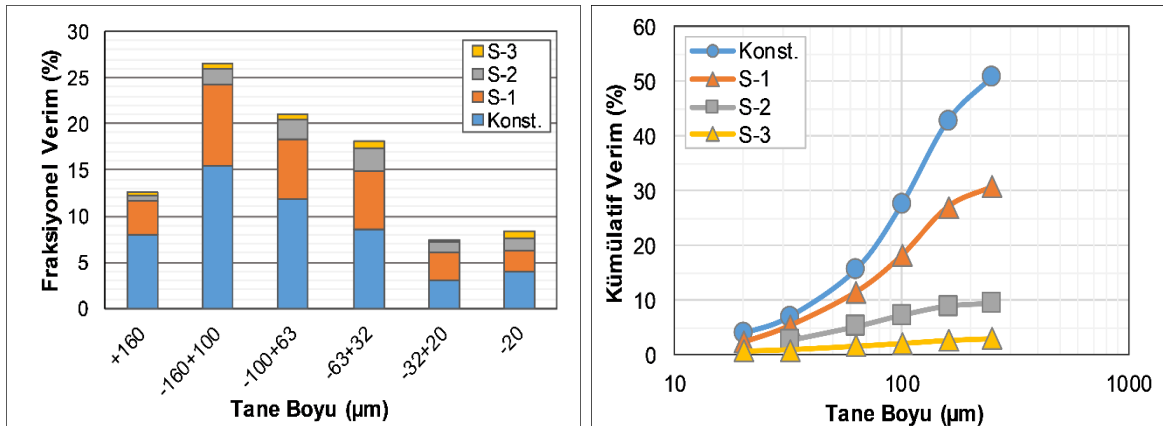
Şekil 7.45. Falcon zenginleştiricisi konsantrelerine ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrelerin tane boyuna bağlı TYO ilişkileri (sağda)

Tane boyuna bağlı ayırım performansı ve verim arasındaki ilişki Şekil 7.46'da bir arada değerlendirildiğinde, uyumlu bir tablo ortaya çıkmaktadır. Konsantrelerin verim değerleri her ne kadar sallantılı masa sonuçlarına göre düşük olsa da, tane boyu bazında artan bir eğilimde olduğu görülmektedir.



Şekil 7.46. Falcon zenginleştiricisi konsantrelerine ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi

Falcon zenginleştiricisinde elde edilen ürünlerin tamamındaki metal kazanımı T1'e göre değerlendirildiğinde, -160+100 μm tane boyunda, diğer tane boyu fraksiyonlarına oranla daha fazla Fe_3O_4 kazanımı olduğu görülmektedir (Şekil 7.47). Ara ürünlerle birlikte değerlendirildiğinde, bu tane boyundaki kazanım %28'lere yaklaşmaktadır. Ara ürünlerin tamamının konsantreyle birlikte alındığı durumda verim %94'e ulaşırken tenör %2.46'ya gerilemektedir. İlk alınan konsantreden son alınan ara ürüne gidildikçe metal kazanımının oldukça düştüğü yine Şekil 7.47'de görülmektedir. Aynı zamanda, iri tane boylarındaki metal kazanımının, ince boylara göre daha fazla olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 7.47. Falcon zenginleştiricisinde fraksiyonel verim dağılımları

7.5. MGS (Yüksek Yerçekimli Ayırıcı) ile Yapılan Deneysel Çalışmalar

MTA Genel Müdürlüğü Cevher Zenginleştirme Laboratuvarları'nda bulunan Mozley C900 tipi laboratuvar ölçekli MGS ekipmanı (Şekil 7.48) kullanılarak test çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 7.48. MGS ekipmanı ile yapılan deneysel çalışmalara ait görüntüler

Deneylerde kullanılan cihazın kapasitesi 0.2 t/sa'tır. Tamburun dakikadaki devir sayısı 100–280 rpm, tamburun eğim açısı 0–9° ve yıkama suyu hızı 0–10 lt/dk aralığında değişebilmektedir. Ekipmandaki genlik değeri 10 mm, 15 mm, 20 mm ve frekans değeri 4 Hz, 4.8 Hz, 5.7 Hz olarak ayarlanabilmektedir.

Deneylerde Bölüm 7.1.1'de bahsedilen özellikte suni besleme numunesi kullanılmıştır (Numune-I). Deney düzeneği, ürün olarak konsantre ve atık alınacak şekilde tasarlanmıştır. Besleme hızı ve yıkama suyu hızı sabit tutulmuş, ekipmanın dönme hızı ve eğimi değiştirilerek numuneler alınmıştır. Deneylere ait değişken parametreler Çizelge 7.13'te verilmektedir.

Çizelge 7.13. MGS deneylerine ait parametreler

Deney Kodu	Ekipman Eğimi (°)	Tambur Dönme Hızı (rpm)
T1	3	160
T2	3	180
T3	3	200
T4	5	160
T5	5	180
T6	5	200
T7	5	220

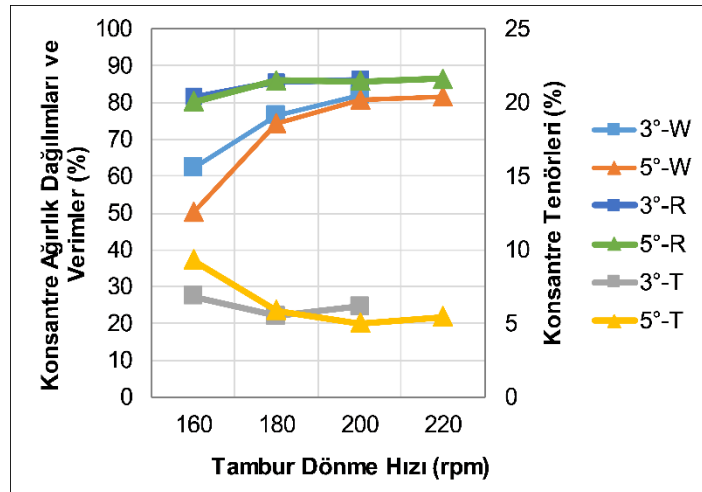
Besleme tenörü başlangıçta %5 manyetit olacak şekilde ayarlanmasına rağmen, analizler sonucunda yapılan geriye dönük hesaplamalarda tenör değerlerinin %4.19–5.43 aralığında değiştiği görülmektedir. Deneylerde numune alımına, besleme yapıldıktan 15 dakika sonra başlanmıştır. Numuneler eş zamanlı olarak alınmıştır. Suyu filtrelenip kurutulduktan sonra XRF analizi ile manyetit tenörünün tayini için MTA laboratuvarlarına gönderilmiştir.

Çizelge 7.14'te, MGS ekipmanı ile yapılan deneyin sonuçları verilmektedir. Farklı eğimlerde ve farklı tambur hızlarında yapılan deneysel çalışmalara ait konsantre ağırlık dağılımları, konsantre verimleri ve konsantre tenörlerine ait toplu sonuçlar ise Şekil 7.49'de grafiksel olarak gösterilmektedir.

Şekil 7.49'de konsantrelerin verim (R) grafiğine bakıldığında, MGS tamburunun eğiminden bağımsız olarak, tamburun farklı dönme hızları için aynı değerleri verdiği görülmektedir. Konsantreye giden malzeme miktarı (W) tamburun düşük dönme hızlarında azken, tambur hızı arttıkça konsantreye giden miktarın hem 3°'lik sonuçlarda hem de 5°'lik sonuçlarda arttığı görülmektedir. Konsantre tenörünün (T) ise tamburun dönme hızı arttıkça düştüğü görülmektedir.

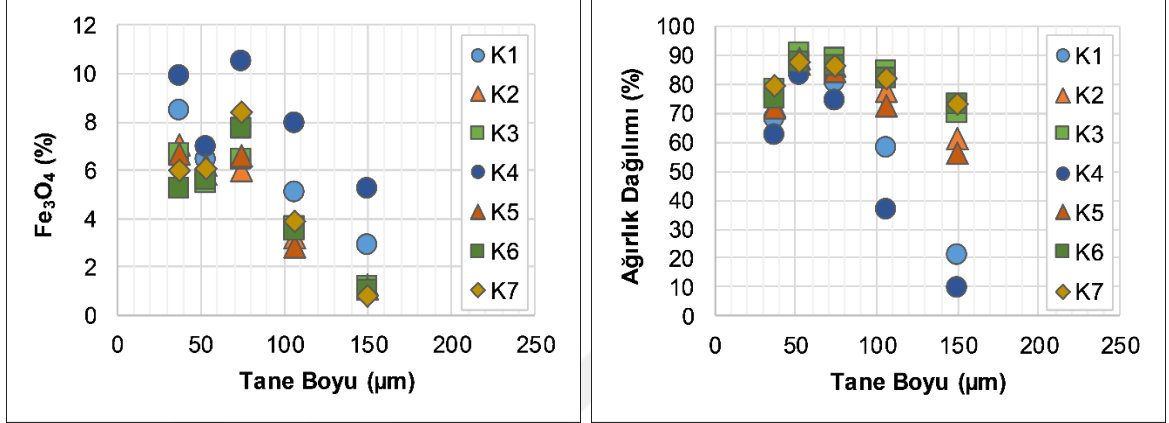
Çizelge 7.14. MGS ile yapılan deneylere ait sonuçlar

MGS		Ağırlık (%)	Verim (%)	Fe ₃ O ₄ (%)	TYO
T1	Konsantre	62.06	81.97	6.62	1.32
	Atık	37.94	18.03	2.38	0.48
	Besleme	100.00	100.00	5.01	
T2	Konsantre	76.55	83.99	4.60	1.10
	Atık	23.45	16.02	2.86	0.68
	Besleme	100.00	100.00	4.19	
T3	Konsantre	82.08	84.35	4.65	1.03
	Atık	17.92	15.65	3.96	0.87
	Besleme	100.00	100.00	4.53	
T4	Konsantre	50.23	81.63	8.82	1.62
	Atık	49.77	18.37	2.00	0.37
	Besleme	100.00	100.00	5.43	
T5	Konsantre	74.08	83.77	4.75	1.13
	Atık	25.92	16.23	2.63	0.63
	Besleme	100.00	100.00	4.20	
T6	Konsantre	80.68	85.14	4.68	1.06
	Atık	19.32	14.86	3.41	0.77
	Besleme	100.00	100.00	4.43	
T7	Konsantre	81.51	84.47	5.13	1.04
	Atık	18.49	15.53	4.16	0.84
	Besleme	100.00	100.00	4.95	



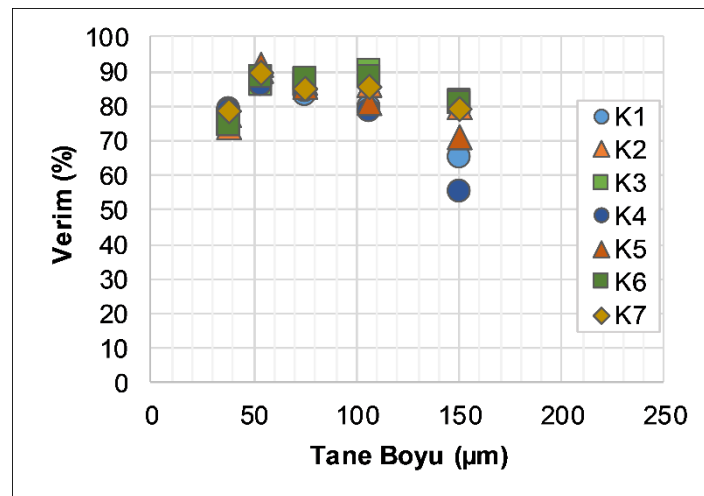
Şekil 7.49. MGS ile yapılan deneylerde konsantrelere ait sonuçlar

Elde edilen konsantre ürünlerinin tane boyuna bağlı davranışlarını detaylı inceleyebilmek adına numunelere yaş elek analizi uygulanmış ve fraksiyonların tenör içerikleri XRF yöntemiyle belirlenmiştir. Konsantrelerin tane boyuna bağlı tenörleri ve ağırlık dağılımları Şekil 7.50'da verilmektedir.



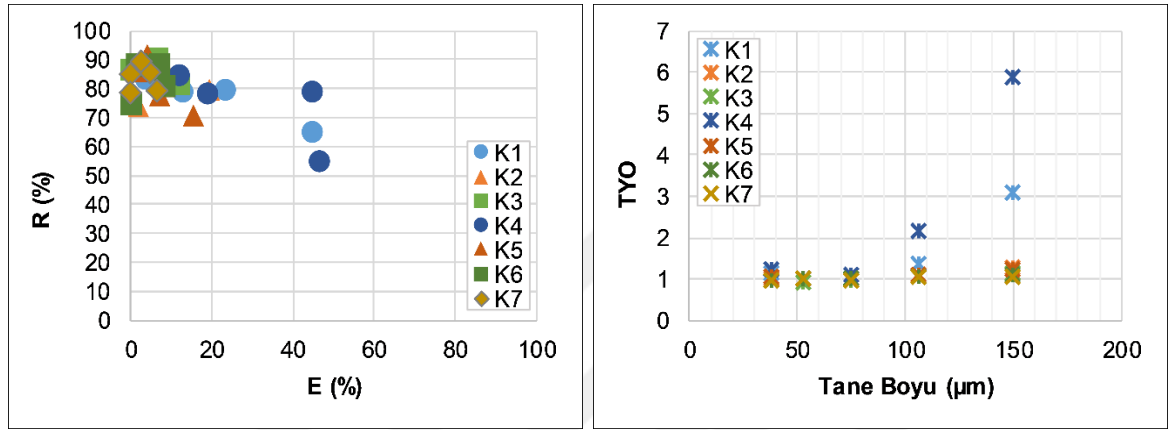
Şekil 7.50. MGS ekipmanı konsantrelerinin tane boyuna bağlı manyetit içerikleri (solda) ve ağırlık dağılımları (sağda)

Sonuçlara göre MGS ekipmanının tambur hızı ve eğimi fark etmeksizin tane boyu arttıkça konsantrelerin tenör değerleri de düşmektedir. Malzemenin konsantreye gitme oranları tüm deneylerdeki tane boylarında %50'nin üzerinde kalmasına rağmen, bu oran 160 rpm hızında yapılan yavaş tambur hızı deneylerindeki (T1 ve T4) iri tane boylarında oldukça düşmektedir.



Şekil 7.51. MGS ekipmanı konsantrelerinin tane boyuna bağlı verim kıyaslamaları

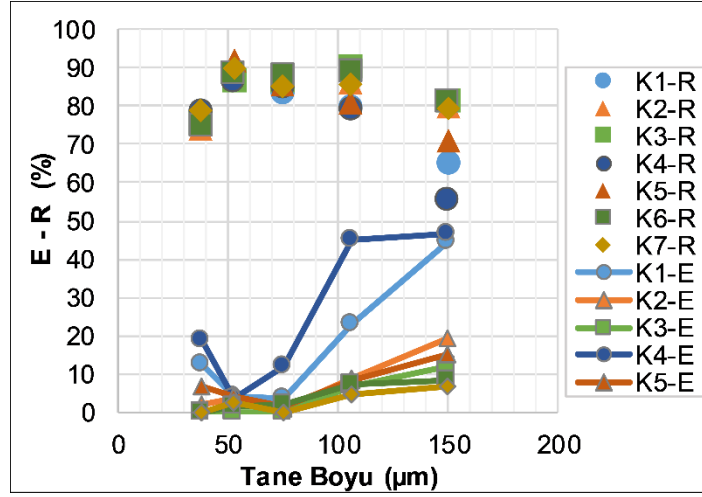
Konsantrelere ait verim grafiği Şekil 7.51'deki gibidir. Tüm deneylere ait konsantrelerin verim değerleri bütün tane boylarında %50'nin üzerinde olmakla birlikte en fazla %90 verimlere ulaştığı görülmektedir. Konsantrelerin verim ve ayırım performansları arasındaki ilişkilerle birlikte tane boyuna bağlı TYO'lar Şekil 7.52'de gösterilmektedir.



Şekil 7.52. MGS ekipmanı konsantrelerine ait E ve R değerlendirmesi (solda), konsantrelerin tane boyuna bağlı TYO ilişkileri (sağda)

Sonuçlar değerlendirildiğinde verimler ve ayırım performansları arasında doğrusal bir ilişki ortaya konamamıştır. Verimler çok yüksek olmasına rağmen ayırım performanslarının çok düşük olduğu görülmektedir. TYO'lar tüm tane boyları için 1 civarında kalmakta, yalnızca K1 ve K4 verilerinin en iri tane boyu sonuçlarında kısmen yüksek değerler verdiği görülmektedir.

Verim ve ayırım performansları arasındaki ilişki Şekil 7.53'de tane boyu bazında ortaya konmuştur. Buna göre, tüm tane boylarındaki ayırım performansı değerleri (E) %20'yi geçemezken, yalnızca T1 ve T4 deneyleri olan 160 rpm hızda yapılan deneylerde ayırım performansının, iri boylarda %50'lere çıkabildiği görülmektedir.



Şekil 7.53. MGS ekipmanı konsantrelerine ait E ve R değerlerinin tane boyuyla ilişkisi

Ancak Şekil 7.52'deki verim-ayrım performansı grafiğinden bilindiği üzere, konsantre sonuçları Şekil 7.53'de de biriyle uyumlu sonuçlar vermemektedir. Konsantrenin tane boyu bazındaki ayırma performansı değerleriyle verim değerleri birlikte kıyaslandığında, bu farklılıklar net olarak görülmektedir. Besleme özelliğinin MGS'deki ayırma uygun olmaması sebebiyle bu tür farklılıkların görüldüğü ve bu sebeple cevherin yeterince zenginleşmediği ortaya konmuştur.

8. AYRIM PERFORMANS KRİTERLERİ İLE TANE BOYU İLİŞKİSİNİN MATEMATİKSEL DEĞERLENDİRMESİ

Sallantılı masa, spiral zenginleştirici ve Falcon zenginleştiricisiyle yapılan çeşitli deneylerden elde edilen konsantre verileri Minitab® 18 programında kullanılmıştır. Minitab® 18 programında yapılan çalışmalarda, tane boylarının geometrik ortalamaları (d) kullanılarak verim değerlerinin hesaplanması hedeflenmiştir. Bu amaçla çoklu regresyon analizi kullanılarak, bahsi geçen her bir çalışmaya özgü eşitlikler geliştirilmiştir.

8.1. Sallantılı Masa

Sallantılı masalarla yapılan Masa_A ve Masa_B çalışmalarında, testlerin ortalama değerleri kullanılarak her bir ekipman için birer eşitlik geliştirilmiştir. Aşağıda yer alan Denklem 31 Masa_A verilerinin, Denklem 32 de Masa_B verilerinin eşitliklerini göstermektedir:

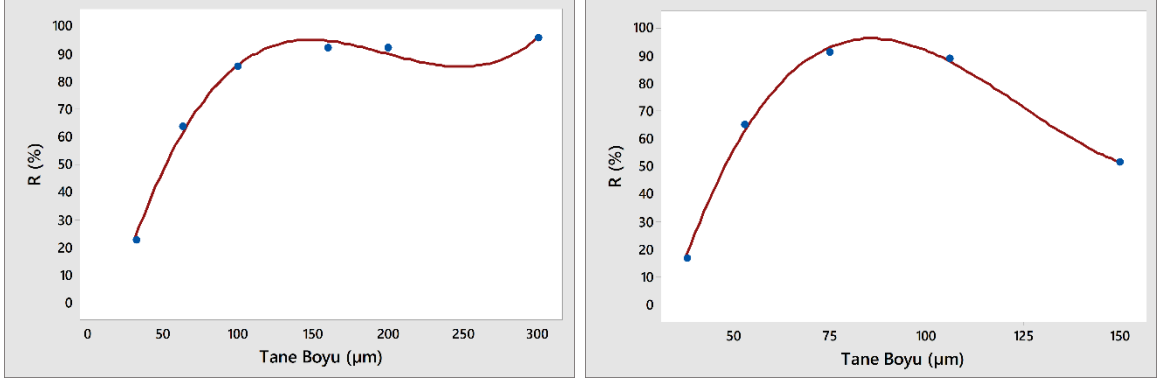
Masa_A;

$$R = -43 + (2.3 \times (d)) - (0.012 \times (d)^2) + (0.00002 \times (d)^3) \quad (31)$$

Masa_B;

$$R = -194 + (8.2 \times (d)) - (0.073 \times (d)^2) + (0.0002 \times (d)^3) \quad (32)$$

Yapılan çalışmalarda Masa_A için belirtme katsayısı olan R^2 değeri 0.96, Masa_B için R^2 değeri 0.99 olarak bulunmuştur. Yukarıda belirtilen denklemleri ifade eden eğriler Şekil 8.1'deki grafiklerde gösterilmektedir.



Şekil 8.1. Masa_A (solda) ve Masa_B (sağda) denklemlerini gösteren eğriler

8.2. Spiral Zenginleştirici

Spiral_A ve Spiral_B testlerinden elde edilen sonuçlar tane boyuna bağlı verim tahmininde bulunabilmek amacıyla kullanılmıştır. Denklem 33'te Spiral_A çalışmalarında elde edilen verilerin, Denklem 34'te de Spiral_B'den elde edilen verilerin verim hesaplamasında kullanılan eşitlikleri verilmektedir:

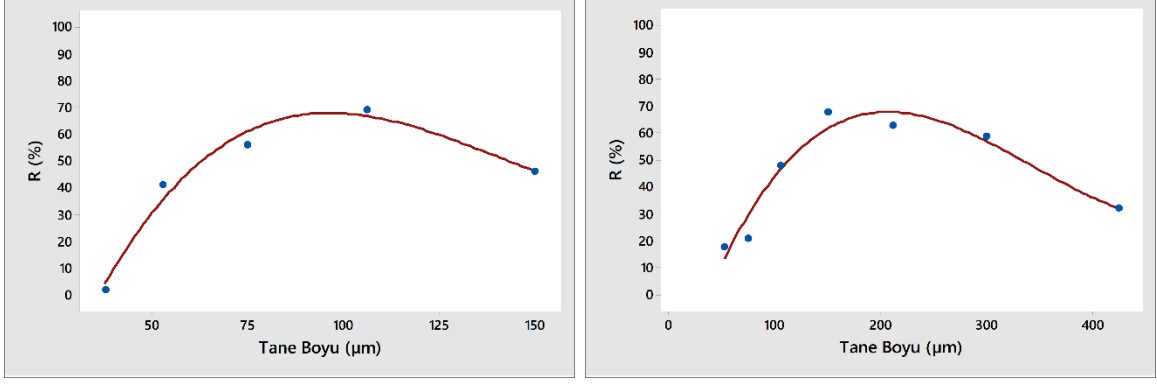
Spiral_A;

$$R = -43 + (2.3 \times (d)) - (0.012 \times (d)^2) + (0.00002 \times (d)^3) \quad (33)$$

Spiral_B;

$$R = -50 + (1.4 \times (d)) - (0.005 \times (d)^2) + (0.000005 \times (d)^3) \quad (34)$$

Spiral_A için belirtme katsayısı olan R^2 değeri 0.90, Spiral_B için R^2 0.89 olarak bulunmuştur. Yukarıda belirtilen denklemlerin geçtiği eğrileri gösteren grafikler Şekil 8.2'de verilmektedir.



Şekil 8.2. Spiral_A (solda) ve Spiral_B (sağda) denklemlerini gösteren eğriler

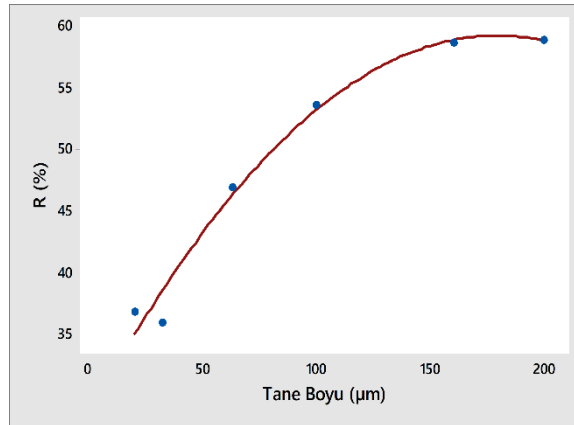
8.3. Falcon Zenginleştiricisi

Denklem 35'te, Falcon zenginleştiricisinden elde edilen veriler için bir eşitlik geliştirilmiştir:

Falcon zenginleştiricisi;

$$R = 20 + (0.4 \times (d)) - (0.01 \times (d)^2) \quad (35)$$

Falcon zenginleştiricisi için, belirtme katsayısı olan R^2 değeri 0.84 olarak bulunmuştur. Yukarıda belirtilen denklemin geçtiği eğriyi gösteren grafik Şekil 8.3'te verilmektedir.



Şekil 8.3. Falcon zenginleştiricisi denklemini gösteren eğri

9. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Deneyler kapsamında spiral zenginleştirici, sallantılı masa, MGS ve Falcon zenginleştiricisi gibi çeşitli yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanları, farklı numune türleri ve tane boylarında test edilmişlerdir. Deneylerde kullanılan ekipmanların özellikleri ile bunlara beslenen numunelere ait bilgiler Çizelge 9.1’de özetlenmektedir.

Çizelge 9.1. Deneylerde kullanılan ekipman ve besleme numunesine ait özellikler

Ekipman Adı	Ekipmana Ait Özellikler	Ürünler	Besleme Türü	Besleme Tane Boyu	Numune Türü
Spiral_A	Mineral Deposit A87D model 600 mm çaplı laboratuvar ölçekli tek kademe spiral	Konsantre, Atık	Manyetit – Kuvars	-150+38 μ m	Suni besleme
Spiral_B	Multotec HX5, SC21, SC21/5 ve HX3 model 600 mm ve 1000 mm çaplı tesis ölçekli 4 kademe spiral devresi	Konsantre, Atık	Kromit cevheri	-425+53 μ m	Değirmen çıkışı
Spiral_C	Multotec HX5 ve SC21 model 600 mm ve 1000 mm çaplı tesis ölçekli 2 kademe spiral devresi	Konsantre, Atık	Kromit cevheri	-425+53 μ m	Değirmen çıkışı
Masa_A	Wifley 87100 model laboratuvar ölçekli masa	Konsantre, Ara ürün, Atık	Manyetit – Kuvars	-300+32 μ m	Suni besleme
Masa_B	Super Duty RH 15S SD model laboratuvar ölçekli masa	Konsantre, Atık	Manyetit – Kuvars	-150+38 μ m	Suni besleme
Falcon zenginleştiricisi	L40 model yarı kesikli laboratuvar ölçekli zenginleştirici	Konsantre, Ara ürün, Atık	Manyetit – Kuvars	-200+20 μ m	Suni besleme

Çizelge 9.1’de verildiği üzere deneylerde hem suni karışım hem de kromit tesisi değirmen çıkışı numunesi besleme olarak kullanılmıştır. Suni karışım olarak manyetit-kuvars karışımı seçilmiştir. Spiral zenginleştiricilerde hem laboratuvar ölçekli hem de tesis ölçekli ekipmanlarla testler yapılmıştır. Sallantılı masalar, Falcon zenginleştiricisi ve MGS ekipmanlarında ise yalnızca laboratuvar ölçekli ekipmanlarla testler yapılmıştır.

Sallantılı masalarda kaybedilen ince tanelerin kazanımı için santrifüjlü yerçekimi ile ayırma ekipmanlarından olan MGS tercih edilmiştir. Ancak besleme türünün bu ekipmanda yapılan zenginleştirmeye uygun olmaması sebebiyle düzgün bir ayırım gözlenememiştir. Bu sebeple, deneylerin toplu değerlendirilmesi sürecinde MGS ekipmanından elde edilen sonuçlara yer verilmeyecektir.

Deneylerin sonucunda her bir ekipmanın ortalama tane boyuna bağlı tenör yükseltgeme oranları (TYO), verim (R), ayırım performansı (E) ve çökelme hızları (v_T) gibi sonuçlar, literatürde yer alan bilgilerle kıyaslanmıştır.

❖ Regresyon çalışmalarıyla ilgili değerlendirmeler:

Sediman taşınımının tüm koşullar altındaki etkisinin, bir ya da birkaç parametreyle açıklanamayacak kadar karmaşık olduğu gerekçesiyle, literatürde yapılan çalışmalarda regresyon yaklaşımı benimsenmiştir [98]. Buna göre laboratuvar ya da tesis uygulamalarından elde edilen veriler, farklı istatistik ve matematiksel yöntemler kullanılarak pek çok yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanının modellemesinde kullanılmıştır [3], [55], [69], [75], [82], [84], [85].

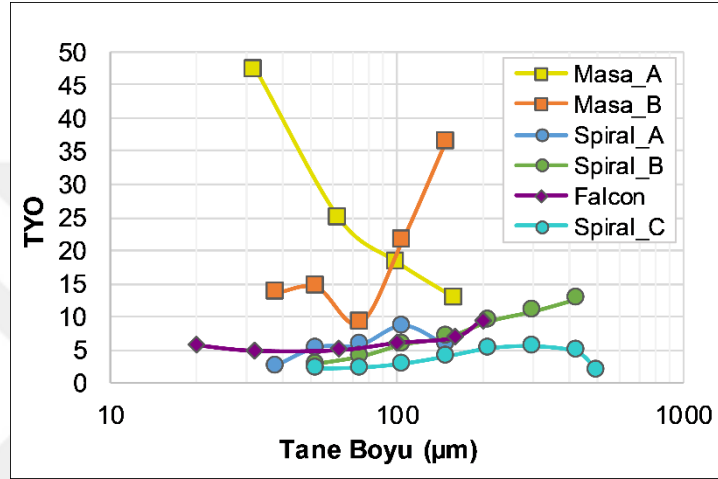
Bu çalışmada da, deneylerin ortalama tenör ve verim değerleri kullanılarak, ekipmanlarındaki ayırım matematiksel olarak ifade edilmiştir. Ekipmanların verimini tahmin edebilmek adına polinom denklemleri kullanılarak ampirik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Verimleri (R), tanelerin geometrik ortalamaları alınmak koşuluyla, tane boyuna (d) bağlı hesaplayabilmek için Minitab® 18 programı kullanılmıştır. Regresyon analizi sonucunda geliştirilen eşitliklerin toplu gösterimi Çizelge 9.2'de verilmektedir:

Çizelge 9.2. Çeşitli ekipmanlardan hesaplanan verim eşitlikleri

Ekipman Türü	Verim Eşitlikleri	R ²
Masa_A	$R = -43 + (2.3 \times (d)) - (0.012 \times (d)^2) + (0.00002 \times (d)^3)$	0.96
Masa_B	$R = -194 + (8.2 \times (d)) - (0.073 \times (d)^2) + (0.0002 \times (d)^3)$	0.99
Spiral_A	$R = -43 + (2.3 \times (d)) - (0.012 \times (d)^2) + (0.00002 \times (d)^3)$	0.90
Spiral_B	$R = -50 + (1.4 \times (d)) - (0.005 \times (d)^2) + (0.000005 \times (d)^3)$	0.89
Falcon	$R = 20 + (0.4 \times (d)) - (0.01 \times (d)^2)$	0.84

❖ Tenör yükseltgeme oranlarına ait değerlendirmeler:

Tüm çalışmalardan elde edilen tane boyuna bağlı tenör yükseltgeme oranlarının (TYO) toplu gösterimi Şekil 9.1'de verilmektedir. Besleme tenörleri deneyden deneye değişiklik gösterdiğinden, tane boyu bazında tenörlerin kıyaslanması yerine TYO'ların ortalama değerlerinin kıyaslanması daha uygun bulunmuştur.



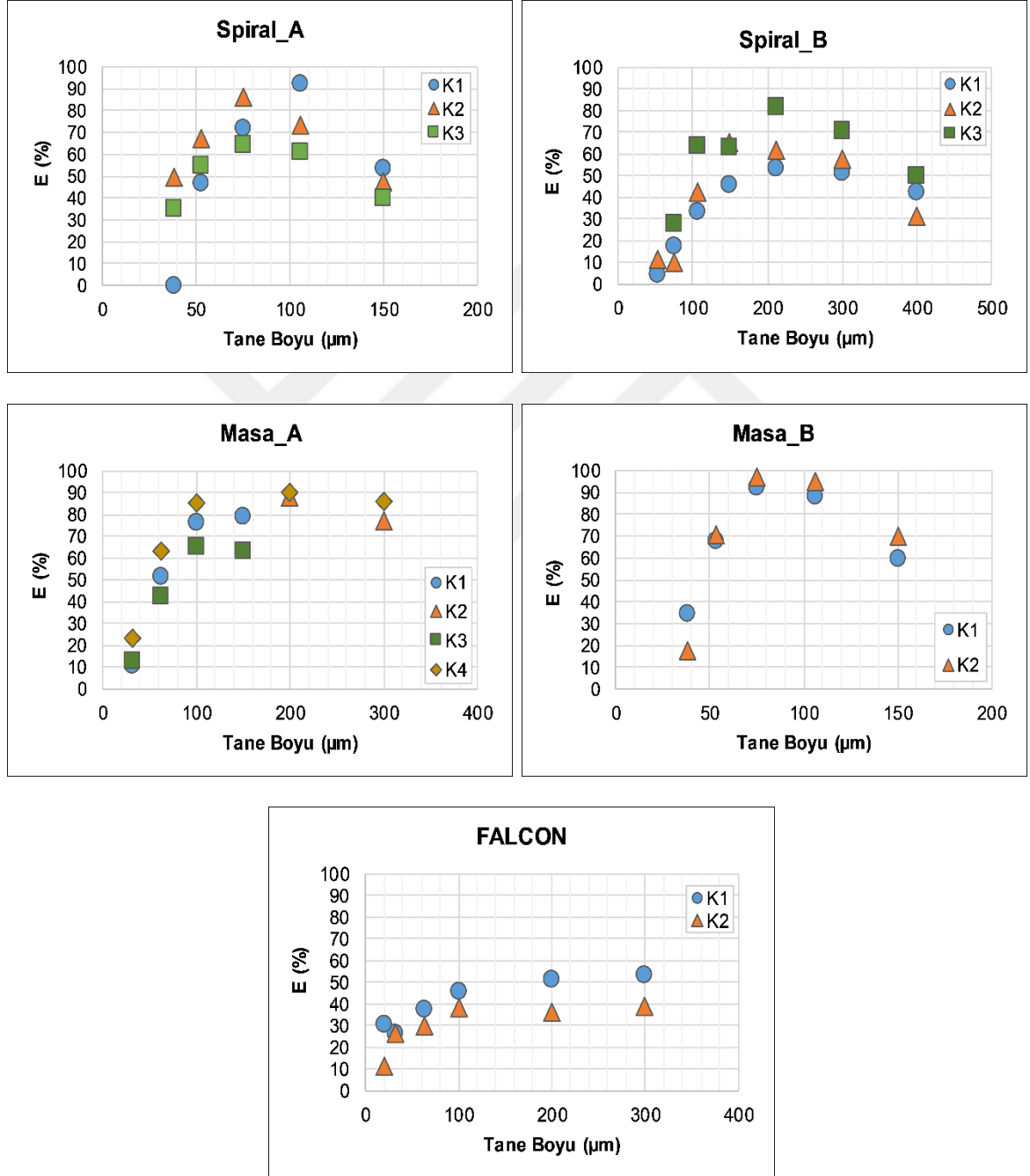
Şekil 9.1. Tüm deneylerin konsantrelerinde tane boyuna karşılık gelen ortalama TYO değerleri

Masa_A'da, diğer sonuçlardan farklı olarak tane boyu arttıkça TYO'larda düşüş yaşanmıştır. Besleme hızı, yıkama suyu hızı ve tercih edilen konsantre bandı genişliğinin bu sonuca sebep olduğu düşünülmektedir. Ortalama TYO'lar düşünüldüğünde en yüksek sonuçlar sallantılı masalardan alınırken (35–50), bunu sırasıyla spiral zenginleştirici (5–13) ve Falcon zenginleştiricisinin (~10) takip ettiği görülmektedir.

❖ Verim / Ayrım performanslarına ait değerlendirmeler:

Yapılan deneylerin konsantrelerine ait tane boyuna bağlı ayırım performansı (E) değerleri ekipman bazında değerlendirilmiştir (Şekil 9.2).

Spiral_A ve Spiral_B’de sırasıyla yavaş, orta ve hızlı besleme debilerinde yapılan deney sonuçları verilmektedir. İnce boyda suni manyetit-kuvars beslemesiyle yapılan Spiral_A çalışmasında ideal verim koşulu orta hızda elde edilirken, iri boyda kromit cevheriyle yapılan Spiral_B çalışmasında ideal verim koşulu yüksek hızda elde edilmiştir.

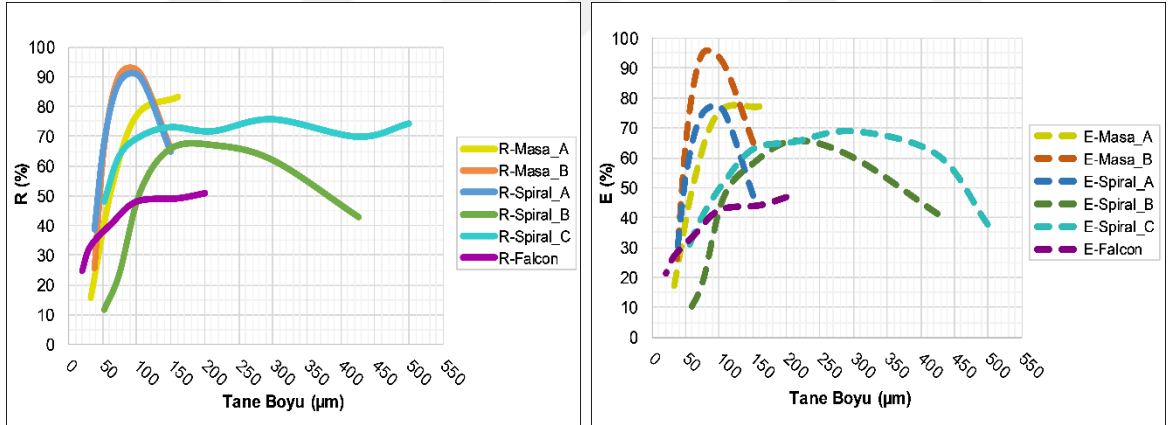


Şekil 9.2. Zenginleştirme ekipmanlarında farklı koşullarda elde edilen tane boyuna bağlı ayırım performansı değerleri

Masa_A'da yaklaşık %1 ve %5 besleme tenörlerine sahip suni manyetit-kuars beslemesiyle yapılan çalışmalarda, besleme tenörünün ayırım performansını çok değiştirmedeği görülmüştür. Masa_B'de yaklaşık %1 besleme tenörüne sahip suni manyetit-kuars beslemesiyle iki farklı hızda yapılan çalışmada ise çalışılan aralıkta, besleme hızının ayırım performansı üzerinde çok etkili olmadığı sonucuna varılmıştır.

Falcon zenginleştiricisinde %1 ve %5'lik besleme tenörüne sahip suni manyetit-kuars karışımıyla yapılan çalışmalarda, düşük besleme tenöründe ve iri tane boyunda daha yüksek ayırım performansına ulaşıldığı görülmektedir.

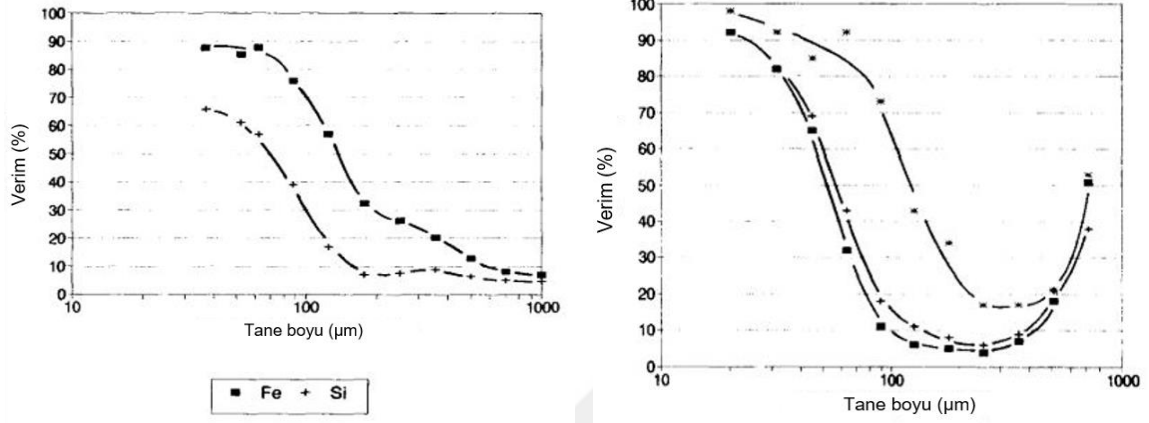
Deneyisel çalışmaların neticesinde, test edilen tüm ekipmanların ortalama verim ve ayırım performanslarına ait toplu sonuçlar ise Şekil 9.3'te verilmektedir.



Şekil 9.3. Deneyisel çalışmalarda elde edilen tane boyuna bağlı verim (solda) ve ayırım performansı (sağda) grafikleri

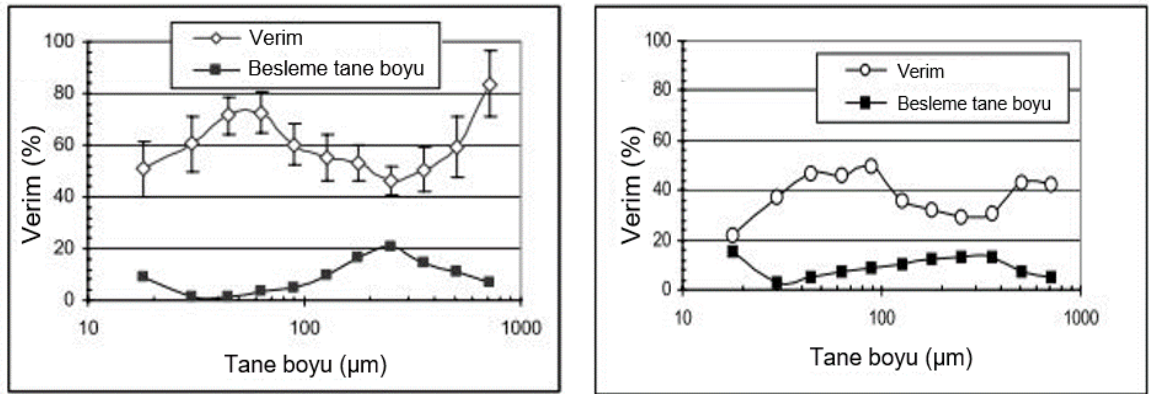
Falcon zenginleştiricisiyle yapılan deneyler sonucunda elde edilen nihai konsantre veriminin, 100 µm tane boyundan itibaren tane boyu irileştikçe sabit kaldığı görülmektedir. Falcon ve Knelson zenginleştiricisiyle ilgili literatürde yer alan bilgiler incelendiğinde ise, tane boyu irileştikçe verimin düştüğü bilinmektedir [99], [100].

Örneğin Şekil 9.4'te, Falcon zenginleştiricisinde manyetit-kuvars suni beslemesi kullanılarak, farklı yatak kalınlıklarındaki tane boyuna bağlı verim davranımları verilmiştir [99], [100].



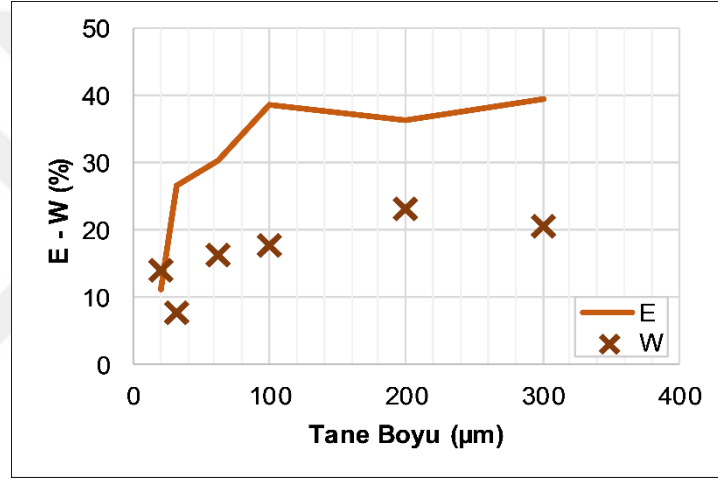
Şekil 9.4. Falcon zenginleştiricisi çalışmalarında tane boyuna bağlı verim değişimi [99], [100]

Ancak yapılan bazı çalışmalarda ise, altın zenginleştirmek için kullanılan Knelson zenginleştiricisinde verimin tane boyu irileştikçe alışık olunmayan farklı bir eğilim sergilediği görülmüştür [101], [102]. Yapılan çalışma sonucunda buna sebep olan etkenin besleme tane boyu olabileceğine karar verilmiştir [101], [102]. Şekil 9.5'teki grafikler incelendiğinde verimin tane boyu dağılımıyla ters orantılı olduğu görülmektedir.



Şekil 9.5. Knelson zenginleştiricisinde verimin besleme tane boyuyla ilişkisini gösteren çalışmalar [101], [102]

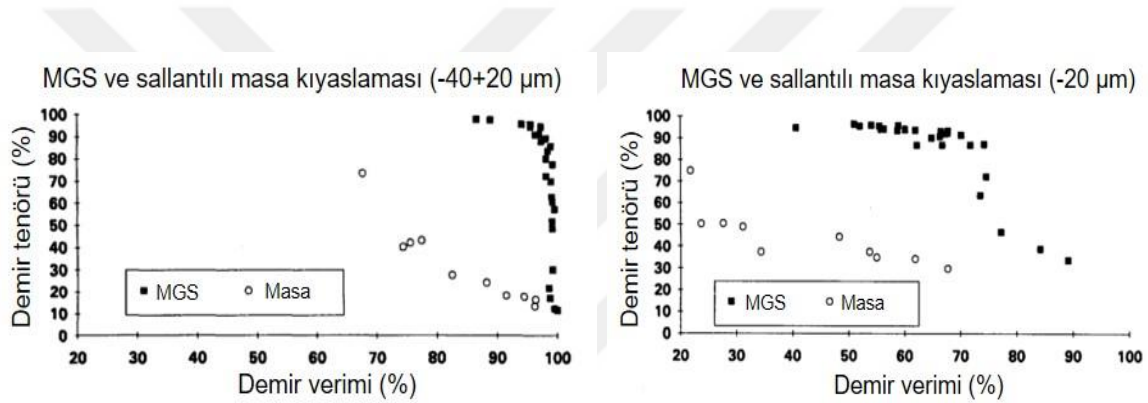
Falcon zenginleştiricisiyle yaptığımız çalışmada 100 µm tane boyunda %50 konsantre verimlerine ulaşılrken, 200 µm iriliğindeki tane boylarında konsantre veriminin hala %50 civarında kaldığı görölmektedir. Bu çalışmada da besleme tane boyu ile verimin ters orantılı olabileceği düşünölerek Şekil 9.6'daki gibi bir kıyaslamaya gidilmiştir. Grafikte çizgiyle gösterilen Falcon konsantresi ayırım performansı iken çarpı ile ifade edilen Falcon zenginleştiricisine beslenen malzemenin tane boyu dağılımıdır. Şekil 9.6'da da göröldüğü üzere bu çalışmadan elde edilen ayırım performansı değeri besleme tane boyu ile ters orantılıdır.



Şekil 9.6. Falcon zenginleştiricisinde verimin besleme tane boyuyla ilişkisi

Manyetit-kuars suni beslemesi kullanılarak yapılan Masa_B ve Spiral_A deneylerinin verim sonuçları birbirine çok yakın çıkmıştır. Aynı deneylerde sallantılı masanın ayırım performansı daha yüksekken spiralın ayırım performansının daha düşük olduğu görölmektedir. Bu deneylerde en yüksek verime ulaşılan tane boyunun ise 75 µm olduğu görölmektedir. Buna karşın, aynı tane boylarında yine manyetit ve kuvars karışımı beslenip farklı model bir sallantılı masa (Masa_A) kullanılarak yapılan testin sonucunda, tane boyuna bağlı verim sonuçlarının çok daha düşük çıktığı görölmüştür. Sallantılı masa deneylerinde görölen bu verim farklılığının, alınan ürün miktarlarındaki değişimden kaynaklandığı düşünölmektedir. Sallantılı masalar kullanılarak yapılan her iki masa çalışmasında da, konsantrenin ince tane boylarında çok düşük verim değeri olduğu görölmektedir.

İnce tanelerin yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarında çökelmelerine fırsat kalamadan ayırma maruz kaldıkları için yüksek verimlerin elde edilemediği, düzgün bir ayırım gerçekleşebilmesinin zaman aldığı bilinmektedir [54], [67]. Traore (1995)'nin ince tanelerin ayırım davranımlarını incelediği çalışmasında, MGS ve sallantılı masaların performansları %13.6'lık suni ferrosilikon numunesi kullanılarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda MGS'nin performansının sallantılı masaya oranla tüm fraksiyonlarda çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [76]. Sallantılı masada özellikle ince tanelerde yaşanan verim sorunu Şekil 9.7'de net olarak gözükmemektedir.



Şekil 9.7. -40+20 µm ve -20 µm tane boylarındaki suni karışımın sallantılı masa ve MGS'deki performansları [76]

Sallantılı masalarla yapılan çalışmalara benzer şekilde, Spiral_A ile yapılan deneysel çalışma sonuçları da Spiral_B ile yapılan çalışmadan farklı sonuçlanmıştır. Tesis ortamında değirmen çıkışı kromit cevheri ile birden fazla spiral ünitesi kullanılarak yapılan testlerde maksimum verim %70'lerdeyken, laboratuvar ölçekli tek aşamalı kullanılan spiral zenginleştiricide bazı tane boylarında %90'lara ulaşan verimler görülmektedir. Spiral_C'nin fraksiyonel sonuçları da Spiral_B'de olduğu gibi, tane boyunun artmasıyla en fazla %70–80 verim aralığında kalmıştır. En yüksek verimin yakalandığı tane boyu Spiral_A ile yapılan çalışma için 90 µm olarak saptanırken, Spiral_B için 175 µm ve Spiral_C için 200 µm olarak tespit edilmiştir.

Spiral zenginleştirici ve sallantılı masanın verimleri incelendiğinde, hangi besleme tane boyu kullanılırsa kullanılsın, verimin belli bir boya kadar arttığı, o tane boyundan sonra ise düşmeye başladığı gözlenmiştir. Her üç spiral zenginleştirici uygulamasında da nihai konsantrenin tane boyuna bağlı ayırım performansı ilişkisinde grafiksel olarak ters U eğiliminin mevcut olduğu görülmektedir. Ancak çalışılan cevherin türü, spiral zenginleştiricilerin fiziksel özellikleri ve alınan ürün sayısına bağlı olarak, elde edilen grafiğin sağa ya da sola kayabildiği gözlenmektedir. Besleme hızlarındaki değişikliklerin, konsantre verimini etkilediği düşünülmektedir, çünkü spiral zenginleştiricilerle yapılan deneylerde besleme hızıyla ayırım performansı arasında doğrudan bir ilişki olduğu bilinmektedir [103].

İnce tanelerin düşük verim problemi, başka çalışmalara da konu olmuştur [104]. İnce tane boyundaki mineralleri spiral zenginleştiricide ayırabilmenin anahtar kuralı tüm oluk kesiti boyunca oluşan türbülansı kontrol altında tutarak çökelmenin kontrollü gerçekleşebilmesini sağlamaktır [60]. Koşulların sabit kalamamasının sebebi palp yoğunluğundaki değişim ya da tanenin hızı ve spiralin çapına bağlı oluşan merkezkaç kuvvetindeki değişimlerdir [54]. Ancak 200 μm 'dan iri tanelerin verimindeki düşüş, öngörülen bir davranım değildir [55]. İri tanelerde verim değerlerinde düşüşler, serbestleşme derecesinin düşük olması ya da Bagnold etkisinden kaynaklanan sebeplerle yaşanabilmektedir [51], [16], [105].

Spiral zenginleştiricilerde iri tanelerdeki verim düşüşü Bagnold kuvvetinin etkisine dayandırılmaktadır ([1], [16], [52], [58]). Buna göre taneler üzerine etkiyen kuvvetler, iri ağır tanelerin seçimli olarak spiralin dış yüzeyine doğru ayrılmasına neden olmaktadır. Spirallerde oluşan ikincil akımlar iri tanelerin, spiral oluşunun dış yüzeyine doğru seçimli olarak sürüklenmesine neden olmaktadır [60]. Dışarı doğru sürüklenme yaşanmasının olasılığı, tane yoğunluğu arttıkça artmaktadır [55].

Bu tür bir dağılımda Bagnold kuvveti (F_B)'nin etkili olduğu söylenebilmektedir. Bir sistem içerisinde askıda bulunan taneler sürekli olarak makaslama kuvvetine maruz kalırsa, oluşan basıncın belirli açılarla makaslama tabakası yüzeyine yayıldığı bilinmektedir [13]. Bagnold kuvveti akışa ve dolayısıyla makaslama yüzeyine dik bir

kuvvettir. Dolayısıyla Bagnold etkisiyle oluşan tabakalanma dikey bir tabakalanmadır. İri hafif taneler en üstte kalırken; ince hafif, iri ağır ve ince ağır taneler sırasıyla aşağı doğru tabakalanır [1]. Bu kuvvete karşı oluşabilecek kuvvet, yerçekimi kuvveti (F_G) ve sürüklenme kuvvetidir (F_D) [1].

Makaslama tabakasının yatay olduğu ve sistem içerisindeki tanenin aşağı ya da yukarı hareketinin olmadan askıda olduğu durumda tane üzerine etkiyen net kuvvet Denklem 36'daki gibidir:

$$F_B - F_G = k_1 r^2 [1 - k_3 r (\rho_k - \rho_s)] \quad (36)$$

$$k_3 = k_2 / k_1$$

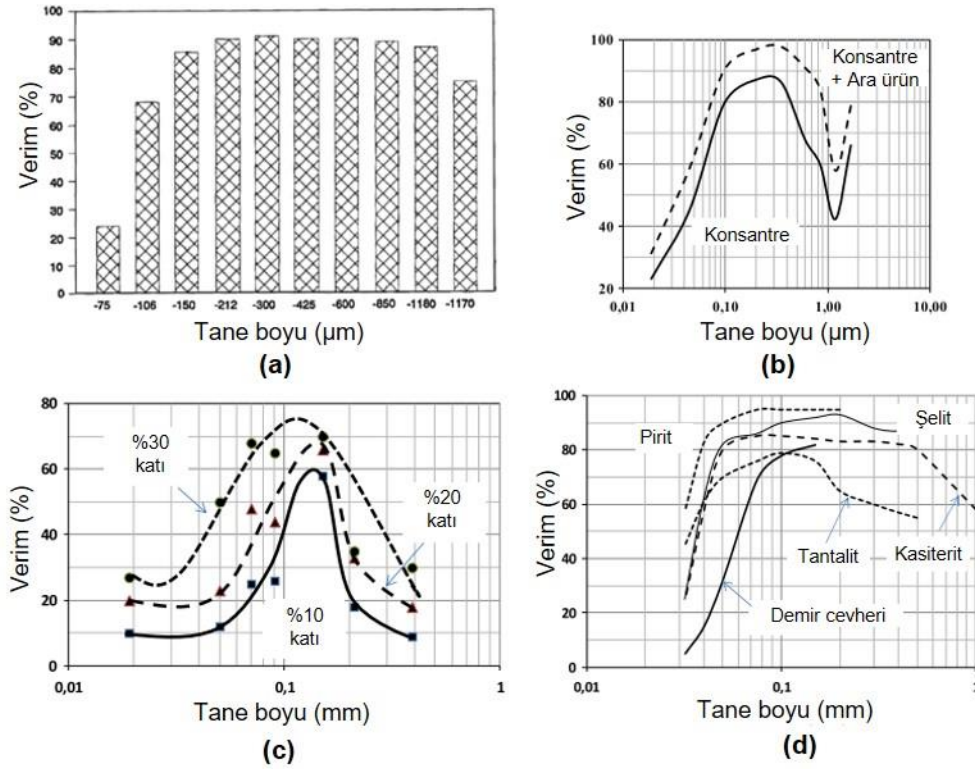
k_2, k_3 : Orantı sabitleri

ρ_k : katının yoğunluğu

ρ_s : sıvının yoğunluğu

Buna göre, taneye etkiyen net kuvvet, tanenin yoğunluğu arttıkça azalmakta ve tane boyu arttıkça artmaktadır. Çalışmalar sırasında farklı boylarda beslenen manyetit ve kromit cevherlerindeki Bagnold etkisini görmek mümkündür. İkincil akışların ve Bagnold'un dağıtıcı kuvvetinin etkisiyle iri hafif tanelerin (+500 μm) yüksek konsantrasyonlarda spiralin merkez kolonundan uzaklaşarak spiralin dış çeperine gitme eğiliminde olduğu, yapılan çalışmalarda gösterilmiştir [53], [106], [107].

Bazin et al. (2014)'in kaba zenginleştirme spirali ve iki aşamalı yıkama spiralleriyle yaptığı çalışmada, iri tanelerin davranımına, ara yoğunluklu tanelerinin bir arada bulunarak yoğunluğunu düşürmesi şeklinde bir açıklama getirilmiştir [55]. Ancak orta yoğunluktaki bu tanelerin temizleme devresi spirallerinde görülmemesi gerektiği halde, temizleme spirallerinde de iri boyda düşük verimler gözlenmiştir. İri tanelerde bu gibi verim düşüşlerine birçok farklı çalışmada daha rastlanmıştır [60], [104], [108], [109], [110] (Şekil 9.8).



Şekil 9.8. Spiral zenginleştiricilerde iri tanelerdeki verim düşüşlerinin gösterimi (a [111] , b [109] , c [108] , d [1])

Verimdeki farklılıkların bir diğer temel sebebi ise minerallerin serbestleşme dereceleridir. Deneylerde serbest tanelerin davranımını yansıtmaları açısından, serbest manyetit ve kuvars numuneleri karıştırılarak elde edilen suni bir besleme kullanılmıştır. Bunun haricinde kullanılan değirmen çıkışı kromit cevherinde ise 300 µm'dan iri taneler %50'den düşük serbestleşme derecesine sahipken, -300+150 µm fraksiyonu yaklaşık %75 serbestlikte ve 150 µm'dan ince taneler %85'in üzerinde serbestleşme derecesine sahiptirler. Suni besleme kullanılarak yapılan deneylerde beklendiği üzere yüksek verim değerleri elde edilirken (fraksiyonlarda en yüksek %80– 90), kromit cevheriyle yapılan deneylerde daha düşük verim değerleri elde edilmiştir (fraksiyonlarda en yüksek %65–75).

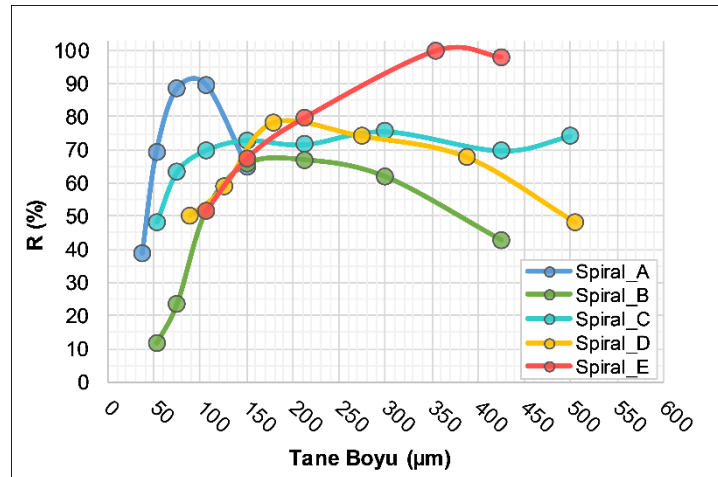
Spiral zenginleştiricilerdeki ayırma mekanizmaları göz önünde bulundurularak, elde edilen spiral sonuçlarına ek olarak, Yüksek Lisans tez çalışmamda [110] spiral zenginleştiricilerle yapılan deneysel sonuçlar da değerlendirmeye alınmış ve bir

ilişki ortaya konması hedeflenmiştir. Spiral_D ve Spiral_E olarak değerlendirilecek Yüksek Lisans tez çalışması spiral zenginleştiricilerine ait özellikler Çizelge 9.3'te verilmektedir.

Çizelge 9.3. Spiral_D ve Spiral_E deneylerde kullanılan ekipman ve besleme numunelerine ait özellikler

Ekipman Adı	Ekipmana Ait Özellikler	Ürünler	Besleme Türü	Besleme Tane Boyu	Numune Türü
Spiral_D	Mineral Deposit A87D model 600 mm çaplı laboratuvar ölçekli tek kademe spiral	Konsantre, Atık	Kromit cevheri	-425+106 μm	Değirmen çıkışı
Spiral_E	Mineral Deposit A87D model 600 mm çaplı laboratuvar ölçekli tek kademe spiral	Konsantre, Atık	Kromit – Kuvars	-425+53 μm	Suni besleme

Spiral_D deneyi %6.2 Cr_2O_3 besleme tenöründe, 3 m^3/sa besleme debisinde ve %35 katıda yapılırken, aynı ekipmanda suni besleme kullanılarak yapılan Spiral_E deneyi %8.3 Cr_2O_3 besleme tenöründe, 3.4 m^3/sa besleme debisinde ve %41.5 katıda yapılmıştır. Spiral_A, Spiral_B ve Spiral_C'ye ek olarak Spiral_D ve Spiral_E'den elde edilen tane boyuna bağlı verim sonuçları Şekil 9.9'da bir arada gösterilmektedir.



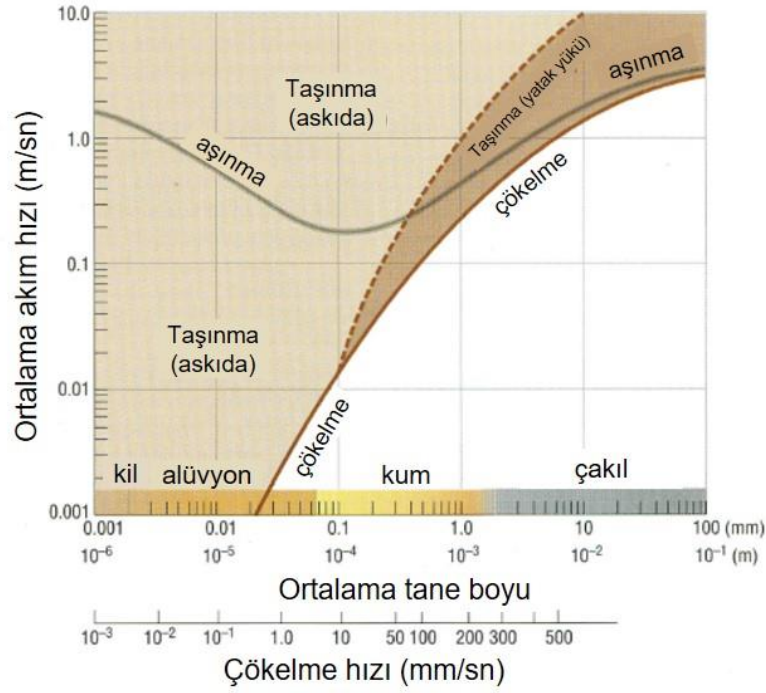
Şekil 9.9. Spiral zenginleştiricilerin verim sonuçlarının kıyaslaması [110]

Şekil 9.9'a göre Spiral_B, Spiral_C ve Spiral_D'de değirmen çıkışı kromit cevheriyle yapılan deneylerde farklı besleme koşulları ve farklı ekipman özellikleri olmasına rağmen grafiklerin benzer eğilimler sergilediği görülmektedir. Spiral_A deneyinde diğerlerinden farklı olarak serbest manyetit numunesi, aynı ekipman kullanılarak yapılan Spiral_E deneyinde ise serbest kromit numunesi kullanılmıştır. Aynı ekipman ve serbest numuneler kullanılmasına karşın numune türündeki farklılıkların, grafiklerde de ciddi farklılıklara sebep olduğu görülmektedir.

❖ Çökelme hızlarına ait değerlendirmeler:

Sedimanların bir kanaldan taşınımı sırasında tanelere çeşitli kuvvetler etki etmektedir. Bu kuvvetlerin etkisi altında tanelerin taşınımını açıklayan yaklaşımlardan bazıları makaslama gerilimi ve düşme hızı yaklaşımlarıdır [98]. En yaygın olarak kullanılan Shields (1936)'in makaslama gerilimi yaklaşımına göre; tanelerin hareketine neden olan temel parametreler; makaslama gerilimi (τ), akışkan ve sediman arasındaki yoğunluk farkı ($\rho_k - \rho_s$), tanenin çapı (d), kinematik viskozite (μ) ve yerçekimi ivmesi (g)'dir [112]. Bu değişkenler kullanılarak tanelerin çökmesi ve taşınmasını ifade eden çeşitli eşitlikler oluşturulmuştur. Sedimanların tane boyuna ve akım hızına bağlı olarak yatak oluşturma, askıda kalma ve birikme eğiliminde oldukları bilinmektedir [113]. Şekil 9.10'da gösterildiği üzere, çok ince boydaki malzemelerde ilk hareketin (aşınma – erosion) sağlanması için daha yüksek akım hızı gerekirken, tane boyu 100 μm 'a kadar irileştikçe uygulanması gereken akım hızının düştüğü görülmektedir. Ancak 100 μm 'dan daha iri tanelere hareket kazandırmak için, akım hızının tekrar artması gerektiği Şekil 9.10'da görülebilmektedir.

Tanelerin çökelme hızlarının boylarıyla doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir [15]. Ancak Şekil 9.10'da dikkati çeken bir diğer nokta, 10 mm/sn çökme hızında 100 μm 'dan ince tanelerin askıda kalarak taşınmasıdır. Böylelikle, bir kez harekete geçen ince taneler uzun mesafeler boyunca çökmeden taşınabilmektedir.



Şekil 9.10. Tanelerin boylarına bağlı suda askıda kalma, taşınma ya da yatak oluşturma koşullarının ortalama akım hızıyla gösterimi [15]

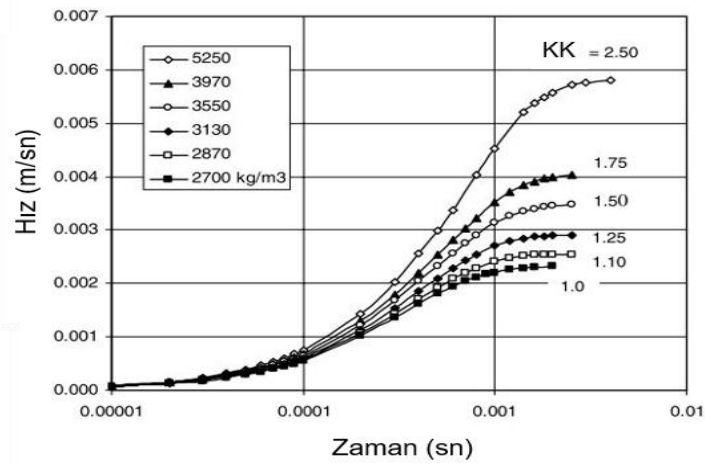
Şekil 9.9'a göre konsantre verimlerinin, spiral zenginleştirici türünden bağımsız olarak besleme türüyle ilişkili olduğunu söylemek mümkündür. Spiral zenginleştirici grafiklerinde görülen temel farklılık, manyetit ve kromit cevherlerinden kaynaklanmaktadır. Denklem 37'de verilen konsantrasyon kriteri eşitliği kullanılarak kromit ve manyetit cevherinin, bulunduğu sistem içerisindeki konsantrasyon kriterleri (KK) hesaplanmıştır, sırasıyla 2.15 ve 2.36 olarak bulunmuştur. Yapılan çalışmalara göre, tanelerin konsantrasyon kriterleri arasındaki farklılıkların çökme hızlarında zamana bağlı büyük rol oynadığı bilinmektedir [70]. Zaman ilerledikçe yüksek konsantrasyon kriteri değerine sahip malzemenin diğeriyle belirgin bir çökme farklılığı gösterdiği ortaya çıkmaktadır (Şekil 9.11).

$$KK = \frac{\rho_a - \rho_s}{\rho_h - \rho_s} \quad (37)$$

ρ_a : ağır tanenin yoğunluğu

ρ_h : hafif tanenin yoğunluğu

ρ_s : sıvının yoğunluğu



Şekil 9.11. 50 µm'luk tanenin konsantrasyon kriteri ile ilişkili zamana bağlı çökeltme hızları [70]

Buradaki asıl problemin, tanelerin çökeltme hızlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çökeltme hızları tanelerin boyuna, şekline, yoğunluğuna ve ortamın viskozitesine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu gibi sistemlerde tanelerin hızlarını kıyaslarken, Denklem 38'de verildiği gibi çökeltme hızlarına (v_T) göre kıyas yapılabilir [2]:

$$v_T = \frac{8.39 \cdot \left\{ \sqrt{[1 + 0.0103(1 - C_v)^{4.66} g d^3 (S - 1)]} - 1 \right\}}{d} \quad (38)$$

C_v : hacimce % katı

g : yerçekimi ivmesi (m/sn^2)

d : tanenin çapı (m)

S : katının yoğunluğunun sıvının yoğunluğuna oranı

Bir başka çalışmada, tanelerin düşme hızları ya da terminal hızları olarak tanımlanan değer, aşağıda gösterilen denklemler şeklinde ifade edilmiştir. Denklem 39, Denklem 40 ve Denklem 41'de Rubey (1933) ve Toffaleti'nin eşitliklerinden yararlanılmıştır [98]:

$$\omega_s = F\sqrt{dg(\rho_k - 1)} \quad (39)$$

$$F = \left[\frac{2}{3} + \frac{36\mu^2}{gd^3(\rho_k - 1)} \right]^{1/2} - \left[\frac{36\mu^2}{gd^3(\rho_k - 1)} \right]^{1/2} \quad (40)$$

$$\mu = \frac{1.792 \times 10^{-6}}{1.0 + 0.0337T + 0.000221T^2} \quad (41)$$

ω_s : tanenin düşme hızı / terminal hızı

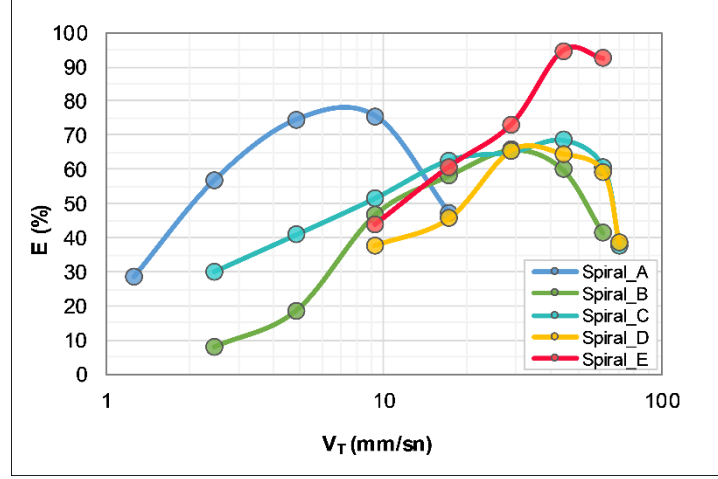
μ : kinematik viskozite (m²/sn)

T: derece (°C)

ρ_k : sedimanın yoğunluğu (gr/cm³)

Bahsi geçen eşitlikler bu çalışmaya ait verilerin yorumlanması amacıyla kullanılmıştır. Her iki çökme hızı eşitliğinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Çökme hızının sediman taşınımına etkisini ölçen diğer çalışmalarda elde edilen sonuçlarda da görüldüğü gibi, bu çalışmanın sonucunda da tanelerin çökme hızının tanenin boyuyla doğrusal ilişkili olduğu ortaya konmuştur [114].

Şekil 9.12’de spiral zenginleştirici deneylerinin ayırım performansı değerlerinin çökme hızlarıyla ilişkisi gösterilmektedir. Tanelerin çökme hızlarının ayırım performansına etkisi kromit ve manyetit cevherinde gözle görülür farklılıklar sergilemektedir. Kromit cevheri kullanılarak yapılan Spiral_B, Spiral_C ve Spiral_D deneylerinde her ne kadar farklı geometrilerde spiral zenginleştiriciler kullanılsa da 30 mm/sn’den yüksek çökme hızlarında çok yakın ayırım performansı değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. 30 mm/sn’den daha düşük çökme hızlarındaysa ayırım performansında ciddi farklılıklar oluşmaktadır. Bu hızın oluştuğu tane boyu 212 µm olarak tespit edilmiştir. Şekil 9.10’da verilen grafikte ifade edildiği gibi 30 mm/sn’de 200 µm’dan iri taneler çökme fazında iken 150–200 µm arası taneler yatak yükü ile taşınma, 150 µm’dan ince taneler ise askıda kalarak taşınma eğilimindedirler [15]. Bu bilgiler, elde edilen deney verileriyle uyumlu sonuçlar ortaya koymaktadır.



Şekil 9.12. Spiral zenginleştirici deneyleri ayırım performansı-çökeltme hızı kıyaslaması

Spiral_A ve Spiral_E deneyleri aynı tür spiral zenginleştiricide sırasıyla ince manyetit ve iri kromit suni beslemeleri kullanılarak yapılmıştır. Bu deneyler serbest taneleri ifade etmelerine rağmen ayırım performansları birbirinden çok farklı sonuçlar sergilemiştir. Deneyler kendi içinde, beslendikleri tane boyuna göre değerlendirildiğinde, ayırım performansları çökeltme hızlarından bağımsız olarak belli bir tane boyuna kadar artmakta, sonrasında ise azalmaktadır. Bu döngünün yaşandığı tane boyu ince tanelerle yapılan Spiral_A deneyi için 90 μm , iri tanelerle yapılan Spiral_E deneyi için 375 μm 'dur (Şekil 9.9).

TARTIŞMA

Zenginleştirme işlemi pek çok değişkene bağlı kompleks bir sistemdir. Besleme malzemesinin ayırımı için uygun yoğunluk farklılığı, besleme malzemesinin uygun tane boyu aralığı, palpin % katısı, ayırım yapılan ekipmanın tasarımı, besleme hızı, ekipmanın kapasitesi gibi pek çok parametre, yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarında yapılan zenginleştirme işlemini etkileyen önemli değişkenlerdir. Tanelerin taşınımı ve çökeltme hızları, zenginleştirme ekipmanlarındaki ayırım performansını doğrudan etkilemektedir.

Tanelerin taşınımı konusundaki en önemli faktörlerden biri tanelerin boyutudur. Taneyi hareket ettirebilecek güçteki bir su akışı tanenin taşınmasına yardımcı

olurken, düşük hızdaki bir su akışı, tanenin bulunduğu bölgeye çökmesine sebep olur.

Taneye etkiyen suyun kuvveti incelendiğinde, yatağın en altında duran tanelerin yatakla bitişik olduğu, çok küçük bir kısmına teorik olarak su kuvvetinin etki etmediği düşünülmektedir. Yatağın tabanından yukarı doğru uzaklaştıkça, taneye etkiyen suyun kuvveti de mesafeye bağlı kademeli olarak artmaktadır. Suyun hızı belli bir noktaya kadar arttıktan sonra makaslama hızıyla sürtünme kuvveti eşitlenmekte, böylelikle suyun hızı da sabitlenmektedir. Öte yandan tanelere uygulanan su akışının etkisiyle taneler harekete geçebilmekte ve suyun kaldırma kuvvetinin yanı sıra akımın oluşturduğu kaldırma kuvvetine de maruz kalabilmektedirler [15].

Açık kanallarda düz ve eğimli bir yüzeyde gerçekleşen akış sırasında, akışkan içerisindeki her bir molekül yerçekimi kuvveti ve makaslama geriliminden etkilenmektedir. Yüzeye yaklaştıkça hız artmakta, makaslama gerilimi düşmektedir [10]. Denklem 42 ve Denklem 43'te makaslama gerilimi ve tanenin hızını gösteren eşitlikler verilmiştir:

$$\tau_0 = \rho_f g (D - y) \sin \theta \quad (42)$$

$$u = \frac{\rho_s g \sin \theta}{\mu} \left(yD - \frac{y^2}{2} \right) \quad (43)$$

u: Akış hızı (m/sn)

θ : Eğimli yüzeyin yatayla yaptığı açı (°)

D: Kanalin yüksekliği

y: Tanenin tabandan uzaklığı

Eğer akışı hareket ettiren kuvvetlerin etkisi daha fazla ise momentum etkisi ile türbülanslı akış koşulları görülmektedir. Eğer akıştaki direnç kuvvetleri büyük ise akışın yapısı viskoziteye bağlıdır ve laminar bir akış görülmektedir. Türbülanslı bir

akış, viskoz ve türbülanslı makaslama geriliminin her ikisinin de etkisi altındadır [10].

Spiral zenginleştiricilerde, türbülanslı akış koşullarının görüldüğü dış tabakada ikincil akışlar ve girdaplı akışların etkisi baskındır. Dış tabakadaki ikincil akışlar, ortalama akış yönüne paralel oluşan, tek bir eksen etrafında spiral şeklinde dönerek kendini gösteren akışlardır. Düz kanallarda spiral şeklinde oluşan ikincil akışlar yan yana oluşabileceği gibi birbirine ters yönlü de oluşabilmektedir. Böyle kanallarda makaslama geriliminin en çok görüldüğü yer kıvrımın dışı iken, en az görüldüğü yer kıvrımın içidir [10].

Taneler taşınım sırasında kimi zaman yatakla temas halindeyken kiminde sadece akış içerisinde sürüklenir ya da sürüklenen diğer tanelerle temasa geçerek etkilenirler [15]. Açık kanallardaki akışkan hareketi sırasında görülen en büyük problemlerden biri, tanelerin taşınım hızının ölçülmesidir [115]. Yerçekimi ile ayırmda tane taşınımı Gaudin'in yaptığı çalışmalar baz alınarak açıklanmaktadır [11], [16]. Graf (1971) yaptığı çalışmada, Einstein (1950)'in hidrolik çap (R_h) tanımını kullanarak Denklem 44'te verilen *taşınım parametresi* (Φ) ifadesini geliştirmiştir [5]:

$$\phi = \frac{\bar{C}\bar{u}R_h}{\sqrt{\left[\frac{\rho_k - \rho_s}{\rho_s}\right]gd^3}} \quad (44)$$

$\bar{C}$: Tanelerin ortalama hacimsel katı derişimi

$\bar{u}$: Tanelerin ortalama akış hızı (m/sn)

R_h : Hidrolik çap (Makaslama şiddeti parametresi)

Bagnold, yüksek konsantrasyonlu tanelerin türbülanslı akışın etkisini bastırdığı görüşündedir [13]. Akışkan içerisinde askıdaki tanelerin taşınma eğilimini belirlemek için Bagnold'un geliştirdiği teorik kriter Denklem 45'teki gibidir [16]:

$$Taşınma\ düzeyi = \frac{0.8 \times v_T}{u_0^*} \quad (45)$$

u_T : Akışkan içerisindeki tanelerin terminal hızı

u^*_0 : Kritik sürüklenme hızı

Tane konsantrasyonu yüksek olduğunda, palp içerisinde oluşan makaslama direncinde artış olduğu ve hız dağılımında farklılıklar ortaya çıktığı görülmektedir. Bagnold tarafından birçok farklı çalışma yapılmış, özellikle sediman taşınımının gerçekleştiği nehirlerde makaslama ve normal gerilim değerleri ölçülerek, akışın davranımı fiziksel olarak ifade edilmiştir [13], [23]. Akış koşulları, Denklem 46'da verilen B değerine göre sınıflandırılmıştır [16]. Buna göre;

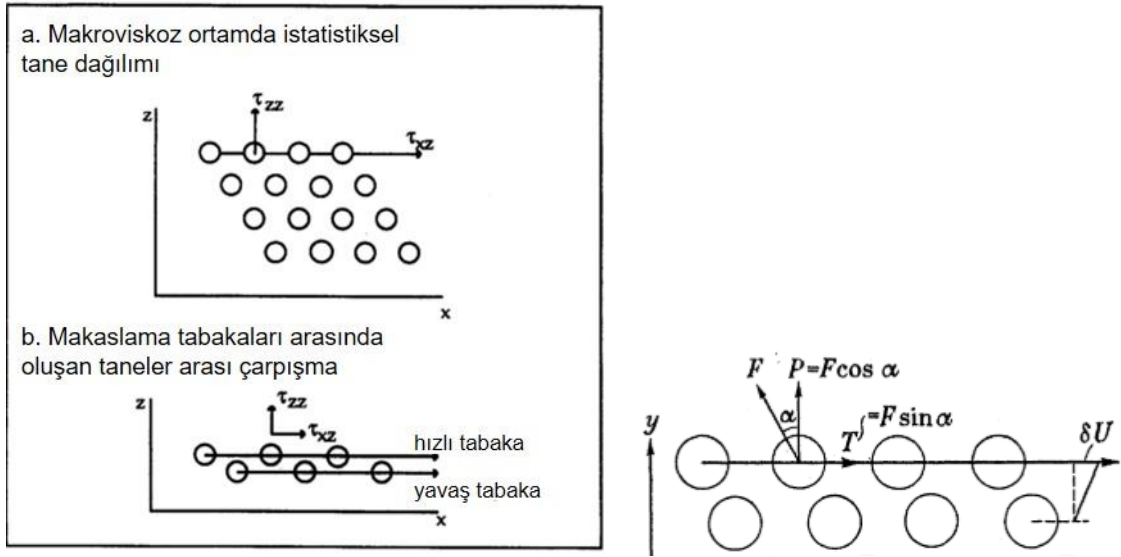
- $B \leq 40$ makroviskoziteyi,
- $B \geq 450$ tanenin eylemsizliğini,
- $40 < B < 450$ ise geçiş bölgesini tanımlamaktadır.

$$B = \left(\rho_s \lambda^{0.5} d^2 / \eta \right) (du/dz) \quad (46)$$

du/dz : Ortalama sürüklenme hızı

λ : Lineer konsantrasyon

Makroviskoz bir ortamda gerilimler, taneler arasında kalan akışkanın oluşturduğu sürtünme ile iletildiğinden, tanenin yoğunluğuna değil akışkanın viskozitesine bağlıdırlar. Oluşan gerilimler sürüklenme hızına doğrudan bağlı olmalarına rağmen, tane boyu ve tane yoğunluğundan bağımsızdırlar. Bagnold, tanenin eylemsizliği durumunda, taneler arasında bulunan sıvının çok az rol oynadığını söylemiştir. Asıl etkinin, bir tabakada dizili tanelerin daha yavaş hızda bulunan tabakadaki taneleri geçmeye çalıştığı sırada oluşan taneler arası çarpışmadan kaynaklandığını öne sürmüştür (Şekil 9.13) [13], [16].



Şekil 9.13. Akışkan taşınımı sırasında taneler arası etkileşim [13] , [16]

Şekil 9.13'te gösterildiği üzere taneye etkiyen kuvvetin etkisiyle ortaya çıkan dağıtıcı basınç, Denklem 47'deki gibi ifade edilmektedir:

$$P_{y,i} = K_b \rho_k \lambda f n(\lambda) d^2 \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \cos \theta_B \quad (47)$$

$P_{y,i}$: Tabakalar arası dağıtıcı basınç

λ : Doğrusal tane derişimi

K_b : sabit

θ_B : Çarpışma açısı

Tanelerin her çarpışması sonrası oluşan ivmelenme ve frekans transferinin, ortalama sürüklenme hızı ile orantılı olduğu ortaya konmuştur. Tanenin eylemsizliği durumunda oluşan gerilimler akışkanın viskozitesinden bağımsız olmasına rağmen, tanenin boyuyla, yoğunluğuyla ve konsantrasyonuyla ilişkilidir. Bu sebeple de yerçekimi ile ayırım süreçlerinde önem teşkil etmektedir [16].

Bagnold'ın bulduğu sonuçlar uzun seneler boyunca yerçekimi ile ayırım yöntemleri literatüründe tanelerin davranımını açıklamak için yaygın olarak kullanılmıştır [16]. Ancak tanenin hız değişimiyle ilgili Bagnold eşitliğinde bir değişken bulunmadığından, daha karmaşık akışlarda Bagnold ilişkisi gerçekçi olmamaktadır. Bagnold eşitliğini geliştirebilmek için birçok çalışma yapılmıştır. Engelund ve Hansen (1972) ile Ackers ve White (1973) yaptıkları çalışmalarda Bagnold'un eşitliğini geliştirerek, sediman taşınımıyla ilgili yaklaşımlar ortaya koymuşlardır [116], [117]. Savage ve Jeffrey (1981) ise küresel tanelerin makaslama akışı sırasında birbirine çarpışmasıyla değişen hız bileşenlerinin ortaya çıkardığı ivmelenmeyi hesaplayarak *kinetik bir model* geliştirmiştir [65].

Yerçekimi ile ayırım yöntemlerinin modellenmesinde ekipman üzerinden geçen toplam akış hızının tahmini önemli değildir. Asıl önemli olan, belli bir hızda ve belirli palp yoğunluğundaki akışta, taneler ve akışkan içerisindeki etkileşimin tanenin yoğunluğu ve boyuna bağlı olarak nasıl bir tabaka oluşturacağıdır. İhtiyaç duyulan model, akışkan içerisindeki tane konsantrasyon dağılımının, tanenin boyu, yoğunluğu, palpın akış hızı ve katı oranına bağlı olarak tahmin edebilecek şekilde olmasıdır.

Türbülanslı akıştaki tanelerin taşınımı sırasında kullanılan klasik modelleme yaklaşımı Allen tarafından oluşturulan difüzyon prosesidir [118]. Denklem 48'de verilen bu eşitlik, tane boyu veya yoğunluğunda ayırım olmaksızın tüm tanelerin asılı kalma koşulu için geçerlidir:

$$C = C_{ref} \exp \left\{ -v_T (z - z_{ref}) / \epsilon_s \right\} \quad (48)$$

C: Katı konsantrasyonu

ϵ_s : Difüzyon katsayısı

C_{ref} : z_{ref} yatağının bilinen bir yüksekliğindeki referans konsantrasyonu

Tanelerin çapları, palp derişimi ve yoğunlukları bilindiği sürece taneye etki eden kuvvetlere bağlı olarak taşınma ve çökelme mekanizmalarını açıklamak mümkündür. Yapılan deneysel çalışmalarda serbest tane davranımını sergilemesi açısından her ne kadar yapay karışımlar kullanılmış olsa da, tane boyuna bağlı verimler değerlendirildiğinde hiçbir zenginleştirme ekipmanında %100 verimlere ulaşılamadığı görülmektedir. Sonuçta elde edilen verim değerlerine, akış sırasında oluşan dağıtıcı kuvvetler, tanelerin çökelme hızları ve tanelerin taşınımlarının ortak etkisi sebep olmaktadır.



10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Cevher zenginleştirme ekipmanlarından sallantılı masalar, spiral zenginleştiriciler, Falcon zenginleştiricisi ve MGS ekipmanının kullanıldığı ve tane boyuna bağlı verim ve tenör ilişkilerinin incelenerek çökelme hızlarıyla kıyaslandığı bu çalışmanın sonuçları ve devamında yapılabilecek çalışmalarla ilgili öneriler aşağıda verilmektedir:

- ❖ Yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarında besleme tane boyunun iri ya da ince olması fark etmeksizin, tane boyu irileştikçe verimin arttığı; özellikle spiral zenginleştiriciler ve sallantılı masalarda ise belli bir tane boyundan sonra verimin düştüğü tespit edilmiştir. En yüksek verime ulaşılan bu tane boyları Spiral_A için 90 μm , Spiral_B için 200 μm , Spiral_C için 300 μm , Masa_A için 160 μm ve Masa_B için 75 μm olarak belirlenmiştir.
- ❖ Yerçekimi ile zenginleştirme ekipmanlarında iri boylarda görülen verim düşüşleri Bagnold dağıtıcı kuvvetleri ve tanelerin çökelme hızlarıyla ilişkilendirilmiştir.
- ❖ Elde edilen veriler kıyaslandığında, en yüksek performansta konsantre elde edilebilen yöntemin sallantılı masalar olduğu tespit edilmiştir.
- ❖ Yerçekimiyle zenginleştirme ekipmanlarında değişen akış koşullarının daha hassas değerlendirilebilmesi için, ileriki dönemlerde yapılacak çalışmalar Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) programıyla desteklenerek, simülasyon çalışmalarına ağırlık verilmesi gerektiği düşünülmektedir.
- ❖ Ekipmanlardaki makaslama akışlarının etkisinin belirlenebilmesi için farklı palp yoğunluklarında yoğunluk izleyici, floresan izleyici vb. izleyiciler kullanılarak deneylerin yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] R. O. Burt, *Gravity Concentration Technology*. London: Elsevier, **1984**.
- [2] A. L. Mular, D. N. Halbe, D. J. Barratt, *Mineral processing plant design, practice and control proceedings*. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., **2002**.
- [3] C. Marion *et al.*, "A design of experiments investigation into fine low-density ore processing using a 3-in. Knelson Concentrator," in *Physical Separation'17*, 1–14, **2017**.
- [4] A. K. Majumder, "Modeling of particle fluid interactions in a flowing film concentrator," *Int. J. Miner. Process.*, Vol. 97, 7–19, **2010**.
- [5] W. H. Graf, *Hydraulics of Sediment Transport*, 3. Colorado: Water Resources Publications, LLC, **1998**.
- [6] B. A. Wills, T. J. Napier-Munn, *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*, 7th ed., No. October. Elsevier Science & Technology Books, **2006**.
- [7] R. P. King, *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Oxford: Butterworth-Heinemann, **2001**.
- [8] A. F. Taggart, *Handbook of Mineral Dressing*. New York: Wiley Interscience, **1945**.
- [9] G. G. Stokes, *Mathematical and Physical Papers - III*. Cambridge: Cambridge University Press, **1905**.
- [10] R. J. Cheel, "Unidirectional fluid flow and sediment transport," *Introduction to Clastic Sedimentology*, Ontario: Brock University, 55–73, **2005**.
- [11] O. C. Ralston, "Principles of Mineral Dressing by A. M. Gaudin," *J. Phys. Chem.*, Vol. 44, No. 4, 532–533, **1940**.
- [12] R. G. Richards, M. K. Palmer, "High capacity gravity separators a review of current status," *Miner. Eng.*, Vol. 10, No. 9, 973–982, **1997**.
- [13] R. A. Bagnold, "Experiments on a Gravity-Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear," *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, Vol. 225, No. 1160, 49–63, **1954**.
- [14] G. Ferrara, U. Preti, P. Bevilacqua, "Modelling the basic separation phenomena in flowing film concentration processes," in *International Mineral Processing Congress*, 379–386, **1993**.
- [15] Open University Course Team, "Principles and processes of sediment transport," *Waves, Tides and Shallow-Water Processes*, 2nd ed., Elsevier, 96–124, **1999**.
- [16] P. N. Holtham, "Particle transport in gravity concentrators and the Bagnold effect," *Miner. Eng.*, Vol. 5, No. 2, 205–221, **1992**.

- [17] J. R. D. Francis, "Experiments on the motion of solitary grains along the bed of a water stream," *Prec. R. Soc. Lond.*, Vol. 332, No. A, 443–471, **1973**.
- [18] J. E. Abbott, J. R. D. Francis, "Saltation and suspension trajectories of solid grains in a water stream," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, Vol. 284, No. A, 225–254, **1977**.
- [19] B. M. Sumer, B. Oguz, "Particle motions near the bottom in turbulent flow in an open channel, Part 1," *J. Fluid Mech.*, Vol. 86, 109–127, **1978**.
- [20] B. M. Sumer, R. Deirgaard, "Particle motions near the bottom in turbulent flow in an open channel, Part 2," *J. Fluid Mech.*, Vol. 109, 311–337, **1981**.
- [21] M. R. Leeder, "'Bedload' dynamics: grain-grain interactions in water flows," *Earth Surf. Process.*, Vol. 4, 229–240, **1979**.
- [22] G. Hetsroni, "Particles-turbulence interaction," *Int. J. Multiph. Flow*, Vol. 15, 735–746, **1989**.
- [23] R. A. Bagnold, "An approach to the sediment transport problem from general physics," *U.S Geol. Surv. Prof. Pap. 422-I*, I1–I37, **1966**.
- [24] H. Nasr-el-Din, C. A. Shook, J. Colwell, "The lateral variation of solids concentration in horizontal slurry pipeline flow," *Int. J. Multiph. Flow*, Vol. 13, No. 5, 661–670, **1987**.
- [25] S. Abdinegoro, A. C. Partridge, "Flow characteristics of a pinched sluice," in *Proc. Aus. IMM Conference*, 79–88, **1979**.
- [26] G. K. N. S. Subasinghe, E. G. Kelly, "Modelling pinched sluice type concentrators," in *Control '84 Conference*, 87–95, **1984**.
- [27] M. S. Yalin, *Mechanics of Sediment Transport*. Oxford: Pergamon, **1972**.
- [28] R. O. Burt, "Role of gravity concentration in modern processing plants," *Miner. Eng.*, Vol. 12, No. 11, 1291–1300, **1999**.
- [29] A. Wells, "Some experiences in the design and optimisation of fine gravity concentration circuits," *Miner. Eng.*, Vol. 4, No. 3–4, 383–398, **1991**.
- [30] E. Forssberg, T. Nordquist, "Pilot plant trials of new gravity concentration equipment," *Miner. Met. Proc.*, 87–89, **1987**.
- [31] A. R. Laplante, "Centrifuge units for gravity separation - an update," in *32nd Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, 475–488, **2000**.
- [32] R. O. Burt, G. Korinek, S. R. Young, C. Deveau, "Ultrafine tantalum recovery strategies," *Miner. Eng.*, Vol. 8, No. 8, 859–870, **1995**.
- [33] S. Hearn, "The use of hindered settlers to improve iron ore gravity concentration circuits," **2000**.
- [34] R. J. Manser, R. W. Barley, B. A. Wills, "The shaking table concentrator - The influence of operating conditions and table parameters on mineral separation - The development of a mathematical model for normal operating conditions," *Miner. Eng.*, Vol. 4, No. 3–4, 369–381, **1991**.
- [35] R. I. Mackie, P. Tucker, "Simulation and optimisation of gravity concentration circuits," in *Proceedings of International Symposium on the Mathematical Modelling of Materials' Processing Operations*, 148–160, **1987**.

- [36] K. J. Pillai, "Mathematical models of gravity separation devices and their use in optimisation and control," in *Proceedings of the International Symposium on Extractive Metallurgy and Materials Science*, 1263–1279, **1987**.
- [37] E. G. Kelly, D. J. Spottiswood, *Introduction to Mineral Processing*. New York: Wiley Interscience, **1982**.
- [38] K. F. Tromp, "New methods of computing the washabilities of coals," *Colliery Guard.*, Vol. 154, 955–959, 1009, **1937**.
- [39] B. S. Gottfried, P. S. Jacobsen, "Generalized distribution curve for characterizing the performance of coal-cleaning equipment," in *U.S. Bureau of Mines Report of Investigations*, **1977**.
- [40] A. P. Prosser, "Analysis of mineral separation processes," *Chem. Proc. Eng.*, 88–86, 96, **1969**.
- [41] R. D. Pascoe, M. R. Power, B. Simpson, "QEMSCAN analysis as a tool for improved understanding of gravity separator performance," *Miner. Eng.*, Vol. 20, No. 5, 487–495, **2007**.
- [42] C. Philander, A. Rozendaal, "A process mineralogy approach to geometallurgical model refinement for the Namakwa Sands heavy minerals operations, west coast of South Africa," *Miner. Eng.*, Vol. 65, 9–16, **2014**.
- [43] J. D. Grobler, J. B. Bosman, "Gravity separator performance evaluation using Qemscan® particle mineral analysis," in *The 7th International Heavy Minerals Conference 'What next,'* 91–98, **2009**.
- [44] C. Bergmann, V. Govender, A. A. Corfield, "Using mineralogical characterisation and process modelling to simulate the gravity recovery of ferrochrome fines," *Miner. Eng.*, Vol. 91, 2–15, **2016**.
- [45] E. G. Kelly, G. K. N. S. Subasinghe, "Gravity performance curves: A re-examination," *Miner. Eng.*, Vol. 4, No. 12, 1207–1218, **1991**.
- [46] N. Aslan, "Modeling and optimization of Multi-Gravity Separator to produce celestite concentrate," *Powder Technol.*, Vol. 174, No. 3, 127–133, **2007**.
- [47] N. Aslan, Y. Cebeci, "Application of Box–Behnken design and response surface methodology for modeling of some Turkish coals," *Fuel*, Vol. 86, No. 1–2, 90–97, **2007**.
- [48] A. L. Martinez, A. S. Uribe, F. R. P. Carrillo, J. A. Coreno, J. C. Ortiz, "Study of celestite flotation efficiency using sodium dodecyl sulfonate collector: factorial experiment and statistical analysis of data," *Int. J. Miner. Process.*, 83–97, **2003**.
- [49] N. Aslan, "Multi-objective optimization of some process parameters of a multi-gravity separator for chromite concentration," *Sep. Purif. Technol.*, Vol. 64, No. 2, 237–241, **2008**.
- [50] R. H. Goodman, C. A. Brown, I. C. Ritchie, "Advanced gravity concentrators for improving metallurgical performance," in *Minerals and Metallurgical Processing*, 79–86, **1985**.
- [51] A. B. Holland-Batt, "The dynamics of sluice and spiral separations," *Miner. Eng.*, Vol. 8, No. 1–2, 3–21, **1995**.

- [52] Y. Atasoy, D. J. Spottiswood, "A study of particle separation in a spiral concentrator," *Miner. Eng.*, Vol. 8, No. 10, 1197–1208, **1995**.
- [53] A. B. Holland-Batt, "Spiral separation: theory and simulation," *Miner. Process. Extr. Metall.*, Vol. 98, No. C, 46–60, **1989**.
- [54] R. G. Richards, D. M. MacHunter, P. J. Gates, M. K. Palmer, "Gravity separation of ultra-fine (-0.1 mm) minerals using spiral separators," *Miner. Eng.*, Vol. 13, No. 1, 65–77, **2000**.
- [55] C. Bazin *et al.*, "Size recovery curves of minerals in industrial spirals for processing iron oxide ores," *Miner. Eng.*, Vol. 65, 115–123, **2014**.
- [56] E. J. Pryor, *Mineral Processing*, 3rd ed. London: Applied Science Publishers, **1965**.
- [57] P. Tucker, "An approach to modelling industrial unit processes: Application to a spiral concentrator for minerals," *Appl. Math. Model.*, Vol. 9, No. 5, 375–379, **1985**.
- [58] S. K. Das, K. M. Godiwalla, L. Panda, K. K. Bhattacharya, R. Signh, S. P. Mehrotra, "Mathematical modeling of separation characteristics of a coal-washing spiral," *Int. J. Miner. Process.*, Vol. 84, 118–132, **2007**.
- [59] R. Sivamohan, E. Forssberg, "Principles of spiral concentration," *Int. J. Miner. Process.*, Vol. 15, 173–181, **1985**.
- [60] A. B. Holland-Batt, P. N. Holtham, "Particle and fluid motion on spiral separators," *Miner. Eng.*, Vol. 4, 457–482, **1991**.
- [61] A. Steinmüller, "Development and application of simple process models for spiral concentrators," *Heavy Miner.*, 167–172, **2005**.
- [62] A. B. Holland-Batt, "Interpretation of spiral and sluice tests," *Trans. Instn. Min. Met.*, No. C, 99, **1990**.
- [63] R. Dallaire, A. Laplante, J. Elbrond, "Humphrey's spiral tolerance to feed variations," *CIM Bull.*, 128–134, **1978**.
- [64] A. R. Laplante, J. A. Finch, "The origin of unusual cyclone performance curves," *Int. J. Miner. Process.*, Vol. 13, 1–13, **1984**.
- [65] B. S. Savage, D. J. Jeffrey, "The stress tensor in a granular flow at high shear rates," *J. Fluid Mech.*, Vol. 110, 255–272, **1981**.
- [66] D. M. Hanes, D. L. Inman, "Observations of rapidly flowing granular-fluid materials," *J. Fluid Mech.*, Vol. 150, 357–380, **1985**.
- [67] A. Gupta, D. S. Yan, *Mineral Processing Design and Operations: An Introduction*. Oxford: Elsevier, **2006**.
- [68] R. S. Fitzpatrick, Y. Ghorbani, P. Hegarty, G. Rollinson, "Quantitative mineralogy for improved modelling of shaking tables," in *International Mineral Processing Congress*, 1–19, **2016**.
- [69] W. Wang, H. Shu, C. Jin, "A mathematical model of the shaking table and its application," in *International Mineral Processing Congress*, 387–393, **1993**.
- [70] R. J. Manser, R. W. Barley, B. A. Wills, "Development of a mathematical model of a shaking table concentrator," in *Proceedings of 19th APCOM*

Symposium, 631–636, **1986**.

- [71] Z. Luo, "A study of the motion characteristics and their effect on the separation of shaking table," in *Proceedings of 2nd Meeting of Gravity and Magnetic Separation*, 631–637, **1986**.
- [72] R. Razali, T. J. Veasey, "Statistical modelling of a shaking table separator part one," *Miner. Eng.*, Vol. 3, No. 3–4, 287–294, **1990**.
- [73] P. Tucker, K. A. Lewis, P. Wood, "Computer optimisation of a shaking table," *Miner. Eng.*, Vol. 4, No. 3–4, 355–367, **1991**.
- [74] B. V. Rao, "Weibull partition surface representation for gravity concentrators," *Miner. Eng.*, Vol. 17, No. 7–8, 953–956, **2004**.
- [75] R. S. Fitzpatrick, Y. Ghorbani, P. Hegarty, G. Rollinson, T. Mildren, K. Fergusson, "Recovery of fine tungsten-bearing minerals from waste streams using modified Multi-Gravity Separator," in *MEI Physical Separation '17*, 1–18, **2017**.
- [76] A. Traore, P. Conil, R. Houot, M. Save, "An evaluation of the Mozley MGS for fine particle gravity separation," *Miner. Eng.*, Vol. 8, No. 7, 767–778, **1995**.
- [77] B. Knelson, "The Knelson Concentrator: metamorphosis from crude beginning to sophisticated world wide acceptance," *Miner. Eng.*, Vol. 5, 1091–1097, **1992**.
- [78] B. Knelson, R. Jones, "A new generation of Knelson Concentrators: a totally secure system goes on line," *Miner. Eng.*, Vol. 7, 201–207, **1994**.
- [79] A. R. Laplante, L. Huang, M. Noaparast, N. Nickoletopoulos, "A philosopher's stone: turning tungsten and lead into gold-The use of synthetic ores to study gold gravity separation," in *Proceedings of 27th Annual Meeting of Canadian Mineral Processors*, 379–394, **1995**.
- [80] A. R. Laplante, F. Woodcock, M. Noaparast, "Predicting gravity separation gold recovery," *Miner. Met. Process.*, 74–79, **1995**.
- [81] A. R. Laplante, N. Nickoletopoulos, "Validation of a Falcon model with a synthetic ore," *Can. Met. Quart.*, Vol. 37, No. 1, 7–13, **1997**.
- [82] V. Gunaraj, N. Murugan, "Application of response surface methodology for predicting weld bead quality in submerged arc welding of pipes," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 88, No. 1–3, 266–275, **1999**.
- [83] O. Kokkilic, R. Langlois, K. E. Waters, "A design of experiments investigation into dry separation using a Knelson Concentrator," *Miner. Eng.*, Vol. 72, 73–86, **2015**.
- [84] J. S. Kwak, "Application of Taguchi and Response Surface Methodologies for geometric error in surface grinding process," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 45, 327–334, **2005**.
- [85] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed. John Wiley & Sons, **2012**.
- [86] M. Zhou, O. Kokkilic, R. Langlois, K. E. Waters, "Size-by-size analysis of dry gravity separation using a 3-in. Knelson Concentrator," *Miner. Eng.*, Vol. 91, 42–54, **2016**.

- [87] M. Greenwood, R. Langlois, K. E. Waters, "The potential for dry processing using a Knelson Concentrator," *Miner. Eng.*, Vol. 45, 44–46, **2013**.
- [88] P. H. Ancia, J. Frenay, P. H. Dandois, "Comparison of the Knelson and Falcon centrifugal separators," in *Innovation in physical separation technologies: Richard Mozley Symposium*, 53–62, **1997**.
- [89] T. McKeon, G. H. Luttrell, "Optimization of multistage circuits for gravity concentration of heavy mineral sands," *Miner. Metall. Process.*, Vol. 29, No. 1, 1–5, **2012**.
- [90] T. P. Meloy, "Analysis and optimization of mineral processing and coal-cleaning circuits - Circuit analysis," *Int. J. Miner. Process.*, Vol. 10, No. 1, 61–80, **1983**.
- [91] G. H. Luttrell, J. N. Kohmuench, F. L. Stanley, G. D. Trump, "Improving spiral performance using circuit analysis," *Miner. Metall. Process.*, Vol. 5, No. 4, 16–21, **1998**.
- [92] T. McKeon, G. H. Luttrell, "Application of linear circuit analysis in gravity separator circuit design," in *Heavy Minerals*, 179–184, **2005**.
- [93] N. F. Shulz, "Separation Efficiency," *Trans. AIME*, Vol. 247, 81–87, **1970**.
- [94] A. B. Holland-Batt, "Efficiency in Batch Separations," in *Trans. Instn. Min. Metall*, C12-23, **1971**.
- [95] K. S. E. Forssberg, E. Sandström, "Operational Characteristics of Reichert Cone in Ore Processing," in *13. International Mineral Processing Congress*, 1421–1452, **1981**.
- [96] S. L. Ergun, "Daralan oluklarda akış koşulları ve geometrik özelliklerin ayırma etkisinin incelenmesi," Hacettepe University, **1995**.
- [97] K. Smith, M. Vinchoff, *Operations and Maintenance Manual of Falcon Semi-Batch Concentrator Laboratory Model L40*. 14, **2007**.
- [98] C. T. Yang, "Noncohesive Sediment Transport," *Erosion and Sedimentation Manual*, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Sedimentation and River Hydraulics Group, 1–111, **2006**.
- [99] A. R. Laplante, M. Buonvino, A. Veltmeyer, J. Robitaille, G. Naud, "Case studies with the Falcon concentrator," in *25th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, 1–22, **1993**.
- [100] C. Deveau, "The evolution of Falcon Continuous Concentrators at Tantalum Mining Corporation of Canada," in *32nd Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, 1–17, **2000**.
- [101] S. Koppalkar, A. R. Laplante, "Effect of operating variables in Knelson Concentrators : a pilot-scale study," in *39th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, 247–258, **2007**.
- [102] A. R. Laplante, "Marvel Loch arazi raporu," **2003**.
- [103] A. B. Holland-Batt, "The effect of feed rate on the performance of coal spiral," in *Coal Preparation*, 199–222, **1994**.
- [104] D. B. Hyma, J. A. Meech, "Preliminary tests to improve the iron recovery from

- the -212 micron fraction of new spiral feed at quebec cartier mining company," *Miner. Eng.*, Vol. 2, No. 4, 481–488, **1989**.
- [105] Y. Hassanzadeh, "Hydraulics of sediment transport," *Hydrodynamics - Theory and Model*, J.-H. Zheng, Ed. InTech, 23–58, **2012**.
- [106] P. N. Holtham, "Particle transport in gravity concentrators and the Bagnold effect," *Miner. Eng.*, Vol. 5, No. 2, 205–221, **1992**.
- [107] B. W. Matthews, P. N. Holtham, K. Golab, "Computational and experimental investigation of spiral concentrator flows," in *COAL98 Conference*, 415–421, **1998**.
- [108] R. C. Richards, D. M. MacHunter, P. J. Gates, M. K. Palmer, "Gravity separation of ultra-fine (-0.1 mm) mineral using spiral separators," *Miner. Eng.*, Vol. 13, 65–77, **2000**.
- [109] D. J. Miller, "Design and operating experience with the Goldsworthy mining limited Batac jig and spiral separator iron ore beneficiation plant," *Miner. Eng.*, Vol. 4, 411–435, **1991**.
- [110] D. Gucbilmez, S. L. Ergun, "Spiral zenginleştiricilerde tane boyunun performans etkisinin incelenmesi," Hacettepe University, **2013**.
- [111] D. B. Hyma, J. A. Meech, "Preliminary tests to improve the iron recovery from the -212 micron fraction of new spiral feed at Quebec Cartier Mining company," *Miner. Eng.*, Vol. 2, 481–488, **1989**.
- [112] A. Shields, W. P. Ott, J. C. van Uchelen, "Application of similarity principles and turbulence research to bedload movement," Pasadena, California, **1936**.
- [113] F. Hjulstrom, "The morphological activity of rivers as illustrated by River Fyris," *Bulletin Geol. Inst.*, Vol. 25, 442–452, **1935**.
- [114] Y. C. Agrawal, H. C. Pottsmith, "Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport," *Mar. Geol.*, Vol. 168, No. 1–4, 89–114, **2000**.
- [115] H. A. Einstein, "The bed-load function for sediment transportation in open channel flows," *Soil Conservation Service*. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1–71, **1950**.
- [116] F. Engelund, E. Hansen, "A monograph on sediment transport in alluvial streams," in *Teknisk Forlag*, 31–59, **1972**.
- [117] P. Ackers, W. R. White, "Sediment transport: New approach and analysis," *J. Hydraul. Div.*, Vol. 99, No. HY11, 2041–2060, **1973**.
- [118] J. R. L. Allen, *Principles of Physical Sedimentology*. London: Allen & Unwin, **1985**.



EKLER DİZİNİ

Ek 1.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T1 testine ait sonuçlar	148
Ek 2.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları	148
Ek 3.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları	148
Ek 4.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	148
Ek 5.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T1 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı.....	148
Ek 6.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T1 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları	149
Ek 7.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T2 testine ait sonuçlar	149
Ek 8.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları	149
Ek 9.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları	149
Ek 10.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	149
Ek 11.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T2 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı.....	150
Ek 12.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T2 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları	150
Ek 13.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T3 testine ait sonuçlar	150

Ek 14.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T3 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları	150
Ek 15.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T3 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları	150
Ek 16.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T3 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	151
Ek 17.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T3 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı.....	151
Ek 18.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T3 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları	151
Ek 19.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T4 testine ait sonuçlar	151
Ek 20.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T4 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları	151
Ek 21.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T4 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları	152
Ek 22.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T4 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	152
Ek 23.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T4 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı.....	152
Ek 24.	Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T4 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları	152
Ek 25.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testine ait sonuçlar	152
Ek 26.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları	153
Ek 27.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları	153
Ek 28.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	153

Ek 29.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı.....	153
Ek 30.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları	153
Ek 31.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testine ait fraksiyonel verim sonuçları.....	154
Ek 32.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T2 testine ait sonuçlar	154
Ek 33.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları	154
Ek 34.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları.....	154
Ek 35.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	154
Ek 36.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T2 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı.....	155
Ek 37.	Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T2 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları	155
Ek 38.	Sallantılı masa (Masa_B) ile yüksek besleme hızında yapılan teste (T1) ait sonuçlar	155
Ek 39.	Sallantılı masa (Masa_B) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı tenör sonuçları.....	155
Ek 40.	Sallantılı masa (Masa_B) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı verim sonuçları	155
Ek 41.	Sallantılı masa (Masa_B) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	156
Ek 42.	Sallantılı masa (Masa_B) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı	156

Ek 43.	Sallantılı masa (Masa_B) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar.....	156
Ek 44.	Sallantılı masa (Masa_B) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T2) ait sonuçlar	156
Ek 45.	Sallantılı masa (Masa_B) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı tenör sonuçları.....	156
Ek 46.	Sallantılı masa (Masa_B) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı verim sonuçları	156
Ek 47.	Sallantılı masa (Masa_B) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	157
Ek 48.	Sallantılı masa (Masa_B) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T2) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı	157
Ek 49.	Sallantılı masa (Masa_B) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T2) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar.....	157
Ek 50.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) ait sonuçlar.....	157
Ek 51.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı tenör sonuçları.....	157
Ek 52.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı verim sonuçları	158
Ek 53.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları.....	158
Ek 54.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı	158
Ek 55.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar	158

Ek 56.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile orta besleme hızında yapılan teste (T2) ait sonuçlar	158
Ek 57.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile orta besleme hızında yapılan teste (T2) tane boyuna bağlı tenör sonuçları.....	159
Ek 58.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile orta besleme hızında yapılan teste (T2) tane boyuna bağlı verim sonuçları	159
Ek 59.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile orta besleme hızında yapılan teste (T2) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	159
Ek 60.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile orta besleme hızında yapılan teste (T2) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı	159
Ek 61.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile orta besleme hızında yapılan teste (T2) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar.....	159
Ek 62.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile düşük besleme hızında yapılan teste (T3) ait sonuçlar.....	160
Ek 63.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile düşük besleme hızında yapılan teste (T3) tane boyuna bağlı tenör sonuçları	160
Ek 64.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile düşük besleme hızında yapılan teste (T3) tane boyuna bağlı verim sonuçları	160
Ek 65.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile düşük besleme hızında yapılan teste (T3) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları.....	160
Ek 66.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile düşük besleme hızında yapılan teste (T3) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı	160
Ek 67.	Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile düşük besleme hızında yapılan teste (T3) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar	161
Ek 68.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan teste (T1) ait sonuçlar	161
Ek 69.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan teste (T1) tane boyuna bağlı tenör sonuçları.....	161

Ek 70.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı verim sonuçları	161
Ek 71.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	161
Ek 72.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T1) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı	162
Ek 73.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T1) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar.....	162
Ek 74.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T2) ait sonuçlar	162
Ek 75.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı tenör sonuçları.....	162
Ek 76.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı verim sonuçları	162
Ek 77.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	163
Ek 78.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T2) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı	163
Ek 79.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T2) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar.....	163
Ek 80.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T3) ait sonuçlar	163
Ek 81.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T3) tane boyuna bağlı tenör sonuçları.....	163
Ek 82.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T3) tane boyuna bağlı verim sonuçları	164
Ek 83.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T3) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	164

Ek 84.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T3) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı	164
Ek 85.	MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T3) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar.....	164
Ek 86.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T4) ait sonuçlar	164
Ek 87.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte(T4) tane boyuna bağlı tenör sonuçları	165
Ek 88.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T4) tane boyuna bağlı verim sonuçları	165
Ek 89.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T4) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	165
Ek 90.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T4) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı	165
Ek 91.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T4) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar.....	165
Ek 92.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T5) ait sonuçlar	166
Ek 93.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T5) tane boyuna bağlı tenör sonuçları.....	166
Ek 94.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T5) tane boyuna bağlı verim sonuçları	166
Ek 95.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T5) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	166
Ek 96.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T5) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı	166

Ek 97.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T5) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar.....	167
Ek 98.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T6) ait sonuçlar	167
Ek 99.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T6) tane boyuna bağlı tenör sonuçları.....	167
Ek 100.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T6) tane boyuna bağlı verim sonuçları	167
Ek 101.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T6) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	167
Ek 102.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T6) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı	168
Ek 103.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T6) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar.....	168
Ek 104.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 220 rpm tambur hızında yapılan testte (T7) ait sonuçlar	168
Ek 105.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 220 rpm tambur hızında yapılan testte (T7) tane boyuna bağlı tenör sonuçları.....	168
Ek 106.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 220 rpm tambur hızında yapılan testte (T7) tane boyuna bağlı verim sonuçları	168
Ek 107.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 220 rpm tambur hızında yapılan testte (T7) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	169
Ek 108.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 220 rpm tambur hızında yapılan testte (T7) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı	169
Ek 109.	MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 220 rpm tambur hızında yapılan testte (T7) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar.....	169
Ek 110.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T1 testine ait sonuçlar.	169

Ek 111.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları.....	169
Ek 112.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları	169
Ek 113.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	170
Ek 114.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T1 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı.....	170
Ek 115.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T1 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları	170
Ek 116.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T2 testine ait sonuçlar.	170
Ek 117.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları.....	170
Ek 118.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları	170
Ek 119.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	171
Ek 120.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T2 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı.....	171
Ek 121.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T2 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları	171
Ek 122.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T3 testine ait sonuçlar.	171
Ek 123.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T3 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları.....	171
Ek 124.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T3 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları	172
Ek 125.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T3 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	172

Ek 126.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T3 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı.....	172
Ek 127.	Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T3 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) sonuçları	172
Ek 128.	Spiral zenginleştirici (Spiral_C) ile yapılan teste ait sonuçlar	172
Ek 129.	Spiral zenginleştirici (Spiral_C) ile yapılan teste ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları	173
Ek 130.	Spiral zenginleştirici (Spiral_C) ile yapılan teste ait fraksiyonel verim sonuçları.....	173
Ek 131.	Spiral zenginleştirici (Spiral_C) ile yapılan teste ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları	173
Ek 132.	Spiral zenginleştirici (Spiral_C) ile yapılan testte her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı.....	173
Ek 133.	Spiral zenginleştirici (Spiral_C) ile yapılan teste ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) sonuçları	173

Ek 1. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T1 testine ait sonuçlar

MASA_B T1	Fe ₃ O ₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	7.92	72.99	9.25	7.92
Ara Ürün	0.25	12.55	51.49	0.25
Atık	0.37	14.46	39.26	0.37
Besleme	1.00	100.00	100.00	

Ek 2. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe ₃ O ₄ (%)	Tane Boyu (µm)			
	+100	-100+63	-63+32	-32
Konsantre	5.76	17.50	32.20	45.95
Ara Ürün	0.10	0.25	0.69	2.71
Atık	0.04	0.21	0.43	0.89
Besleme	0.90	1.12	1.13	1.15

Ek 3. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)			
	+100	-100+63	-63+32	-32
Konsantre	92.70	80.32	52.37	11.09
Ara Ürün	6.25	13.50	27.53	17.42
Atık	1.05	6.18	20.11	71.49
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 4. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)			
	+100	-100+63	-63+32	-32
Konsantre	14.49	5.14	1.83	0.28
Ara Ürün	58.68	61.61	45.09	7.40
Atık	26.84	33.25	53.08	92.32
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 5. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T1 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)				
	+100	-100+63	-63+32	-32	Toplam
Konsantre	85.71	11.32	2.62	0.35	100.00
Ara Ürün	62.36	24.37	11.59	1.68	100.00
Atık	37.41	17.25	17.90	27.44	100.00
Besleme	54.73	20.36	13.24	11.67	100.00

Ek 6. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T1 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+100	79.23	92.70	14.49	6.40
-100+63	76.34	80.32	5.14	15.61
-63+32	51.34	52.37	1.83	28.60
-32	10.99	11.09	0.28	39.95

Ek 7. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T2 testine ait sonuçlar

MASA_B T2	Fe ₃ O ₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	52.16	85.19	1.64	52.16
Ara Ürün	0.19	12.28	65.16	0.19
Atık	0.08	2.53	33.20	0.08
Besleme	1.00	100.00	100.00	

Ek 8. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe ₃ O ₄ (%)	Tane Boyu (µm)	
	+200	-200+100
Konsantre	72.02	47.24
Ara Ürün	0.19	0.19
Atık	0.05	0.16
Besleme	0.54	1.59

Ek 9. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)	
	+200	-200+100
Konsantre	77.02	88.74
Ara Ürün	19.00	9.35
Atık	3.98	1.91
Besleme	100.00	100.00

Ek 10. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)	
	+200	-200+100
Konsantre	0.58	2.98
Ara Ürün	55.10	77.94
Atık	44.32	19.08
Besleme	100.00	100.00

Ek 11. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T2 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)		
	+200	-200+100	Toplam
Konsantre	19.84	80.16	100.00
Ara Ürün	47.31	52.69	100.00
Atık	74.68	25.32	100.00
Besleme	55.95	44.06	100.00

Ek 12. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T2 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+200	76.99	77.02	0.58	100.00
-200+100	87.71	88.74	2.98	29.75

Ek 13. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T3 testine ait sonuçlar

MASA_B T3	Fe ₃ O ₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	23.62	48.43	2.05	23.62
Ara Ürün	1.34	33.47	24.97	1.34
Atık	0.25	18.10	72.98	0.25
Besleme	1.00	100.00	100.00	

Ek 14. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T3 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe ₃ O ₄ (%)	Tane Boyu (µm)			
	+100	-100+63	-63+32	-32
Konsantre	17.25	25.21	32.54	64.00
Ara Ürün	0.81	0.81	2.21	12.62
Atık	0.07	0.05	0.16	0.54
Besleme	0.85	1.12	1.28	0.85

Ek 15. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T3 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)			
	+100	-100+63	-63+32	-32
Konsantre	65.65	67.03	43.50	12.92
Ara Ürün	28.64	30.67	47.68	25.15
Atık	5.71	2.30	8.82	61.93
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 16. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T3 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)			
	+100	-100+63	-63+32	-32
Konsantre	3.22	2.97	1.71	0.17
Ara Ürün	30.08	42.14	27.63	1.69
Atık	66.70	54.89	70.66	98.14
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 17. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T3 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)				
	+100	-100+63	-63+32	-32	Toplam
Konsantre	46.64	33.79	17.39	2.18	100.00
Ara Ürün	35.77	39.41	23.06	1.77	100.00
Atık	27.14	17.56	20.18	35.12	100.00
Besleme	29.70	23.35	20.84	26.12	100.00

Ek 18. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T3 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+100	63.16	65.65	3.22	20.39
-100+63	65.07	67.03	2.97	22.59
-63+32	42.54	43.50	1.71	25.42
-32	12.91	12.92	0.17	75.56

Ek 19. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T4 testine ait sonuçlar

MASA_B T4	Fe ₃ O ₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	52.98	79.26	7.48	10.60
Ara Ürün	1.31	13.84	52.81	0.26
Atık	0.87	6.91	39.71	0.17
Besleme	5.00	100.00	100.00	

Ek 20. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T4 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe ₃ O ₄ (%)	Tane Boyu (µm)				
	+200	-200+100	-100+63	-63+32	-32
Konsantre	41.17	54.36	77.17	89.51	88.56
Ara Ürün	0.69	0.49	0.90	2.91	25.83
Atık	0.13	0.17	0.27	0.58	1.60
Besleme	7.07	4.70	4.68	4.41	3.33

Ek 21. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T4 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)				
	+200	-200+100	-100+63	-63+32	-32
Konsantre	93.69	91.89	84.79	62.60	22.95
Ara Ürün	5.87	7.31	13.91	30.76	31.18
Atık	0.44	0.80	1.30	6.64	45.88
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 22. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T4 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)				
	+200	-200+100	-100+63	-63+32	-32
Konsantre	16.09	7.94	5.14	3.08	0.86
Ara Ürün	60.47	70.09	72.57	46.68	4.02
Atık	23.45	21.96	22.29	50.24	95.12
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 23. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T4 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)					
	+200	-200+100	-100+63	-63+32	-32	Toplam
Konsantre	53.94	25.24	12.69	6.06	2.07	100.00
Ara Ürün	28.72	31.55	25.38	12.99	1.37	100.00
Atık	14.81	13.15	10.37	18.59	43.09	100.00
Besleme	25.08	23.77	18.47	14.70	17.99	100.00

Ek 24. Sallantılı masa (Masa_A) ile yapılan T4 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+200	86.01	93.69	16.09	5.82
-200+100	89.77	91.89	7.94	11.57
-100+63	85.15	84.79	5.14	16.50
-63+32	63.38	62.60	3.08	20.30
-32	23.15	22.95	0.86	26.62

Ek 25. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testine ait sonuçlar

FALCON T1	Fe ₃ O ₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	6.83	50.85	7.46	6.83
Ara Ürün	1.27	43.16	34.13	1.27
Atık	0.10	5.99	58.41	0.10
Besleme	1.00	100.00	100.00	

Ek 26. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe ₃ O ₄ (%)	Tane Boyu (µm)					
	+200	-200+100	-100+63	-63+32	-32+20	-20
Konsantre	7.14	9.05	8.48	5.60	4.17	4.26
Ara Ürün	0.67	1.33	1.61	1.37	1.44	1.29
Atık	0.07	0.08	0.08	0.10	0.14	0.17
Besleme	0.66	1.19	1.32	1.14	1.06	0.68

Ek 27. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)					
	+200	-200+100	-100+63	-63+32	-32+20	-20
Konsantre	58.85	58.59	53.58	46.82	35.81	36.72
Ara Ürün	34.33	37.72	43.02	48.97	57.67	45.28
Atık	6.82	3.70	3.41	4.21	6.52	18.00
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 28. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)					
	+200	-200+100	-100+63	-63+32	-32+20	-20
Konsantre	5.42	7.67	8.34	9.50	9.11	5.87
Ara Ürün	33.46	33.66	35.24	40.56	42.65	23.92
Atık	61.12	58.67	56.42	49.94	48.24	70.21
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 29. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)						Toplam
	+200	-200+100	-100+63	-63+32	-32+20	-20	
Konsantre	14.38	22.06	19.71	20.87	9.86	13.13	100.00
Ara Ürün	19.40	21.15	18.19	19.48	10.09	11.69	100.00
Atık	20.71	21.55	17.02	14.01	6.67	20.05	100.00
Besleme	19.79	21.45	17.62	16.39	8.07	16.68	100.00

Ek 30. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+200	53.95	58.85	5.42	10.86
-200+100	51.74	58.59	7.67	7.63
-100+63	46.07	53.58	8.34	6.42
-63+32	37.91	46.82	9.50	4.93
-32+20	27.08	35.81	9.11	3.93
-20	31.12	36.72	5.87	6.25

Ek 31. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T1 testine ait fraksiyonel verim sonuçları

Tane Boyu (µm)	Konsantre			S1			S2			S3		
	Fe ₃ O ₄ (%)	Ağırlık (%)	Verim (%)	Fe ₃ O ₄ (%)	Ağırlık (%)	Verim (%)	Fe ₃ O ₄ (%)	Ağırlık (%)	Verim (%)	Fe ₃ O ₄ (%)	Ağırlık (%)	Verim (%)
+200	7.64	14.39	8.01	1.69	23.80	3.67	0.27	19.11	0.49	0.22	16.77	0.34
-200+100	9.52	22.16	15.38	4.22	23.20	8.93	0.74	24.30	1.70	0.30	21.10	0.60
-100+63	8.23	19.64	11.79	4.23	17.16	6.62	1.29	16.96	2.09	0.33	17.35	0.54
-63+32	5.68	20.90	8.65	3.95	17.13	6.18	1.44	18.76	2.58	0.31	23.13	0.67
-32+20	4.27	9.81	3.05	3.62	9.16	3.02	1.28	9.07	1.11	0.33	9.49	0.30
-20	4.15	13.10	3.97	2.58	9.54	2.24	1.32	11.80	1.48	0.54	12.16	0.61
Toplam	7.07	100.00	50.85	3.34	100.00	30.66	0.96	100.00	9.46	0.28	100.00	3.05

Ek 32. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T2 testine ait sonuçlar

FALCON T2	Fe ₃ O ₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	31.87	36.81	5.78	6.37
Ara Ürün	7.64	58.26	38.16	1.53
Atık	0.44	4.93	56.06	0.09
Besleme	5.00	100.00	100.00	

Ek 33. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe ₃ O ₄ (%)	Tane Boyu (µm)					
	+200	-200+100	-100+63	-63+32	-32+20	-20
Konsantre	26.59	36.81	37.71	31.17	22.81	17.71
Ara Ürün	5.91	10.03	9.48	7.86	5.08	5.65
Atık	0.22	0.39	0.50	0.52	0.32	0.82
Besleme	3.25	6.02	6.56	6.08	3.82	3.34

Ek 34. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)					
	+200	-200+100	-100+63	-63+32	-32+20	-20
Konsantre	42.96	39.80	42.71	34.68	31.48	13.27
Ara Ürün	52.52	56.31	53.07	61.40	65.71	73.57
Atık	4.53	3.89	4.23	3.92	3.82	13.16
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 35. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)					
	+200	-200+100	-100+63	-63+32	-32+20	-20
Konsantre	5.24	6.51	7.43	6.77	5.10	2.50
Ara Ürün	28.84	33.84	36.70	47.49	49.43	43.50
Atık	65.92	59.65	55.87	45.74	45.47	53.99
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 36. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T2 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)						Toplam
	+200	-200+100	-100+63	-63+32	-32+20	-20	
Konsantre	18.70	26.07	22.83	19.30	7.00	6.10	100.00
Ara Ürün	15.58	20.52	17.09	20.50	10.26	16.05	100.00
Atık	24.24	24.62	17.71	13.44	6.43	13.56	100.00
Besleme	20.62	23.14	17.77	16.48	7.92	14.08	100.00

Ek 37. Falcon zenginleştiricisi ile yapılan T2 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+200	39.49	42.96	5.24	8.19
-200+100	36.30	39.80	6.51	6.11
-100+63	38.79	42.71	7.43	5.75
-63+32	30.48	34.68	6.77	5.12
-32+20	26.79	30.48	5.10	5.97
-20	11.28	13.27	2.50	5.30

Ek 38. Sallantılı masa (Masa_B) ile yüksek besleme hızında yapılan teste (T1) ait sonuçlar

MASA_B T1	Fe₃O₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	92.99	83.08	5.15	16.14
Atık	1.03	16.2	94.85	0.18
Besleme	5.76	100.00	100.00	

Ek 39. Sallantılı masa (Masa_B) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe₃O₄ (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	55.41	87.99	100.00	98.53	93.52
Atık	0.41	0.30	0.83	1.80	5.40
Besleme	1.37	4.54	10.50	5.63	6.45

Ek 40. Sallantılı masa (Masa_B) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	70.76	93.75	92.84	69.28	17.27
Atık	29.24	6.25	7.16	30.72	82.74
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 41. Sallantılı masa (Masa_B) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	1.75	4.84	9.75	3.96	1.19
Atık	98.25	95.16	90.25	96.04	98.81
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 42. Sallantılı masa (Masa_B) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)					
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38	Toplam
Konsantre	7.08	29.98	51.09	10.27	1.59	100.00
Atık	21.59	32.03	25.68	13.53	7.17	100.00
Besleme	20.85	31.93	26.99	13.36	6.88	100.00

Ek 43. Sallantılı masa (Masa_B) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+106	70.33	70.76	1.75	40.47
-106+75	94.87	93.75	4.84	19.39
-75+53	97.19	92.84	9.75	9.52
-53+38	70.85	69.28	3.96	17.51
-38	17.64	17.27	1.19	14.50

Ek 44. Sallantılı masa (Masa_B) ile düşük besleme hızında yapılan teste (T2) ait sonuçlar

MASA_A T2	Fe ₃ O ₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	89.76	78.69	5.10	15.42
Atık	1.31	21.31	94.90	0.23
Besleme	5.82	100.00	100.00	

Ek 45. Sallantılı masa (Masa_B) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe ₃ O ₄ (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	41.90	89.40	97.47	92.08	93.74
Atık	0.51	0.47	1.49	2.90	4.97
Besleme	1.29	3.74	11.39	8.08	7.34

Ek 46. Sallantılı masa (Masa_B) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	60.98	87.79	88.24	66.18	34.09
Atık	39.02	12.21	11.76	33.82	65.91
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 47. Sallantılı masa (Masa_B) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	1.88	87.79	88.24	66.18	34.09
Atık	98.12	12.21	11.76	33.82	65.91
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 48. Sallantılı masa (Masa_B) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T2) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)					
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38	Toplam
Konsantre	8.91	23.30	50.59	13.96	3.24	100.00
Atık	24.97	32.86	23.65	12.17	6.35	100.00
Besleme	24.15	32.37	25.02	12.26	6.19	100.00

Ek 49. Sallantılı masa (Masa_B) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T2) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+106	60.18	60.98	1.88	32.40
-106+75	88.71	87.79	3.67	23.92
-75+53	92.48	88.24	10.31	8.56
-53+38	67.97	66.18	5.81	11.40
-38	34.97	34.09	2.67	12.77

Ek 50. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yüksek besleme hızında yapılan teste (T1) ait sonuçlar

SPİRAL_A T1	Fe ₃ O ₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	36.29	49.19	5.67	8.66
Atık	2.26	50.86	94.33	0.54
Besleme	4.19	100.00	100.00	

Ek 51. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe ₃ O ₄ (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	10.63	42.88	59.21	38.00	6.78
Atık	0.41	0.14	1.63	2.26	11.51
Besleme	0.94	2.34	5.77	4.27	11.27

Ek 52. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	58.54	94.38	73.70	50.10	3.09
Atık	41.46	5.62	26.30	49.90	96.91
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 53. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	5.15	5.14	7.18	5.63	5.14
Atık	94.85	94.86	92.82	94.37	94.86
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 54. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)					Toplam
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38	
Konsantre	19.96	26.41	28.37	13.90	11.37	100.00
Atık	22.07	29.28	22.05	14.00	12.60	100.00
Besleme	21.95	29.12	22.41	13.99	12.53	100.00

Ek 55. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile yüksek besleme hızında yapılan testte (T1) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+106	54.06	58.54	5.15	11.35
-106+75	92.23	94.38	5.14	18.35
-75+53	72.29	73.70	7.18	10.27
-53+38	47.26	50.10	5.63	8.89
-38	0.00	3.09	5.14	0.60

Ek 56. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile orta besleme hızında yapılan teste (T2) ait sonuçlar

SPİRAL_A T2	Fe ₃ O ₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	20.24	88.22	21.11	4.18
Atık	0.72	11.78	78.89	0.15
Besleme	4.84	100.00	100.00	

Ek 57. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile orta besleme hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe ₃ O ₄ (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	3.70	19.14	38.88	22.27	16.52
Atık	0.46	0.57	0.06	1.17	1.89
Besleme	1.15	4.24	9.60	6.01	4.36

Ek 58. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile orta besleme hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	68.43	89.18	99.57	84.95	63.86
Atık	31.58	10.82	0.43	15.05	36.14
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 59. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile orta besleme hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	21.30	19.77	24.57	22.92	16.83
Atık	78.71	80.23	75.43	77.08	83.17
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 60. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile orta besleme hızında yapılan testte (T2) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)					Toplam
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38	
Konsantre	24.22	26.12	23.76	14.38	11.51	100.00
Atık	23.96	28.37	19.52	12.94	15.22	100.00
Besleme	24.01	27.89	20.42	13.24	14.44	100.00

Ek 61. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile orta besleme hızında yapılan testte (T2) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplam sonuçlar

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+106	47.88	68.43	21.30	3.21
-106+75	73.74	89.18	19.77	4.51
-75+53	86.47	99.57	24.57	4.05
-53+38	67.64	84.95	22.92	3.71
-38	50.04	63.86	16.83	3.79

Ek 62. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile düşük besleme hızında yapılan teste (T3) ait sonuçlar

SPİRAL_A T3	Fe₃O₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	14.02	78.06	26.96	2.90
Atık	1.45	21.94	73.04	0.30
Besleme	4.84	100.00	100.00	

Ek 63. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T3) tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe₃O₄ (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	3.46	13.47	23.57	18.29	14.93
Atık	0.66	0.89	1.08	1.94	3.04
Besleme	1.47	4.48	9.12	5.57	5.04

Ek 64. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T3) tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	68.13	85.74	92.43	72.96	49.77
Atık	31.87	14.26	7.57	27.04	50.23
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 65. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T3) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	28.92	28.52	35.76	22.21	16.80
Atık	71.08	71.48	64.24	77.79	83.20
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 66. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T3) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)					Toplam
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38	
Konsantre	25.88	27.53	23.81	11.91	10.87	100.00
Atık	23.48	25.46	15.79	15.39	19.88	100.00
Besleme	24.13	26.02	17.95	14.45	17.45	100.00

Ek 67. Spiral zenginleştirici (Spiral_A) ile düşük besleme hızında yapılan testte (T3) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+106	40.02	68.13	28.92	2.36
-106+75	60.99	85.74	28.52	3.01
-75+53	64.83	92.43	35.76	2.58
-53+38	54.99	72.96	22.21	3.29
-38	35.43	49.77	16.80	2.96

Ek 68. MGS ekipmanı ile 3° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan teste (T1) ait sonuçlar

MGS T1	Fe ₃ O ₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	6.62	81.97	62.06	1.32
Atık	2.38	18.03	37.94	0.48
Besleme	5.00	100.00	100.00	

Ek 69. MGS ekipmanı ile 3° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe ₃ O ₄ (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	2.93	5.07	7.79	6.50	8.46
Atık	0.42	1.75	6.33	4.76	4.70
Besleme	0.94	3.68	7.50	6.21	7.25

Ek 70. MGS ekipmanı ile 3° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	65.08	79.98	83.45	87.29	79.09
Atık	34.92	20.02	16.55	12.71	20.91
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 71. MGS ekipmanı ile 3° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T1) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	20.93	58.00	80.38	83.42	67.75
Atık	79.07	42.00	19.62	16.58	32.25
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 72. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T1) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)					Toplam
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38	
Konsantre	6.16	25.47	30.31	21.94	16.13	100.00
Atık	38.04	30.17	12.10	7.14	12.55	100.00
Besleme	18.25	27.25	23.40	16.32	14.77	100.00

Ek 73. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T1) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+106	44.76	65.08	20.93	3.11
-106+75	23.17	79.98	58.00	1.38
-75+53	3.42	83.45	80.38	1.04
-53+38	4.25	87.29	83.42	1.05
-38	12.61	79.09	67.75	1.17

Ek 74. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan teste (T2) ait sonuçlar

MGS T2	Fe ₃ O ₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	4.60	83.99	76.55	1.10
Atık	2.86	16.02	23.45	0.68
Besleme	4.19	100.00	100.00	

Ek 75. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe ₃ O ₄ (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	1.27	3.26	6.01	5.86	7.06
Atık	0.49	1.80	5.45	4.26	6.46
Besleme	0.97	2.93	5.94	5.66	6.90

Ek 76. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	79.96	86.32	87.13	90.27	74.36
Atık	20.04	13.69	12.87	9.73	25.64
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 77. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T2) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	60.76	77.66	85.99	87.08	72.64
Atık	39.24	22.34	14.01	12.92	27.36
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 78. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T2) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)					Toplam
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38	
Konsantre	16.52	27.72	24.36	16.67	14.74	100.00
Atık	34.82	26.03	12.96	8.07	18.12	100.00
Besleme	20.81	27.32	21.69	14.65	15.53	100.00

Ek 79. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T2) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+106	19.42	79.96	60.76	1.32
-106+75	9.00	86.32	77.66	1.11
-75+53	1.25	87.13	85.99	1.01
-53+38	3.46	90.27	87.08	1.04
-38	1.90	74.36	72.64	1.02

Ek 80. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan teste (T3) ait sonuçlar

MGS T3	Fe ₃ O ₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	4.65	84.35	82.08	1.03
Atık	3.96	15.65	17.92	0.87
Besleme	4.53	100.00	100.00	

Ek 81. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T3) tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe ₃ O ₄ (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	1.17	3.69	6.47	5.50	6.66
Atık	0.61	2.03	7.68	8.12	7.71
Besleme	1.00	3.43	6.61	5.75	6.89

Ek 82. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T3) tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	81.47	90.50	86.49	86.48	75.53
Atık	18.53	9.50	13.51	13.52	24.47
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 83. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T3) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	69.63	83.98	88.38	90.42	78.14
Atık	30.37	16.02	11.62	9.58	21.86
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 84. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T3) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)					Toplam
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38	
Konsantre	16.39	29.39	21.64	16.59	15.99	100.00
Atık	32.74	25.68	13.03	8.05	20.50	100.00
Besleme	19.32	28.73	20.09	15.06	16.80	100.00

Ek 85. MGS ekipmanıyla 3° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T3) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+106	12.03	81.47	69.63	1.17
-106+75	6.84	90.50	83.98	1.08
-75+53	0.00	86.49	88.38	0.98
-53+38	0.00	86.48	90.42	0.96
-38	0.00	75.53	78.14	0.97

Ek 86. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan teste (T4) ait sonuçlar

MGS T4	Fe ₃ O ₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	8.82	81.63	50.23	1.62
Atık	2.00	18.37	49.77	0.37
Besleme	5.43	100.00	100.00	

Ek 87. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte(T4) tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe ₃ O ₄ (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	5.23	7.97	10.49	6.98	9.94
Atık	0.44	1.22	5.50	5.42	4.39
Besleme	0.89	3.67	9.22	6.72	7.84

Ek 88. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T4) tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	55.26	78.94	84.79	86.30	78.74
Atık	44.74	21.06	15.22	13.70	21.26
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 89. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T4) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	9.35	36.40	74.50	83.01	62.05
Atık	90.65	63.60	25.50	16.99	37.96
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 90. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T4) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)					Toplam
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38	
Konsantre	3.82	19.37	32.26	24.82	19.73	100.00
Atık	37.38	34.17	11.15	5.13	12.18	100.00
Besleme	20.52	26.74	21.75	15.02	15.97	100.00

Ek 91. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 160 rpm tambur hızında yapılan testte (T4) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplam sonuçlar

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+106	46.46	55.26	9.35	5.91
-106+75	44.83	78.94	36.40	2.17
-75+53	11.79	84.79	74.50	1.14
-53+38	3.62	86.30	83.01	1.04
-38	18.72	78.74	62.05	1.27

Ek 92. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan teste (T5) ait sonuçlar

MGS T5	Fe₃O₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	4.75	83.77	74.08	1.13
Atık	2.63	16.23	25.92	0.63
Besleme	4.20	100.00	100.00	

Ek 93. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T5) tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe₃O₄ (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	1.09	2.87	6.62	6.25	6.68
Atık	0.56	1.81	5.97	4.09	4.77
Besleme	0.86	2.58	6.52	6.00	6.13

Ek 94. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T5) tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	70.95	80.78	85.80	92.09	77.80
Atık	29.06	19.22	14.21	7.91	22.20
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 95. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T5) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	55.78	72.58	84.48	88.40	71.47
Atık	44.22	27.42	15.52	11.60	28.53
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 96. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T5) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)					
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38	Toplam
Konsantre	14.69	26.74	25.33	17.47	15.77	100.00
Atık	33.28	28.87	13.30	6.55	18.00	100.00
Besleme	19.51	27.29	22.21	14.64	16.35	100.00

Ek 97. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 180 rpm tambur hızında yapılan testte (T5) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+106	15.33	70.95	55.78	1.27
-106+75	8.49	80.78	72.58	1.11
-75+53	1.44	85.80	84.48	1.02
-53+38	4.02	92.09	88.40	1.04
-38	6.91	77.80	71.47	1.09

Ek 98. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan teste (T6) ait sonuçlar

MGS T6	Fe₃O₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	4.68	85.14	80.68	1.06
Atık	3.41	14.86	19.32	0.77
Besleme	4.43	100.00	100.00	

Ek 99. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T6) tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe₃O₄ (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	1.02	3.54	7.74	5.67	5.24
Atık	0.64	2.03	6.48	5.05	5.30
Besleme	0.92	3.27	7.57	5.59	5.26

Ek 100. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T6) tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	81.34	88.88	88.14	88.40	74.67
Atık	18.66	11.13	11.86	11.60	25.33
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 101. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T6) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	73.14	82.04	86.14	87.17	74.88
Atık	26.86	117.97	13.86	12.83	25.12
Besleme	100.00	100.0	100.00	100.00	100.00

Ek 102. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T6) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (μm)					Toplam
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38	
Konsantre	16.51	28.90	22.32	15.19	17.08	100.00
Atık	25.31	26.43	14.99	9.34	23.92	100.00
Besleme	18.21	28.43	20.90	14.06	18.40	100.00

Ek 103. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 200 rpm tambur hızında yapılan testte (T6) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplam sonuçlar

Tane Boyu (μm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+106	8.33	81.34	73.14	1.11
-106+75	7.17	88.88	82.04	1.08
-75+53	2.24	88.14	86.14	1.02
-53+38	1.34	88.40	87.17	1.01
-38	0.00	74.67	74.88	1.00

Ek 104. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 220 rpm tambur hızında yapılan teste (T7) ait sonuçlar

MGS T7	Fe₃O₄ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	5.13	84.47	81.51	1.04
Atık	4.16	15.53	18.49	0.84
Besleme	4.95	100.00	100.00	

Ek 105. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 220 rpm tambur hızında yapılan testte (T7) tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Fe₃O₄ (%)	Tane Boyu (μm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	0.84	3.90	8.38	6.07	5.99
Atık	0.59	2.83	9.03	4.84	6.31
Besleme	0.77	3.70	8.47	5.92	6.06

Ek 106. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 220 rpm tambur hızında yapılan testte (T7) tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (μm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	79.56	85.84	85.32	89.81	78.61
Atık	20.44	14.16	14.68	10.19	21.39
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 107. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 220 rpm tambur hızında yapılan testte (T7) tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)				
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38
Konsantre	73.19	81.49	86.22	87.55	79.48
Atık	26.81	18.52	13.78	12.45	20.52
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 108. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 220 rpm tambur hızında yapılan testte (T7) her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)					
	+106	-106+75	-75+53	-53+38	-38	Toplam
Konsantre	15.83	27.35	21.68	16.09	19.07	100.00
Atık	25.56	27.39	15.27	10.08	21.70	100.00
Besleme	17.63	27.35	20.49	14.98	19.56	100.00

Ek 109. MGS ekipmanıyla 5° eğim ve 220 rpm tambur hızında yapılan testte (T7) konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarına (W) ait toplu sonuçlar

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+106	6.52	79.56	73.19	1.09
-106+75	4.59	85.84	81.49	1.05
-75+53	0.00	85.32	86.22	0.99
-53+38	2.45	89.81	87.55	1.03
-38	0.00	78.61	79.48	0.99

Ek 110. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T1 testine ait sonuçlar

SPİRAL_B T1	Cr ₂ O ₃ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	42.90	40.55	5.20	7.80
Atık	3.45	59.45	94.80	0.63
Besleme	5.50	100.00	100.00	

Ek 111. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Cr ₂ O ₃ (%)	Tane Boyu (µm)						
	+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53
Konsantre	39.19	45.74	45.32	43.28	40.18	37.87	33.79
Atık	1.96	2.28	2.51	3.44	4.13	5.38	9.31
Besleme	3.38	4.66	5.30	6.22	6.11	6.46	9.70

Ek 112. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)						
	+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53
Konsantre	44.13	53.75	55.78	48.55	36.19	19.49	5.51
Atık	55.87	46.25	44.22	51.45	63.81	80.51	94.49
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 113. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T1 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)						
	+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53
Konsantre	3.80	5.48	6.52	6.98	5.50	3.32	1.58
Atık	96.20	94.52	93.48	93.03	94.50	96.68	98.42
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 114. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T1 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)							
	+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53	Toplam
Konsantre	12.12	21.04	24.80	21.14	13.48	5.33	2.09	100.00
Atık	19.02	19.40	17.53	16.63	12.37	8.53	6.53	100.00
Besleme	16.14	19.70	20.19	15.60	12.47	9.41	6.49	100.00

Ek 115. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T1 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+300	42.42	44.13	3.80	11.61
-300+212	51.81	53.75	5.48	9.81
-212+150	53.39	55.78	6.52	8.55
-150+106	45.73	48.55	6.98	6.96
-106+75	33.69	36.19	5.50	6.58
-75+53	17.85	19.49	3.32	5.86
-53	4.58	5.51	1.58	3.48

Ek 116. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T2 testine ait sonuçlar

SPİRAL_B T2	Cr ₂ O ₃ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	46.76	51.57	5.83	8.86
Atık	2.72	48.43	94.18	0.52
Besleme	5.28	100.00	100.00	

Ek 117. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Cr ₂ O ₃ (%)	Tane Boyu (µm)						
	+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53
Konsantre	49.18	56.96	57.34	52.97	35.11	16.79	22.71
Atık	2.06	1.83	1.96	2.46	4.27	8.93	8.92
Besleme	2.97	4.22	4.99	6.94	7.37	9.88	9.99

Ek 118. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)						
	+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53
Konsantre	32.08	58.48	62.84	67.71	47.85	20.65	17.63
Atık	67.92	41.51	37.15	32.29	52.14	79.34	82.36
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 119. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T2 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)						
	+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53
Konsantre	1.94	4.34	5.47	8.88	10.05	12.15	7.76
Atık	98.06	95.66	94.53	91.12	89.95	87.85	92.24
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 120. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T2 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)							
	+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53	Toplam
Konsantre	6.91	16.88	22.01	22.98	18.71	9.09	3.42	100.00
Atık	22.96	22.37	22.80	14.73	10.50	4.06	2.58	100.00
Besleme	22.02	22.05	22.76	15.21	10.98	4.36	2.63	100.00

Ek 121. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T2 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) toplu sonuçları

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+300	31.51	32.08	1.94	16.57
-300+212	57.70	58.48	4.34	13.49
-212+150	61.88	62.84	5.47	11.48
-150+106	65.47	67.71	8.88	7.63
-106+75	42.37	47.85	10.05	4.76
-75+53	9.93	20.65	12.15	1.70
-53	11.56	17.63	7.76	2.27

Ek 122. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T3 testine ait sonuçlar

SPİRAL_B T3	Cr ₂ O ₃ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	39.09	63.86	9.06	7.06
Atık	2.20	36.15	90.94	0.40
Besleme	5.54	100.00	100.00	

Ek 123. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T3 testine ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Cr ₂ O ₃ (%)	Tane Boyu (µm)					
	+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75
Konsantre	28.37	42.08	45.80	38.48	36.49	35.33
Atık	1.46	1.33	1.14	1.41	2.01	6.04
Besleme	2.87	4.57	5.71	6.35	5.97	8.09

Ek 124. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T3 testine ait tane boyuna bağlı verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)					
	+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75
Konsantre	51.92	73.12	82.13	80.75	70.27	30.56
Atık	48.08	26.88	17.87	19.25	29.73	69.44
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 125. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T3 testine ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)					
	+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75
Konsantre	5.26	7.94	10.24	13.33	11.50	6.99
Atık	94.74	92.06	89.76	86.67	88.50	93.01
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 126. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T3 testinde her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)							
	+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53	Toplam
Konsantre	9.24	16.56	21.69	16.58	12.09	12.09	0.93	100.00
Atık	18.46	21.50	14.56	11.34	11.75	11.75	1.04	100.00
Besleme	17.63	21.06	15.20	11.81	11.78	11.78	1.03	100.00

Ek 127. Spiral zenginleştirici (Spiral_B) ile yapılan T3 testine ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) sonuçları

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+300	50.17	51.92	5.42	9.87
-300+212	70.68	73.12	8.03	9.21
-212+150	81.87	82.13	10.68	8.02
-150+106	63.19	80.75	11.34	6.06
-106+75	64.28	70.27	11.48	6.11
-75	28.41	30.56	7.43	4.37

Ek 128. Spiral zenginleştirici (Spiral_C) ile yapılan teste ait sonuçlar

SPİRAL_C	Cr ₂ O ₃ (%)	Verim (%)	Ağırlık (%)	TYO
Konsantre	30.01	69.62	17.50	3.97
Ara Ürün	2.93	27.56	71.03	0.39
Atık	1.85	2.81	11.46	0.25
Besleme	7.55	100.00	100.00	

Ek 129. Spiral zenginleştirici (Spiral_C) ile yapılan teste ait tane boyuna bağlı tenör sonuçları

Cr ₂ O ₃ (%)	Tane Boyu (µm)							
	+425	-425+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53
Konsantre	6.85	31.08	36.82	39.53	34.97	22.79	20.81	22.61
Ara Ürün	1.50	2.51	1.96	2.61	3.03	3.41	4.82	7.68
Atık	1.28	1.30	1.25	1.29	1.58	1.99	3.84	5.23
Besleme	3.54	6.59	6.59	7.50	8.72	7.90	9.18	10.72

Ek 130. Spiral zenginleştirici (Spiral_C) ile yapılan teste ait fraksiyonel verim sonuçları

Verim (%)	Tane Boyu (µm)							
	+425	-425+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53
Konsantre	74.20	69.80	75.62	71.66	72.97	69.92	63.40	48.21
Ara Ürün	23.36	27.78	21.95	26.63	25.49	26.41	31.80	44.23
Atık	2.44	2.42	2.43	1.71	1.55	3.68	4.80	7.56
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 131. Spiral zenginleştirici (Spiral_C) ile yapılan teste ait tane boyuna bağlı ağırlık dağılımı sonuçları

Ağırlık Dağılımı (%)	Tane Boyu (µm)							
	+425	-425+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53
Konsantre	38.28	14.79	13.54	13.60	18.20	24.23	27.97	22.85
Ara Ürün	54.97	73.05	73.67	76.50	73.35	61.23	60.55	61.71
Atık	6.75	12.16	12.79	9.89	8.45	14.54	11.47	15.44
Besleme	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ek 132. Spiral zenginleştirici (Spiral_C) ile yapılan testte her bir ürünün fraksiyonel ağırlık dağılımı

Ağırlık Dağılımı (%) - 2	Tane Boyu (µm)								
	+425	-425+300	-300+212	-212+150	-150+106	-106+75	-75+53	-53	Toplam
Konsantre	5.76	16.91	15.82	15.73	16.95	12.65	8.26	7.92	100.00
Ara Ürün	2.04	20.58	21.20	21.80	16.83	7.88	4.41	5.27	100.00
Atık	1.54	21.11	22.86	17.47	12.03	11.63	5.18	8.17	100.00
Besleme	2.63	20.01	20.44	20.24	16.30	9.14	5.17	6.07	100.00

Ek 133. Spiral zenginleştirici (Spiral_C) ile yapılan teste ait konsantrenin performans (E), verim (R), tenör yükseltgeme oranı (TYO) ve ağırlık dağılımlarının (W) sonuçları

Tane Boyu (µm)	E (%)	R (%)	W (%)	TYO
+425	37.87	74.20	38.28	1.94
-425+300	60.87	69.80	14.79	4.72
-300+212	68.69	75.62	13.54	5.58
-212+150	65.20	71.66	13.60	5.27
-150+106	62.77	72.97	18.20	4.01
-106+75	51.65	69.92	24.23	2.89
-75+53	40.92	63.40	27.97	2.27
-53	30.06	48.21	22.85	2.11



XXIX
IMPC 2018
SEPTEMBER, 15-21, 2018
MOSCOW, RUSSIA



SIZE-BY-SIZE EVALUATION OF THE CONCENTRATION PROCESS IN SPIRAL CONCENTRATORS

D. Izerdem^{1,*} and S.L. Ergun¹

¹ *Hacettepe University Mining Engineering Department, Mineral Processing Division, TURKEY*
(*: damlagucbilmez@hacettepe.edu.tr)

ABSTRACT

Beneficiation of the finely disseminated valuable minerals has been an important issue in the mineral processing field for decades. Treatment of the fine materials becomes difficult with using traditional gravity concentration equipment. To investigate particles behavior in a commonly used conventional gravity concentration equipment, a comprehensive study was undertaken in a plant, which only consists spiral concentrators as concentration units. Spiral concentrators require relatively coarse material to effectively concentrate valuables as well as offering greater simplicity for especially higher grade feeds. In the current work, chromite ore ($d_{80} = 290 \mu\text{m}$) was treated using spiral concentrators and the performance of spiral concentrators was examined. The design of the separation circuit comprised of rougher, cleaner and scavenger stages. The resultant fractions produced by each separation unit and feed samples were analyzed to identify the particle sizes, mineral liberations and chromite content. Grade and recovery comparisons were presented in size-by-size manner and the separation tendency of the particles were determined in varying feed rate conditions. The overall results indicated valuable mineral loss of the plant and alternative suggestions were pointed to reach the target values.

KEYWORDS

spiral concentrator, gravity concentration, chromite, physical separation

INTRODUCTION

Spiral concentrators are simple low energy consuming devices, which are generally used for pre-concentration of the minerals. They are cost efficient equipment separating minerals mainly based on density differences of the minerals. The adjustable splitters remove the concentrate as the remaining stream continues to move down the spiral.

Separation on a spiral is achieved through a combination of forces that act on particles as they move down the trough of the spiral. The main forces known to act on the particle on a spiral are the gravitational force, centrifugal force, hydrodynamic drag and Bagnold force (Atasoy and Spottiswood, 1995; Burt, 1984). Since the classification in a spiral concentrator depends on particle specific gravity

and size, the operation of spirals can be analyzed using size recovery or partition curves (Bazin et al., 2014).

Spiral concentrators possess multiple design parameters for a variety of applications. The design parameters that govern the performance of the spiral can be identified as the diameter, number of turns, slope, pitch and the profile of the trough. For an efficient separation on a spiral concentrator, the properties of the slurry flowing on a spiral, ore texture, percent solids and flow rate play important roles.

The optimum feed particle size for spiral concentrators is determined typically as finer than 3000 μm (Wills and Napier-Munn, 2006). Particles finer than 300 μm are known to lower the performance of the separation. (Boucher et al., 2016). In addition, spiral concentrators are inefficient at the recovery of very fine sized material ($<40 \mu\text{m}$) which has a detrimental effect on the overall separation (Goodman et al., 1985). Because many of the reserves of high-grade ores are diminishing all over the world, alternative ways of increasing and conserving precious and non-renewable natural resources are being considered by recovering low grade and fine minerals (Agrwal et al., 2016).

To analyze the operation of mineral processing equipment, size recovery curves have been frequently used. Nevertheless, there are very few papers in the literature describing the operation of spirals in terms of partition curves (Atasoy and Spottiswood, 1995; Holland-Batt and Holtham, 1991; Richards et al., 2000). Industrial circuits, which usually consist of rougher and cleaner spirals, should be investigated on a size-by-size basis to identify the efficient separation zones between the valuable and gangue minerals (Bazin et al., 2014).

In this study, to understand the separation mechanism of fine sized minerals in spiral concentrators on a size-by-size basis, chromite ore were fed to a spiral concentrator plant.

MATERIALS AND METHODS

Tests were conducted in a chromite beneficiation plant using spiral concentrators as unit equipment. There were two rougher spirals, two scavenger spirals and two cleaner spirals on the process. At the plant, mill discharge was fed to hydrosizer and coarser product of the hydrosizer was fed to spiral concentrator unit. The solids concentration of the feed were kept stable during the tests. There were splitters mounted at the discharge of each spiral concentrator, which enabled us to get products as concentrate and tail. The position of these splitters were also kept the same as the sampling was proceeding. The flowsheet of the plant is given in Figure 1 and the design specifications of the spiral concentrators are given in Table 1.

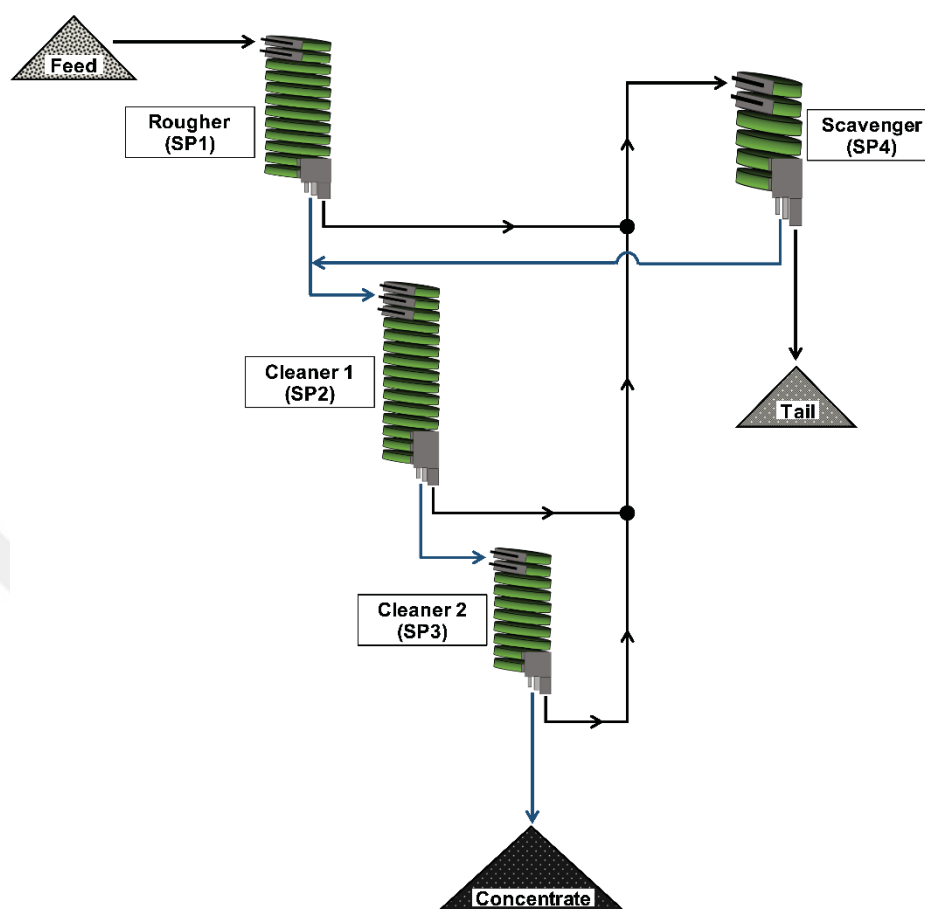


Figure 1 – Flowsheet of the spiral concentrator process

Chromite ore, which had nearly 5.50 % of feed grade, was initially fed to twin-start rougher spiral (SP1). The concentrate flow of the rougher was directed to Cleaner 1 spirals (SP2). After the two-stage-cleaning of chromite, final concentrate was handled from the heavies discharge port of Cleaner 2 spiral (SP3). The tailings of SP1, SP2 and SP3 were treated in the scavenger spiral (SP4). Tailings flow of SP4 was collected as final tailing. Heavies flow of SP4 was re-circulated to the system and was fed to SP2 together with the heavies flow of SP1.

Table 1 – Spiral concentrator specifications at the plant

SPECIFICATIONS	Rougher (SP1)	Cleaner 1 (SP2)	Cleaner 2 (SP3)	Scavenger (SP4)
Spiral Model	Twin-start	Triple-start	Triple-start	Twin-start
Spiral Diameter (mm)	1000	600	600	1000
Pitch Angle (°)	19	21	21	19
Number of Turns	5	5	5	3

Test samples were collected from the discharge flows of each spiral and from the feed. According to particle size analysis of the feed, d_{80} was 290 μm and nearly 20% of the feed was finer than 75 μm . The feed and the products were sieved for ten minutes through Tyler $\sqrt{2}$ interval screens from 425 μm to 53 μm to obtain several size fractions. The Cr_2O_3 percentages of the fractions were further analyzed by XRF method.

RESULTS AND DISCUSSION

Tests were conducted in three different feedrates. Test 1 had the highest feedrate whereas Test 3 had the lowest. C1, C2 and C3 are representing the final concentrates of Test 1, Test 2 and Test 3, respectively. In Table 2, overall test results with the spiral concentrators are given.

Table 2 – The overall results of the final concentrates

TEST RESULTS	C1	C2	C3
Weight (%)	5.20	5.83	9.06
Grade (%)	42.90	46.76	39.09
Recovery (%)	40.55	51.57	63.86
Feed Grade (%)	5.50	5.28	5.54

The highest recovery was obtained in C3 and lowest recovery in C1. The highest feedrate was resulted as the lowest recovery. Because the feedrate was higher in Test 1, the mass pull of C1 was lower. Much of the material by mass was tend to separate from the outer region of the trough when the feedrate was high. It was indicated in previous works that any increase in feed rate to a spiral results in a greater part of the additional flow volume reporting to the outside of the trough (Holland-Batt and Holtham, 1991; Holtham, 1992). Since the majority of the flow volume reports to the outer zone of the flow in a spiral trough, this area is responsible for controlling the recovery that can be achieved (Holland-Batt and Holtham, 1991).

In Figure 2, recovery values of the concentrates (R) due to grade ratios are shown. Grade ratio is stating the grade of the concentrate divided by the grade of the feed. To eliminate the fluctuations observed in the feed grade, it is more convenient to use a ratio than an actual value.

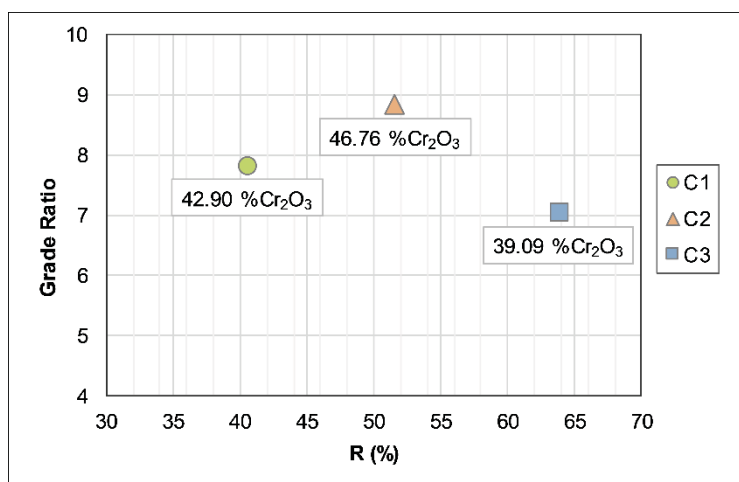


Figure 2 – Recovery vs. grade ratios of the final spiral concentrates

According to the results shown in Figure 2, the highest grade ratio was observed in the average feedrate. The optimum result was determined as C2, while C3 was found better in comparison to C1 due to its higher recovery.

The concentrates of the each test were sieved to obtain several size fractions and the chromite content of the fractions were analyzed by XRF method. Size-by-size grade results of the concentrates and the mass distributions of them are given in Figure 3.

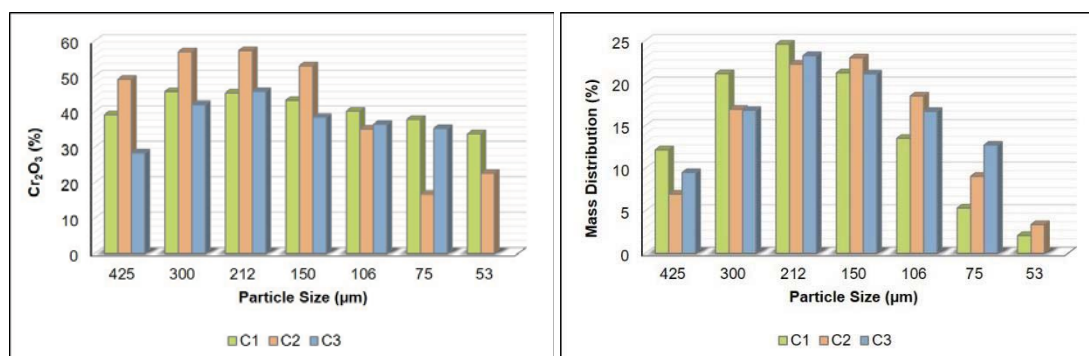


Figure 3 – Size-by-size grade (left) and mass distributions (right) of the spiral concentrates

The results showed that the highest grade and mass pull were achieved between 200 μm to 300 μm size fractions. The size-by-size chromite grades of the concentrates were showing a change between 20% and 60%. The values were increasing as the particles were getting coarser up to a certain particle size (300 μm). The particles coarser than 300 μm, however, had decreasing amount of concentrate by mass and decreasing concentrate grades.

The recovery and the separation efficiency (E) of the concentrates were compared in order to reveal the consistency of the results. Size-by-size grade ratios of the concentrates and the forenamed results are given in Figure 4.

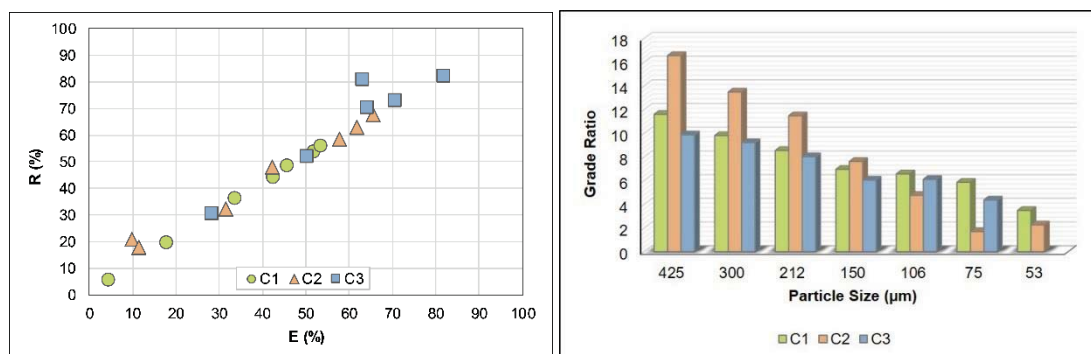


Figure 4 – Recovery vs. separation efficiency of the spiral concentrates (left) and size-by-size grade ratios of the concentrates (right)

The relationship between the separation efficiency and the recovery is shown to be linear with small deviations at higher recoveries. On the other hand, there is a discrepancy between the pattern of the size-by-size grade ratios and the size-by-size chromite grades of the concentrates. Calculated ratio results showed that as the particle size increased, the grade ratios were also increased in each test. The results revealed that the highest grade ratios were obtained in Test 2 with average feedrate.

Recoveries and separation efficiencies were previously compared in Figure 4. In Figure 5, size-by-size separation efficiencies together with the recovery values are presenting. The data of these test results are given in Table 3, though.

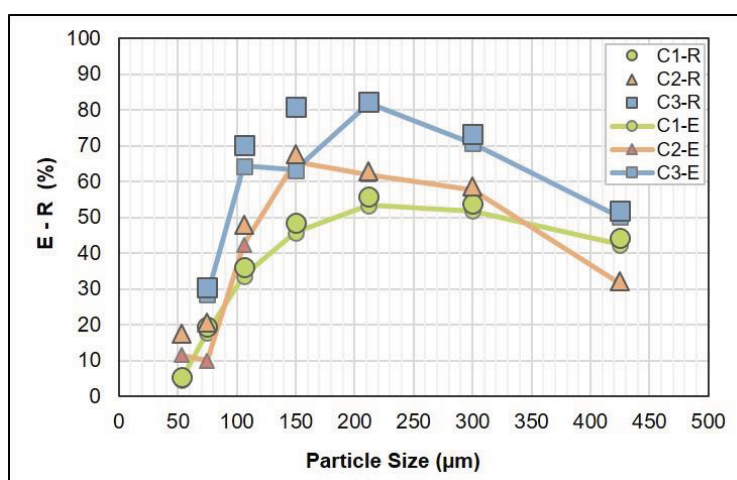


Figure 5 – The size-by-size recovery and the separation efficiency values of the concentrates

Table 3 – Separation efficiency and recovery data of the final concentrates

CONCENTRATES		Particle Size						
(Recovery / Efficiency)		425 μm	300 μm	212 μm	150 μm	106 μm	75 μm	53 μm
C1	R	44.13	53.75	55.78	48.55	36.19	19.49	5.51
	E	42.42	51.81	53.39	45.73	33.69	17.85	4.58
C2	R	32.08	58.48	62.84	67.71	47.85	20.65	17.63
	E	31.51	57.70	61.88	65.47	42.37	9.93	11.56
C3	R	51.92	73.12	82.13	80.75	70.27	30.56	-
	E	50.17	70.68	81.87	63.19	64.28	28.41	-

According to the results attained the size-by-size recovery and separation efficiency of concentrates mainly tend to behave similar regardless of their flowrates. It can be observed from the graph that the very fine particles ($<53 \mu\text{m}$) might only reach 30% recoveries maximum. As the particle sizes increased up to $200 \mu\text{m}$, in general, the recoveries increased. However, as particle size further increased, significant drop of recovery was observed for the coarse particles. The decrease in the recovery of coarse particles is attributed to the Bagnold force that preferentially flushes coarse particles toward the outer through of the spirals. The flow on the outside of the trough becomes energized and consequence to that the heavy particles find it hard to settle and escape this region to the inner region. This effect has a negative impact on recovery of heavy minerals. Similar behavior for coarse particles in previous testworks done by spiral concentrators were discussed in Bazin's work (Bazin et al., 2014).

In Figure 5, the inconsistency between the separation behavior and the recovery values in Test 3 between $100 \mu\text{m}$ and $150 \mu\text{m}$ particles was observed. This might be the reason of high flowrates. Separation efficiency or metallurgical performance is dependent on feed rate. As the flowrate increases, the peak separation efficiency might drop (Palmer and Vadeikis, 2010).

Investigations into many parameters is a long task, especially when many different ore types, particle shapes and size distributions are considered. Although these results are based on particle sizes and densities, it is also mainly related to trough geometries. For instance, a large diameter, low pitch and high number of turns will provide better separation of fines due to the lower turbulence in the slurry film (Richards et al., 2000; Sivamohan and Forssberg, 1985). Using the similar particle size distribution and density, diverse spiral geometries may result differently in terms of recoveries.

CONCLUSIONS

An experimental study was audit in a chromite beneficiation plant consisted of spiral concentrators as unit equipment. Testworks were done in three different feedrates with low grade chromite ore. Final concentrates of the tests were evaluated in a size-by-size manner. Recovery on a

spiral has been shown to increase with an increase in particle size up to a point (200 μm) where it is optimum and then drops at relatively high particle sizes (up to 400 μm).

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Hacettepe University Scientific Research Coordination Unit.
Project Number: FDK-2018-17257.

REFERENCES

- Agrwal, P.K., Bacchuwar, S., Rao, G. V., Sharma, S.K., 2016. Optimisation of process parameters of spiral concentrator for beneficiation of iron ore stacked slimes from Kirandul, Chattisgarh, India, in: International Mineral Processing Congress. The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, pp. 1–10.
- Atasoy, Y., Spottiswood, D.J., 1995. A study of particle separation in a spiral concentrator. *Miner. Eng.* 8, 1197–1208. doi:10.1016/0892-6875(95)00084-4
- Bazin, C., Sadeghi, M., Bourassa, M., Roy, P., Lavoie, F., Cataford, D., Rochefort, C., Gosselin, C., 2014. Size recovery curves of minerals in industrial spirals for processing iron oxide ores. *Miner. Eng.* 65, 115–123. doi:10.1016/j.mineng.2014.05.012
- Boucher, D., Deng, Z., Leadbeater, T.W., Langlois, R., Waters, K.E., 2016. Speed analysis of quartz and hematite particles in a spiral concentrator by PEPT. *Miner. Eng.* 91, 86–91. doi:10.1016/j.mineng.2015.09.014
- Burt, R.O., 1984. Gravity Concentration Technology. Elsevier, London.
- Goodman, R.H., Brown, C.A., Ritchie, I.C., 1985. Advanced gravity concentrators for improving metallurgical performance, in: Minerals and Metallurgical Processing. SME, pp. 79–86.
- Holland-Batt, A.B., Holtham, P.N., 1991. Particle and fluid motion on spiral separators. *Miner. Eng.* 4, 457–482. doi:10.1016/0892-6875(91)90147-N
- Holtham, P.N., 1992. Particle transport in gravity concentrators and the Bagnold effect. *Miner. Eng.* 5, 205–221. doi:10.1016/0892-6875(92)90043-9
- Palmer, M.K., Vadeikis, C., 2010. New developments in spirals and spiral plant operations, in: International Mineral Processing Congress. Brisbane, pp. 1099–1108.
- Richards, R.G., MacHunter, D.M., Gates, P.J., Palmer, M.K., 2000. Gravity separation of ultra-fine (-0.1 mm) minerals using spiral separators. *Miner. Eng.* 13, 65–77. doi:10.1016/S0892-6875(99)00150-8
- Sivamohan, R., Forssberg, E., 1985. Principles of spiral concentration. *Int. J. Miner. Process.* 15, 173–181.
- Wills, B.A., Napier-Munn, T.J., 2006. Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, 7th ed. Elsevier Science & Technology Books. doi:10.1016/B978-075064450-1/50003-5



**HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU**

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

Tarih:11/01/2019

Tez Başlığı: Yerçekimi ile Zenginleştirme Ekipmanlarında Tane Boyunun Etkisinin İncelenmesi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 129 sayfalık kısmına ilişkin, 11/01/2019 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %1'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

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

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik 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.

11/01/2019

Adı Soyadı: Damla İZERDEM

Öğrenci No: N 12248257

Anabilim Dalı: Maden Mühendisliği

Programı: Maden Mühendisliği

Statüsü: ☐ Y.Lisans ☒ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN

(İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Damla İZERDEM

Doğum Yeri : Zonguldak

Medeni Hali : Evli

E-posta : damlagucbilmez@hacettepe.edu.tr

Adresi: Koru Mah. 2652. Sok Funda Sitesi 2/10 10. Blok No:8 06810 Çayyolu,
Çankaya / ANKARA

Eğitim

Lisans : Hacettepe Üniversitesi

Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi

Doktora : Hacettepe Üniversitesi

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce: İleri Seviye

Almanca: Başlangıç

İspanyolca: Başlangıç

İş Deneyimi

2011 – Günümüz: Hacettepe Üniversitesi; Maden Mühendisliği Bölümü; Araştırma Görevlisi

Deneyim Alanları

Cevher Zenginleştirme; Yerçekimi ile ayırma, flotasyon

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi
Proje No: FDK-2018-17257. Bütçe: 3952.26 TL.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

İzerdem D. ve Ergün Ş. L., 2018. "Size-by-size evaluation of the concentration process in spiral concentrators", 29. International Mineral Processing Congress Proceedings, Moscova (17 – 21 Eylül 2018; Rusya), Section-3, Physical enrichment – gravity, magnetic and electrostatic separation, 229-236.